

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0902

香辛料提取物对酱卤鸡腿肌原纤维蛋白结构与功能的影响

李明月^{1,2}, 张 岑², 卢文静², 谌 迪², 潘道东¹, 钮忠华³, 夏 强¹, 肖朝耿^{2*}

(1.宁波大学 食品科学与工程学院, 浙江 宁波 315832; 2.浙江省农业科学院, 浙江 杭州 310021;

3.浙江麦尚食品有限公司, 浙江 杭州 311108)

摘要:为提升酱卤鸡腿风味与功能特性,本研究以响应面法优化其工艺参数,探究不同香辛料提取物对肌原纤维蛋白结构与功能的影响机制。其最佳工艺参数为卤煮 63 min、温度 91 °C、物料比 5%。7 种香辛料提取物均对肌原纤维蛋白的结构与功能特性有显著影响,均降低其表面疏水性、显著提高乳化稳定性 ($P<0.05$)。香豆素组 Zeta 电位最低 (-6.87 mV), 中值粒径最大 (1.75 μ m)。肉桂醛组羰基含量最高 (0.43 μ mol/g), 香草醛组游离巯基含量最高 (231 μ mol/g)。甜菜碱组 DPPH 自由基清除率 78.53%, 苯乙酮组 OH 自由基清除率 87.34%。此外,7 种提取物均改变蛋白网状结构,使二级结构中 α -螺旋比例增加。分子对接证实提取物与肌原纤维蛋白存在结合位点与结合能差异,其相互作用可调控蛋白结构与功能。

关键词: 香辛料提取物; 工艺优化; 肌原纤维蛋白; 功能结构

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2026) 02-0088-15

Effect of spice extract on the structure and function of myofibrillar protein in marinated chicken thighs

LI Mingyue^{1,2}, ZHANG Cen², LU Wenjing², CHEN Di², PAN Daodong¹, NIU Zhonghua³,
XIA Qiang¹, XIAO Chaogeng^{2*}

(1.School of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315832, China; 2.Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3.Zhejiang Maishang Food Co., Ltd., Hangzhou 311108, China)

Abstract: To improve the flavor and functional properties of spice-braised chicken legs, this study optimized processing parameters via response surface methodology and explored the mechanism of 7 spice extracts on myofibrillar proteins (MPs) structure and function. The optimal parameters were obtained to be braising 63 min, temperature 91 °C, and material ratio 5%. All 7 extracts significantly affected MPs, including the reduced surface hydrophobicity and enhanced emulsifying stability ($P<0.05$). The coumarin group had the lowest Zeta potential (-6.87 mV) and the largest median particle size (1.75 μ m). The cinnamaldehyde group had the highest carbonyl content (0.43 μ mol/g), and the vanillin group had the highest free sulfhydryl content (231 μ mol/g). The betaine group's DPPH radical scavenging rate was 78.53%, and acetophenone group's OH radical scavenging rate was 87.34%. Moreover, all extracts altered MPs' network structure and increased α -helix ratio in the secondary structure. Molecular docking confirmed differences in binding sites and energies between extracts and MPs, whose interaction regulated MPs' structure and function.

Keywords: spice extracts; process optimization; myofibrillar protein; functional structure

收稿日期: 2025-09-04

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2024SNJF048)

第一作者: 李明月, 硕士研究生, 主要研究方向为畜产品加工。E-mail: 1911885745@qq.com

*通信作者: 肖朝耿, 研究员, 主要研究方向为功能性食品配料开发与应用。E-mail: xiaochaogeng@163.com

酱卤鸡肉制品是我国典型的禽肉深加工制品, 其口感酥软, 风味浓郁, 种类多样, 深受人们的喜爱。随着经济发展和消费水平的提高, 消费者对酱卤肉制品的需求不断上升。然而, 卤制鸡腿蛋白含量与鸡腿皮脂肪含量较高, 贮藏期间易成为微生物增殖的营养基质, 从而导致嫩度下降、风味流失、氧化劣变, 影响产品品质^[1]。研究表明, 酱卤鸡腿的嫩度和风味特征与肌原纤维蛋白(Myofibrillar Protein, MP)的结构状态及氧化程度密切相关。MP作为肌肉中含量最多的蛋白质, 是肌纤维的核心组成部分, 其氧化会加剧蛋白热变性倾向, 进而导致理化特性与功能特性显著下降^[2]。

香料是一种植物实体, 具有多种芳香和味觉属性, 主要包括芳香、辛辣、麻木、苦味和甜味等, 其细微差别可能会影响肉制品的风味和品质。研究表明, 柠檬草和八角茴香提取物可有效清除鸡肉基质中的DPPH和超氧自由基^[3]。Estévez等^[4]在法兰克福香肠配方中引入迷迭香精油作为增强剂, 研究了其在改善质地属性方面的作用, 发现其可减弱硬度、黏附性、黏性和咀嚼性, 同时调节冷藏过程中的弹性损失。目前的研究表明, 香辛料提取物能通过多种机制影响MP的结构与功能, 从而最终影响产品品质。然而, 不同香辛料提取物因其活性成分和性质的差异, 对MP的影响规律复杂且尚未被完全揭示, 仍须系统深入地探索以优化酱卤鸡腿工艺和提升产品品质。

本研究通过响应面法确定香辛料酱卤鸡腿的最佳工艺, 选取香辛料提取物中7种呈味特性突出且含量变化显著的风味活性物质, 主要包括苯乙酮(Acetophenone, AP)、香草醛(Vanillin, Van)、香豆素(Coumarin, Cou)、谷氨酸(Glutamate, Glu)、肉桂酸(Cinnamic Acid, CinA)、肉桂醛(Cinnamaldehyde, Cin)和甜菜碱(Betaine, Bet), 系统地分析酱卤鸡腿中MP的羰基含量、巯基含量、表面疏水性、黏度、微观形貌及二级结构等关键指标的动态变化, 结合分子对接技术, 探究香辛料提取物对MP的作用机制。本研究对于通过抑制蛋白氧化来提升酱卤鸡腿的嫩度与风味, 维持肉制品蛋白质的功能特性, 具有重要的理论意义与应用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鸡腿、食盐、料酒、生抽、老抽、大豆油: 杭州象鲜科技有限公司; 香辛料(山奈、干姜、花椒产地为云贵川, 桂皮产地为广西): 菜佳宜旗舰店; 氯化镁、氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、磷酸二氢钾、无水葡萄糖、色氨酸、甘氨酸、乙二醇四乙酸(EDTA)、乙酸乙酯、无水乙醇、尿素、水杨酸、三氯乙酸(均为分析纯): 上海凌峰化学试剂有限公司; 苯乙酮、香草醛、香豆素、谷氨酸、肉桂酸、肉桂醛、甜菜碱、盐酸胍、溴酚蓝、2-硝基苯甲酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、三羟甲基氨基甲烷(Tris)(均为分析纯)、十二烷基硫酸钠(SDS): 上海麦克林生化科技有限公司; BCA蛋白检测试剂盒: 南京建成生物工程研究所; 甲醇、乙腈(LC-MS级): 默克集团; 甲酸(LC-MS级): 西亚试剂。

Zetasizer Nano ZS 纳米粒径电位分析仪: 英国马尔文仪器有限公司; Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪、Thermo Vanquish UHPLC 超高效液相色谱仪、Q.Exactive HF 高分辨质谱仪: 赛默飞世尔科技(中国)公司; Zorbax Eclipse C18(2.1 mm*100 mm*1.8 μL)色谱柱: 安捷伦科技有限公司; DHG-9140A 鼓风干燥箱: 上海一恒科学仪器有限公司; SCIENTZ-10N 冷冻干燥机: 宁波新芝生物科技股份有限公司; Centrifuge 5804R 冷冻离心机: 艾本德(上海)国际贸易有限公司; UV-8000S 紫外可见分光光度计: 上海元析仪器有限公司; HAAKE MARS60 旋转流变仪: 柜谷科技发展(上海)有限公司; AMR-100 酶标仪: 杭州奥盛仪器有限公司; Regulus8000 超高分辨场发射扫描电子显微镜: 日立分析仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 酱卤鸡腿的制备

将鸡腿洗净沥干, 放入500 mL的80℃水中, 加入20 g料酒, 初煮5 min, 捞出后放入10℃的冷水中, 2 min后捞出沥干。参照先前的研究^[5], 略加修改, 将经过初煮的鸡腿放入基础配方(水200 mL、生抽10 g、老抽2 g、盐2 g), 再加入干姜、

花椒、桂皮、山奈,于水浴锅中 90 ℃ 卤制 60 min,冷却至室温。

1.2.2 MP 的提取

MP 的提取参照 Ping 等^[6]的方法,略加修改。将在最佳温度、时间下卤制的鸡腿肉样品置于含有 0.1 mol/L NaCl、2 mmol/L MgCl₂、1 mmol/L EDTA 和 20 mmol/L 磷酸盐的溶液中,调 pH 为 7.4,均质,4 ℃ 下 8 000 r/min 离心 10 min,取沉淀再次离心。洗涤沉淀重复 3 次以上,第 3 次洗涤时,均质后对混合液进行 4 层纱布过滤,去除结缔组织,再进行离心。最后一次洗涤离心后,上清应呈现无色透明水状,最终所得沉淀为 MP。使用时以缓冲液溶解(20 mmol/L 磷酸盐、0.6 mol/L NaCl、pH 为 7.4)并调整为所需浓度。通过 BCA 蛋白检测试剂盒测量 MP 的浓度。

1.2.3 不同香辛料提取物与 MP 混合溶液的制备

制备混合溶液,最终质量浓度为 1 g/L。将香辛料提取物与 2 g/L MP 溶液按 1:1 的体积比混合得到香辛料提取物-MP 混合物。

1.2.4 单因素实验

固定卤煮温度 90 ℃、卤煮时间 60 min、卤煮物料比(香辛料总质量占肉质量的百分比)5%,改变其中一个条件,分析不同因素对鸡腿品质的影响。各因素水平梯度分别为:卤煮温度 60、70、80、90 和 100 ℃;卤煮时间 45、60、75、90 和 105 min;卤煮物料比 3%、4%、5%、6%和 7%。以不同的条件对鸡腿进行卤煮。同时,测定鸡腿的水分含量、损失率和感官评分。

水分含量的测定:参照国标 GB 5009.3—2016 第一法的直接干燥法进行测定。称量样品 3 g 放入恒重后装有海砂的铝盒中,在 105 ℃ 烘箱中烘至恒重(前后两次质量之差小于 2 mg)。

损失率的测定:分别称取 1 g 酱卤鸡腿肉在 105 ℃ 烘箱中烘至恒重(前后两次质量之差小于 0.5 mg)。

感官评分:将在不同香辛料提取物添加条件下制备的卤鸡腿交由感官评定小组(由 5 位具有食品感官评价经验的人员组成)进行评定。以仅添加基础配方制备的卤鸡腿作为空白对照组,评定标准采用百分制,见表 1。

表 1 酱卤鸡腿感官评分标准

项目	分值	感官评分标准
外观	25	鸡腿整体完整,无破皮残缺现象(17~25 分)
		鸡腿整体较完整,有轻微残缺现象(9~16 分)
		鸡腿整体不完整,有明显残缺现象(1~8 分)
滋味	25	香辛料味适中,无腥味(17~25 分)
		香辛料味过浓,有轻微腥味(9~16 分)
		香辛料味较淡,有明显腥味(1~8 分)
质地	25	口感较好,软硬适中(17~25 分)
		过软(9~16 分)
		不易咀嚼,稍硬(1~8 分)
色泽	25	颜色较均匀,有光泽,无过熟现象(17~25 分)
		色泽过深,存在过熟现象(9~16 分)
		色泽过浅,存在不熟现象(1~8 分)

1.2.5 响应面实验设计

根据单因素实验结果,基于 Box-Behnken 采样原理,实验因素选择卤煮时间(*A*)、卤煮温度(*B*)、物料比(*C*),响应值(*Y*)选择感官评分,设计三因素三水平的响应面实验,见表 2。

表 2 Box-Behnken 响应面设计因素及水平

因素	水平		
	-1	0	1
<i>A</i> : 卤煮时间/min	45	60	75
<i>B</i> : 卤煮温度/℃	80	90	100
<i>C</i> : 物料比/%	4	5	6

1.2.6 黏度的测定

实验组将 2 g/L 的 MP 溶液与 1 g/L 的香辛料提取物(苯乙酮、香草醛、香豆素、谷氨酸、肉桂醛、肉桂醛、甜菜碱)按体积比 1:1 混合,空白组将 2 g/L 的 MP 溶液与磷酸盐溶液 1:1 混合。测量条件如下:将样品放置在间隙为 100 μm 的平行板上,在 25 ℃ 下进行黏度-剪切速率扫描。表观黏度测试时剪切速率范围为 0.01~100 s⁻¹^[7]。

1.2.7 表面疏水性的测定

依据 Cao 等^[8]的方法,略加修改。各取 1 mL 实验组和空白组分别与 1 g/L 的溴酚蓝(BPB)以体积比 10:1 混合,4 ℃ 下反应 10 min,反应后 4 ℃ 下 8 000 r/min 离心 10 min,并在 595 nm 处测定。

1.2.8 乳化活性和乳化稳定性的测定

将 2.0 mL 大豆油与 8.0 mL 实验组或空白组溶液加入离心管后,用匀浆机以 8 000 r/min 处理 1 min,立即从管底 0.5 cm 处吸取 50 μ L 匀浆液,加入 5 mL 0.1% 十二烷基硫酸钠溶液,摇匀后马上用分光光度计在 500 nm 波长处测出吸光度 (A_0),剩余匀浆液静置 10 min 后再从相同位置取 50 μ L 加入 5 mL 含 0.1% 十二烷基硫酸钠的溶液,摇匀后在 500 nm 波长处测出吸光度 (A_{10}),每次测量均以 0.1% 十二烷基硫酸钠溶液作为空白对照。MP 匀浆液的乳化活性 (EAI) 和乳化稳定性 (ESI) 分别由以下公式来计算^[9]:

$$I_{\text{EAI}} = \frac{2 \times 2.303}{c \times (1 - \phi) \times 10^4} \times A_{500} \times 50$$

$$I_{\text{ESI}} = A_{10} / A_0 \times 100\%$$

式中: I_{EAI} 为 EAI, m^2/g ; c 为蛋白质量浓度, g/L ; ϕ 为油相体积分数, $\phi = 0.2$; A_{500} 为 500 nm 处的吸光度; I_{ESI} 为 ESI, %。

1.2.9 电位和粒径的测定

Zeta 电位根据 Yu 等^[10]的方法进行测量,实验组和空白组溶液各取 1.5 mL,分别放入一次性 Zeta 池,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下进行分析。

参照 Sun 等^[7]的方法分析颗粒大小,各取 1.5 mL 实验组和空白组溶液,分别放入样品池中,在 1~1 000 μm 的范围内进行分析。

1.2.10 巯基含量的测定

实验组与空白组溶液各取 1 mL 放入塑料离心管,参照 Chen 等^[11]的方法稍作修改,每管加入 1 mL 10 mmol/L 的 2,4-二硝基苯肼溶液(溶剂为乙醇与盐酸体积比 100:1)并在室温反应 1 h,其间每 5 min 涡旋振荡 1 次,再加入 1 mL 20% 三氯乙酸溶液以 8 000 r/min 离心 5 min,弃上清液后用 1 mL 体积比 1:1 的乙酸乙酯-乙醇溶液洗涤沉淀 3 次去除未反应试剂,接着加入 3 mL 6 mol/L 盐酸胍溶液于 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴保温 15 min 使沉淀溶解,再次以 8 000 r/min 离心 3 min 后弃去不溶物,取上清液于 370 nm 波长处测定吸光度,以 22 000 L/(mol $\cdot$ cm)摩尔吸光系数计算巯基含量,蛋白含量采用 BCA 试剂盒测定。

1.2.11 游离巯基含量的测定

将 1 mL 实验组和空白组溶液与含有 10 mmol/L EDTA 和 0.1 mol/L KH_2PO_4 的缓冲溶液 (9

mL) 混合,并加入 200 μ L Ellman 试剂,在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 60 min 后,于 412 nm 波长处测量吸光度^[12]。

1.2.12 羟自由基清除活性的测定

参考赵鹤鹏等^[13]的方法并略加改动。取洁净试管,依次加入空白/实验组样液、6 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液、硫酸亚铁溶液、双氧水溶液各 1 mL,混匀后采用 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴避光保温 30 min,于 510 nm 波长处测量吸光度。测定体系中以无水乙醇替代水杨酸-乙醇溶液时的吸光度 (A_1);测定未替换任何试剂的反应体系吸光度 (A_2);测定体系中以蒸馏水替代空白/实验组样液时的吸光度 (A_3)。根据下述公式计算样品对羟自由基的清除率 (R_{OH})。

$$R_{\text{OH}} = 1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3} \times 100\%$$

1.2.13 DPPH 总自由基清除活性的测定

参考 Cheng 等^[14]的方法并略加改动。根据预实验结果稀释样品构建浓度梯度。取洁净试管,加 2 mL 样品溶液与 2 mL 0.2 mmol/L DPPH 溶液,涡旋混匀后,室温避光密封放置 30 min。以甲醇作空白对照,于 517 nm 波长处测定各管吸光度,每浓度设 3 次平行重复,最后计算清除率 (R_{DPPH})。

$$R_{\text{DPPH}} = 1 - \frac{A_i - A_j}{A_k} \times 100\%$$

式中: A_k 为水与 DPPH 溶液的混合液在 517 nm 处的吸光度; A_i 为样品溶液与 DPPH 溶液的混合液在 517 nm 处的吸光度; A_j 为样品溶液与甲醇的混合液在 517 nm 处的吸光度。

1.2.14 扫描电镜观察

分别取 10 mL 实验组和空白组溶液于一次性塑料平板中,置于冻干机中直至冻干,将样品粉末均匀涂布到样品台上,表面喷镀一层铬,喷金电流 70 μA ,时间 60 s,加速电压为 3.0 kV,处理后于电镜下观察图像形貌特征。

1.2.15 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 分析

FT-IR 分析参考 Luo 等^[15]的方法。实验组将 2 g/L 的 MP 溶液与 1 g/L 的香辛料提取物(苯乙酮、香草醛、香豆素、谷氨酸、肉桂酸、肉桂醛、甜菜碱)按体积比 1:1 混合,空白组将 2 g/L 的 MP 溶液与磷酸盐溶液 1:1 混合,实验组和空白组各取 2 mL,通过光谱仪进行扫描。测试条件如下:扫描范围为 4 000~400 cm^{-1} ,扫描速度为 4 cm^{-1}/s 。

1.2.16 分子对接

肌球蛋白 (ID: 6YSY) 的晶体结构是来自 RCSB 蛋白质数据库 (<https://www.rcsb.org>) 的家兔骨骼肌球蛋白结构, 最终保存的对接构象数量为 10, 为配体生成的初始随机构象数目为 10, 每个配体构象要精修的取向数目为 10, 并执行模拟退火精修。香辛料提取物的晶体结构来自 PubChem 数据库 (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>), 采用 Discovery Studio 进行分子对接。

1.3 数据处理

采用 SPSS 26.0 进行统计分析, Origin 9.0 进行绘图, Design Expert 13 软件进行响应面优化。

2 结果与讨论

2.1 不同卤煮条件对鸡腿品质的影响

2.1.1 卤煮时间对鸡腿品质的影响

在温度 90 ℃、物料比 5% 不变的情况下, 随着卤煮时间的延长, 鸡腿的损失率显著增大, 水分质量分数显著降低, 感官评分出现先增后降的趋势。如图 1 (a) 所示, 随着卤煮时间的延长, 鸡腿的损失率呈现出显著上升的趋势。这一现象的成因在于鸡腿在卤煮加热过程中, 内部的水分、蛋白质及少量脂肪会逐渐溶出, 进而引发汁液流失问题, 随着汁液的不断渗出, 鸡腿的质量也持续减小^[16], 进而导致损失率持续上升。如图 1 (b) 所示, 随着卤煮时间的延长, 酱卤鸡腿的水分相应出现显著减少现象, 主要原因是卤煮加热使胶原蛋白和肌原纤维蛋白剧烈变性, 导致蛋白质空间构象变化, 肌肉纤维收缩短聚, 使肉的蛋白质保水性降低, 水分自由度降低, 不易流动性增强。随着卤煮时间的增加, 结合水和不易流动水相对比例显著上升而自由水质量分数显著减小 ($P < 0.05$), 这与鸡腿损失率逐渐上升的变化趋势相符合。因为随着卤煮时间的延长, 自由水逐渐蒸发流失, 加之肌球蛋白和肌动蛋白变性造成肉的保水性严重下降^[16]。其中 90~105 min 逐渐变得平缓的主要原因在于: 随着卤煮时间的增加, 肉的蛋白质变性降解不再明显, 因而失水率及保水性变化不再显著^[16]。如图 1 (c) 所示, 鸡腿的感官评分随着卤煮时间的延长, 出现先增大后减小的趋势, 卤煮时间在 45~90 min 过程中, 酱卤鸡腿的感官评分显著上升, 这是由于随着

卤煮时间的增加, 酱卤鸡腿从不熟转变到熟的过程中, 色泽逐渐变得均匀, 肉腥味慢慢消失, 口感变得软硬适中并出现淡淡的香辛料味, 进而引起感官评分的上升。卤煮时间在 90~105 min 过程中, 长时间的卤制使得鸡腿外观出现破损, 颜色过深, 咀嚼性下降, 并且鸡腿中的碳水化合物发生部分水解, 变性的蛋白质也发生降解, 肌纤维断裂, 从而使硬度、胶黏性和咀嚼性下降, 最终导致感官评分降低。

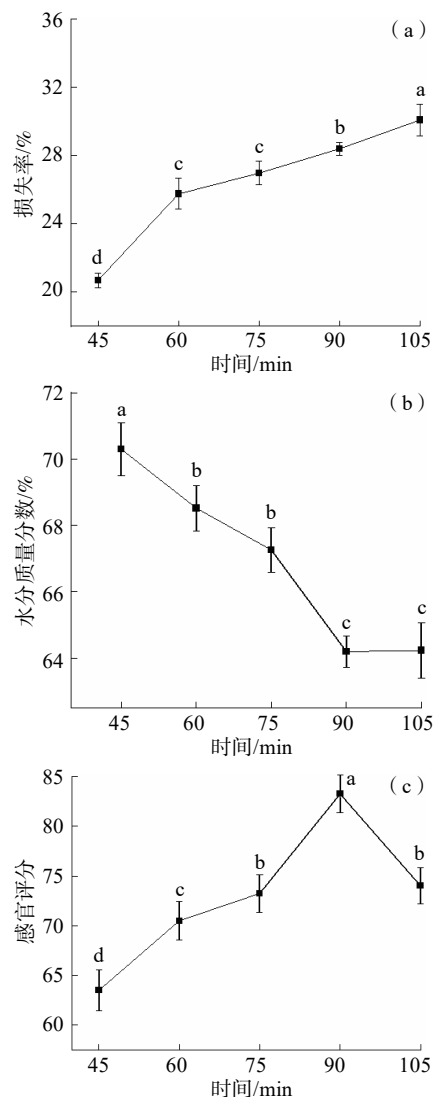


图 1 卤煮时间对鸡腿品质的影响

2.1.2 卤煮温度对鸡腿品质的影响

如图 2 所示, 在卤煮时间 60 min、物料比 5% 不变的情况下, 随着卤煮温度的升高, 鸡腿的损失率显著增大, 水分质量分数显著降低, 酱卤鸡腿的感官评分出现先增后降的趋势。

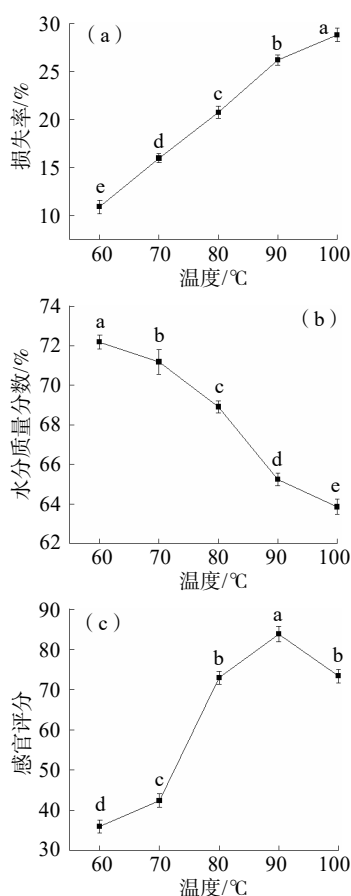


图2 卤煮温度对鸡腿品质的影响

如图2(a)所示,当卤煮温度为60~90℃时,鸡腿损失率快速升高,在90~100℃卤煮温度下变化相对平缓,可能是因为高温加热较短时间内,鸡腿肉中胶原蛋白和肌原纤维蛋白剧烈变性,大大降低了肉的保水性,热溶性胶原蛋白、肌浆蛋白汁液、弹性蛋白及少量的脂肪等流失使损失率升高^[17]。如图2(b)所示,随着温度的升高,酱卤鸡腿水分质量分数显著降低,主要原因可能是肉中水分以结合水(与蛋白质紧密结合)和自由水(存在于细胞间隙)两种形式存在,加热使蛋白质变性,氢键断裂,部分结合水转化为自由水,肌纤维收缩挤压内部水分,同时高温使细胞膜通透性增加,自由水更易渗出。LF-NMR数据^[18]显示,温度升高时自由水峰面积比例显著增大,说明自由水相对含量上升且更易流失。高温加热会引发蛋白质变性,当温度升高时,肌原纤维蛋白发生热变性,分子结构展开并重新交联凝固,导致肌肉纤维剧烈收缩,肌纤维间隙减小,原本锁住水分的空间被压缩,水分被挤出。此外,卤煮过程中的盐分吸收也会进一步减少肉中

的水分。如图2(c)所示,卤煮温度在60~90℃的情况下,酱卤鸡腿的感官评分显著增大。在60℃时,由于温度过低,酱卤鸡腿在完成卤煮后色泽过浅,存在不熟现象,且伴有肉腥味。随着温度的升高,直至90℃,这时的酱卤鸡腿颜色较均匀,有光泽,并且不存在过熟现象。卤煮温度在90~100℃的情况下,酱卤鸡腿的感官评分显著降低。在100℃下,酱卤鸡腿出现过熟现象,鸡腿颜色过深且鸡腿外观出现破损。长时间的高温卤制会加速肌原纤维蛋白的剧烈收缩与交联,使肌肉纤维结构塌陷,形成粗糙的纤维化质地,导致咀嚼性下降,咀嚼时产生干柴感;并且高温会使肌细胞内部水分快速蒸发,同时破坏蛋白质的持水网络结构,失水会导致肉质干瘪,弹性下降,最终引起感官评分下降。

2.1.3 物料比对鸡腿品质的影响

如图3所示,在卤煮温度90℃、时间60min不变的情况下,随着物料比的升高,鸡腿的损失率与水分质量分数没有显著变化,酱卤鸡腿的感官评分出现先增后降的趋势。

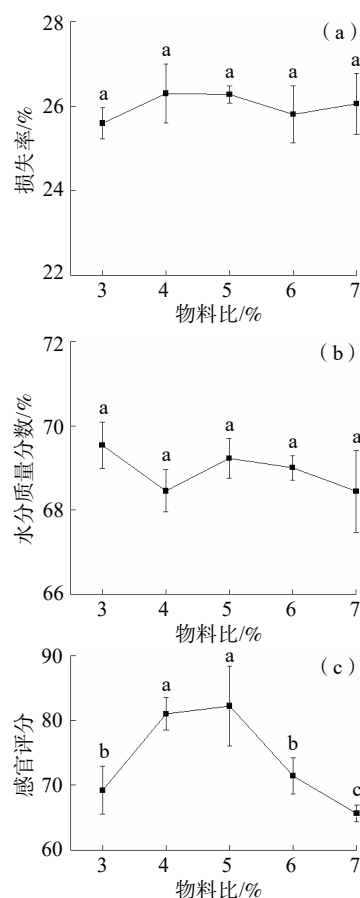


图3 物料比对鸡腿品质的影响

在物料比 3%~5%时，香辛料的增加能够有效掩盖鸡腿肉的腥膻味，香辛料不但不会干扰肉本身的鲜味，反而能通过轻微的味觉刺激唤醒味蕾，让肉香和卤汁的咸鲜滋味更突出。在物料比 5%~7%时，香辛料过多，掩盖了鸡腿的肉香、卤汁的酱香等基础风味，凸显涩味或苦味，导致鸡腿感官评分下降。

2.2 不同卤煮条件下响应面优化结果分析

响应面设计方案及对应试验结果见表 3。

表 3 响应面设计方案及结果

组号	A/min	B/℃	C/%	Y
1	75	90	4	71.4
2	75	100	5	70.2
3	60	80	4	62.0
4	60	90	5	80.8
5	60	90	5	81.0
6	45	90	6	68.8
7	60	90	5	81.8
8	60	100	4	69.4
9	60	90	5	83.0
10	75	90	6	75.0
11	75	80	5	71.6
12	45	80	5	63.8
13	45	100	5	70.0
14	45	90	4	66.4
15	60	90	5	81.4
16	60	100	6	71.0
17	60	80	6	66.8

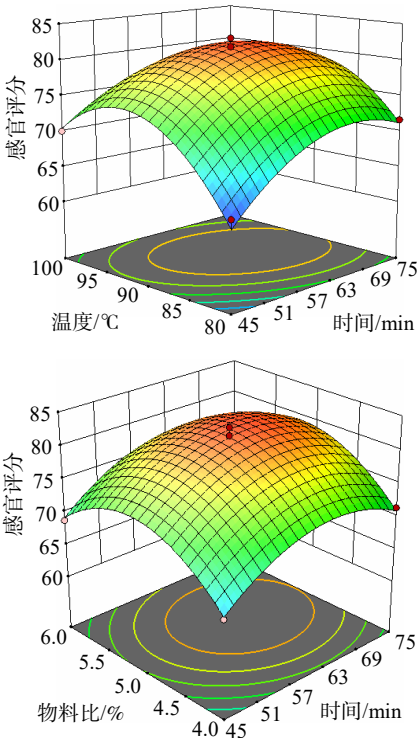
运用 Design Expert 13 软件对数据进行多元回归拟合，构建得到感官评分（Y）与卤煮时间（A）、卤煮温度（B）、物料比（C）的回归方程： $Y=81.6+2.4A+2.05B+1.55C-1.9AB+0.3AC-0.8BC-4.8A^2-7.9B^2-6.4C^2$ 。模型显著性检验结果（表 4）显示，F 值达 54.40（ $P<0.0001$ ），表明该模型具有高度显著性；同时，失拟项 P 值为 0.1512，不显著，说明模型拟合效果良好，能够有效反映变量间的关系。进一步通过 F 值量化分析可知，各卤煮条件对感官评分的影响程度由大到小依次为卤煮温度>卤煮时间>物料比。

表 4 回归模型的方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	707.76	9	78.64	54.40	<0.0001**
A	46.08	1	46.08	31.87	0.0008**
B	33.62	1	33.62	23.25	0.0019**
C	19.22	1	19.22	13.29	0.0082**
AB	14.44	1	14.44	9.99	0.0159*
AC	0.36	1	0.36	0.25	0.6331
BC	2.56	1	2.56	1.77	0.2250
A ²	97.01	1	97.01	67.10	<0.0001**
B ²	262.78	1	262.78	181.76	<0.0001**
C ²	172.46	1	172.46	119.29	<0.0001**
残差	10.12	1	1.45		
失拟项	7.08	3	2.36	3.11	0.1512
纯误差	3.04	4	0.76		
合计	717.88	16			

注：“*”表示差异显著（ $P<0.05$ ）；“**”表示差异极显著（ $P<0.01$ ）。

在卤煮时间、卤煮温度和物料比的交互作用下，鸡腿的感官评分呈拱形曲面分布（图 4）。通过二次多元回归方程优化，得出最佳卤煮条件为卤煮时间 63.52 min，卤煮温度 90.96℃，物料比 5.12%，根据实际卤煮条件，最终确定最佳卤煮时间 63 min，卤煮温度 91℃，物料比 5%，得到感官评分为 82.07。



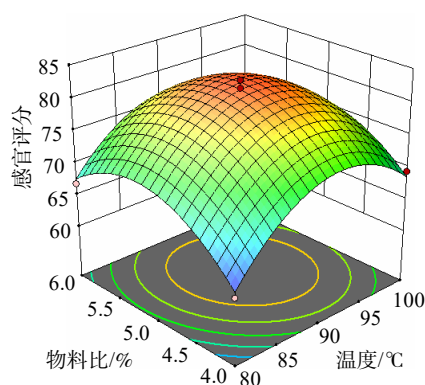


图4 不同因素交互作用对鸡腿感官评分的影响

2.3 肌原纤维蛋白黏度分析

如图5所示,所有样品的黏度都随剪切速率的增加而降低,这表明存在剪切变稀的特征。较高的剪切速率加剧了蛋白质间相互作用的破坏,导致摩擦阻力和黏度降低^[19]。此外,加入香辛料提取物后,MP的剪切变稀行为没有改变。然而,Glu-MP复合体的黏度明显低于MP样品,这可能是由于MP与Glu的结合导致MP的尾部和头部之间的结合显著中断,使得蛋白质聚集和重排。香辛料提取物与MP的结合增加了空间位阻,阻碍了MP分子之间的流体动力相互作用和缔合^[20]。Glu可能引起了蛋白质之间的非共价物理交联,改变了MP的微观结构,导致蛋白质聚集和重排^[21],从而降低了黏度。

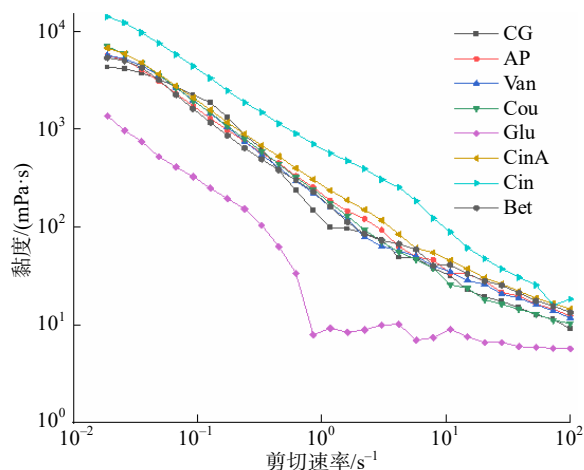


图5 经香辛料提取物处理的MP的黏度

Cin-MP复合体黏度显著高于其他复合体和对照组。Cin的加入可能导致疏水基团和活性巯基的暴露,从而增加疏水相互作用和二硫键。Cin的苯环结构具有疏水性,可能与蛋白质的疏水区域结合,导致蛋白质部分展开或构象变化,这种展开会

暴露更多的疏水残基,增强蛋白质分子间的疏水相互作用,形成临时或永久的聚集体,增加黏度^[22]。此外,Cin的醛基($-CHO$)与肌原纤维蛋白的氨基($-NH_2$)发生Schiff碱反应,形成碳氮双键($-CH=N-$),促进蛋白质分子间共价交联^[23]。Cao等^[24]证明,MP和Cin之间的Schiff反应可以形成硬质Pickering乳液并加强蛋白质相互作用,这种交联使蛋白质网络结构更致密,分子间作用力增强,宏观表现为黏度上升。高黏度MP溶液可形成致密界面膜,抵抗油滴聚结,提高乳化稳定。研究表明,添加高黏度多糖瓜尔胶的MP乳液因黏度升高抑制液滴碰撞,乳化稳定性指数显著提升^[25],这与本研究中Cin组乳化稳定性升高一致。其他实验组与空白组之间黏度无明显差异。

2.4 肌原纤维蛋白表面疏水性分析

蛋白质发生氧化反应时,其天然的二级结构与三级结构会发生改变,蛋白结构因氧化而展开,导致蛋白溶液中疏水性基团的比例显著上升,进而使表面疏水性增强^[26]。如图6所示,加入香辛料提取物后,MP的表面疏水性下降,这一现象表明香辛料提取物能够降低蛋白质表面的疏水基团含量。其作用机制可能在于,香辛料提取物诱导蛋白质发生交联与聚集,进而阻碍疏水性氨基酸暴露于蛋白质表面,促使这些基团重新嵌入内部结构。这种结构变化直接导致BPB的结合量减少^[27]。

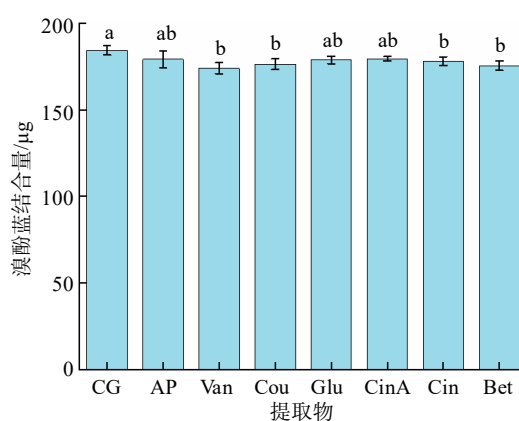


图6 经香辛料提取物处理的MP的溴酚蓝结合量

在研究乌饭树叶色素与水稻蛋白相互作用时,也发现蛋白质的表面疏水性降低,说明乌饭树叶色素能够与蛋白质的疏水性氨基酸残基结合形成新复合物^[28]。通过研究迷迭香对博洛尼亚香肠蛋白氧

化的抑制作用,发现迷迭香能够显著抑制氧化产物羰基类化合物的生成,减少巯基间的氧化交联^[29],从而保护疏水基团,抑制表面疏水性的增加,这与本研究中羰基含量降低、巯基含量上升一致。

2.5 肌原纤维蛋白乳化活性和乳化稳定性分析

MP 作为两性分子,同时具备亲水基团与疏水基团,因而兼具亲水性与亲油性,这种两亲特性使其能够降低水-油界面的表面张力,进而形成稳定的乳化体系^[30]。图 7 是不同香辛料提取物对 MP 的 EAI 和 ESI 的影响,实验组和空白组的 EAI 和 ESI 差异显著,其中 ESI: CinA (90%)>Cin (89.9%)>AP (85.3%)>Van (82.7%)>Cou (76.8%)=Bet (76.8%)>Glu (73.3%)>CG (71.2%),即香辛料提取物显著提高了乳化稳定性。香辛料提取物能与蛋白质形成共价交联,强化蛋白网络的刚性,使吸附在油滴表面的蛋白膜更致密,还能清除自由基,抑制蛋白氧化导致的二硫键过度交联和疏水性暴增,从而维持蛋白乳化网络的长期稳定性^[20]。这与本研究中表面疏水性降低及自由基清除力提高一致。但乳化活性降低,原因可能是加入香辛料提取物后乳滴间排斥力增强,或者连续相黏度增加,乳滴分布均匀化。

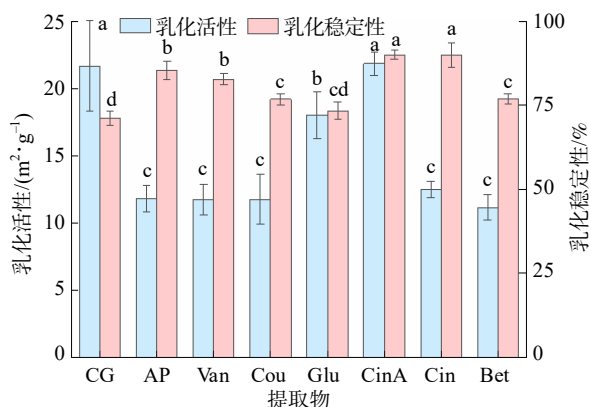


图 7 经香辛料提取物处理的 MP 的乳化活性与稳定性

2.6 电位与粒径分析

如图 8 所示,所有样品的电位都是负值,这表明蛋白质表面负电荷氨基酸的数量超过了正电荷氨基酸的数量^[31]。除 Glu 组外,香辛料提取物的加入均降低了 MP 的 Zeta 电位, Glu (-2.58 mV)>CG (-3.85 mV)>Bet (-4.53 mV)>CinA (-5.20 mV)>Van (-5.26 mV)>Cin (-5.34 mV)>AP (-6.62 mV)>Cou (-6.87 mV),表明肌原纤维蛋白表面的负电

荷增加,颗粒间的静电相互作用力增强^[32]。香辛料提取物和 MP 之间的相互作用会引起 MP 的展开,促进蛋白质表面负电荷氨基酸的暴露,最终导致 Zeta 电位降低^[33]。此外,有研究表明肌原纤维蛋白表面疏水性的结果也与 Zeta 电位结果相关联,表面疏水性较低的肌原纤维蛋白复合物具有较低的 Zeta 电位和较高的静电相互作用力^[20]。这与本研究中表面疏水性降低一致。

MP 的聚集可以通过粒径来评估,以中值粒径表示样品的累计粒度分布百分数达到 50%时所对应的粒径。如图 8 所示,香辛料提取物加入后,除 Glu、CinA 和 Bet 组外,MP 的中值粒径均显著增大, Cou (1.75 μm)>AP (1.53 μm)>Van (0.67 μm)>Cin (0.51 μm)>CG (0.46 μm)>CinA (0.43 μm)>Bet (0.34 μm)>Glu (0.32 μm),表明香辛料提取物可以促进蛋白质聚集。这种现象可能是由于 MP 去折叠增加了平均粒径^[34]。此外,粒径与 SH 含量和绝对 Zeta 电位呈正相关。SH 和带负电荷的基团更多地暴露在肌原纤维蛋白的表面,这可能会促进肌原纤维蛋白的交联和聚集^[20]。这与本研究中 SH 含量及绝对 Zeta 电位上升一致。

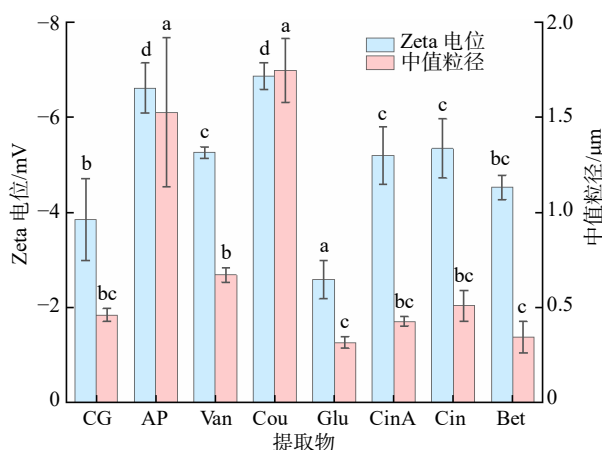


图 8 经香辛料提取物处理的 MP 的 Zeta 电位与中值粒径

2.7 肌原纤维蛋白羰基和游离巯基含量变化分析

羰基的形成是蛋白质发生氧化的一项最显著的变化,较高的羰基含量表明蛋白质氧化程度较高,因为羰基的形成会导致 MP 的交联和碎裂^[35]。敏感氨基酸残基的 ε-NH₂ 基团可以通过脱氨反应诱导的蛋白质氧化转化为羰基化合物^[36]。添加香辛料提取物后 MP 的羰基含量显著降低(图 9),对羰基的抑制效果为 Cin (0.43 μmol/g)>Van (0.78

$\mu\text{mol/g}$) > Glu ($2.14 \mu\text{mol/g}$) > Cou ($2.65 \mu\text{mol/g}$) > AP ($2.79 \mu\text{mol/g}$) > Bet ($2.89 \mu\text{mol/g}$) > CinA ($2.99 \mu\text{mol/g}$), 说明香辛料提取物可能与 MP 结合, 进而抑制氨基酸侧链羰基化及交联。

巯基总含量经常用作蛋白质氧化的标志物^[37]。添加香辛料提取物后, MP 的 SH 含量得到显著提升 (图 9), 对巯基减少的抑制效果为 Van ($231 \mu\text{mol/g}$) > Bet ($224 \mu\text{mol/g}$) > AP ($225 \mu\text{mol/g}$) > Cou ($210 \mu\text{mol/g}$) > CinA ($188 \mu\text{mol/g}$) > Cin ($181 \mu\text{mol/g}$) > Glu ($114 \mu\text{mol/g}$), 表明香辛料提取物的加入抑制了蛋白的氧化, 香辛料提取物具有抗氧化特性。MP 的无序二级结构改变后, 蛋白质表面内部的 SH 基团得以暴露, 进而使得 SH 含量有所增加^[38]。这与本研究中二级结构发生改变相一致。

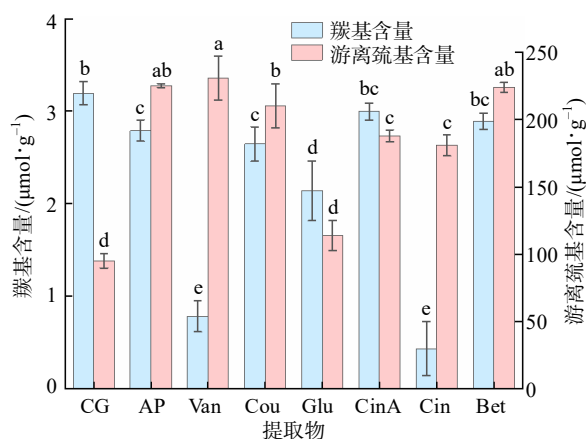


图9 经香辛料提取物处理的 MP 的羰基与游离巯基含量

2.8 肌原纤维蛋白 DPPH·以及·OH 清除率分析

高温条件极易诱导肉制品中 OH 自由基以及 DPPH 自由基的生成, 引起蛋白质氧化损伤, 导致蛋白质发生降解, 进而影响鸡腿品质。

由图 10 可知, 香辛料提取物加入后, 各组混合液 OH 自由基以及 DPPH 自由基清除能力大多呈现显著升高的变化, DPPH 自由基清除率中 Bet (78.53%) > Cin (75.5%) > CinA (70.23%) > AP (65.63%) > Cou (62.23%) > Van (60.8%) > CG (51.7%) > Glu (51.2%), OH 自由基清除率中 AP (87.34%) > Bet (85.1%) > Cin (81.57%) > Glu (80.13%) > CinA (76.6%) > Van (74.07%) > Cou (71.2%) > CG (67.63%), 说明香辛料提取物具有抗氧化功效, 其中 Cin 组和 Bet 组 OH 自由基以及 DPPH 自由基清除能力提高最多。有研究表明, 向

肌原纤维蛋白中添加肉桂醛, 对 DPPH 自由基的清除作用随着添加量的增大而提高, 当添加量达到 400 mg/L 时, 清除率达到 63.52% ^[39]。Bet 对自由基清除率的提高可能是由于其分子结构含活性基团酚羟基和亚氨基, 可直接向自由基提供电子或氢原子, 中和其氧化性。

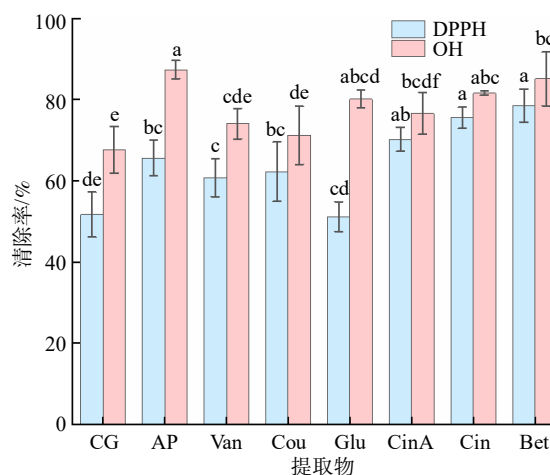
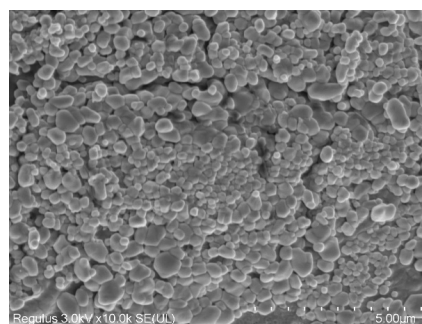


图10 经香辛料提取物处理的 MP 的 DPPD 与羟自由基清除率

2.9 肌原纤维蛋白的微观结构分析

SEM 分析可用于可视化 MP 微观结构, SEM 图像如图 11 所示。未经处理的 MP 显示出相对均匀的分布。加入香辛料提取物后, MP 的微观结构表现出更松散的外观, 在香辛料提取物-MP 复合物中观察到蛋白质聚集, 表明香辛料提取物的加入会改变 MP 的微观结构, 导致形成大颗粒和不规则形状。氢键的加强导致分子间聚集, 这反过来又导致 MP 粒径的增加和粒径分布不均匀^[40], 同时, MP 的部分膨胀也使颗粒增大。这种现象表明香辛料提取物显著破坏了 MP 凝胶内蛋白质的交联, 形成了具有更多孔网络的更松散的网状结构, 孔径的增大会减少蛋白质分子之间的连接。



(a) 对照组

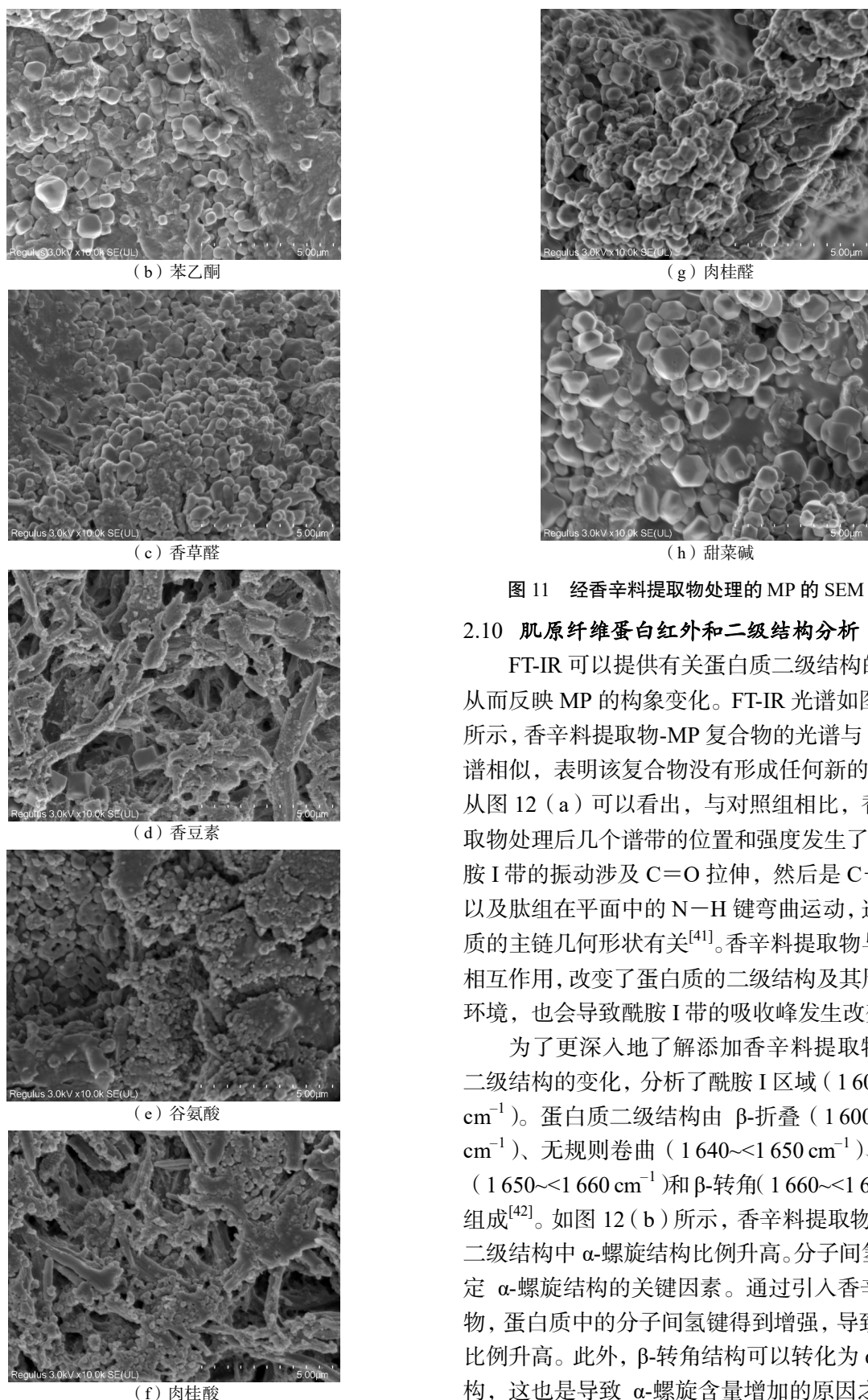


图 11 经香辛料提取物处理的 MP 的 SEM 图像

2.10 肌原纤维蛋白红外和二级结构分析

FT-IR 可以提供有关蛋白质二级结构的信息,从而反映 MP 的构象变化。FT-IR 光谱如图 12 (a) 所示,香辛料提取物-MP 复合物的光谱与 MP 的光谱相似,表明该复合物没有形成任何新的共价键。从图 12 (a) 可以看出,与对照组相比,香辛料提取物处理后几个谱带的位置和强度发生了变化。酰胺 I 带的振动涉及 C=O 拉伸,然后是 C-N 拉伸以及肽组在平面中的 N-H 键弯曲运动,这与蛋白质的主链几何形状有关^[41]。香辛料提取物与蛋白质相互作用,改变了蛋白质的二级结构及其周围的微环境,也会导致酰胺 I 带的吸收峰发生改变。

为了更深入地了解添加香辛料提取物后 MP 二级结构的变化,分析了酰胺 I 区域 ($1600\sim 1700\text{ cm}^{-1}$)。蛋白质二级结构由 β -折叠 ($1600\sim 1640\text{ cm}^{-1}$)、无规则卷曲 ($1640\sim 1650\text{ cm}^{-1}$)、 α -螺旋 ($1650\sim 1660\text{ cm}^{-1}$) 和 β -转角 ($1660\sim 1690\text{ cm}^{-1}$) 组成^[42]。如图 12 (b) 所示,香辛料提取物加入后,二级结构中 α -螺旋结构比例升高。分子间氢键是稳定 α -螺旋结构的关键因素。通过引入香辛料提取物,蛋白质中的分子间氢键得到增强,导致 α -螺旋比例升高。此外, β -转角结构可以转化为 α -螺旋结构,这也是导致 α -螺旋含量增加的原因之一^[31]。

其中 Glu 组 α -螺旋增多的原因可能在于, Glu 是螺旋倾向性高的氨基酸, 其侧链构象和疏水性有利于螺旋形成。

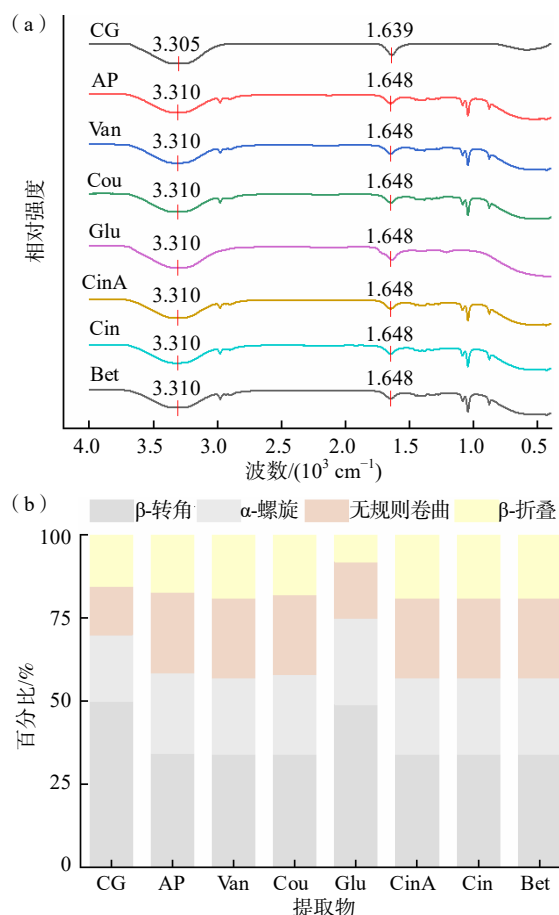
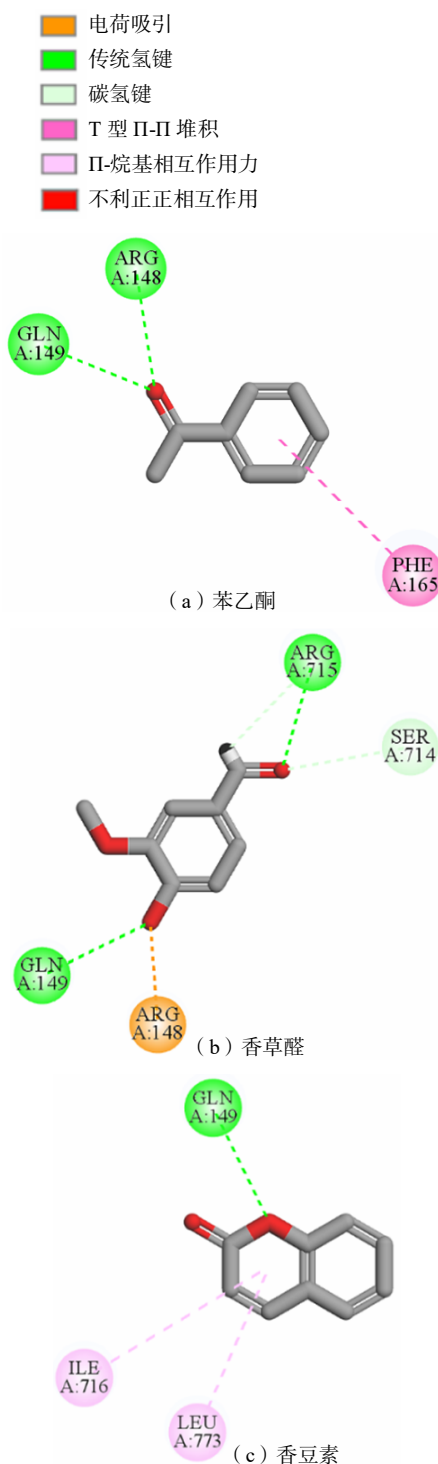


图 12 经香辛料提取物处理的 MP 的 FT-IR 光谱与二级结构

2.11 香辛料提取物与肌球蛋白的分子对接分析

肌球蛋白约占哺乳动物 MP 的 55%~60%^[43]。因此, 肌球蛋白可以用作同源建模中的受体^[44]。为了进一步探索肌球蛋白与香辛料提取物之间的结合模式和位点, 使用 Discovery Studio 2019 软件的 CDOCKER 方案运行分子对接 (图 13)。根据对接结果, 有 3 个 (ARG148、GLN149、PHE165), 4 个 (ARG715、SER714、GLN149、ARG148), 3 个 (ILE716、GLN149、LEU773), 4 个 (GLN149、SER714、ARG715、AGR148), 6 个 (ASN161、LYS147、GLN149、PHE165、ILE716、ARG148), 2 个 (LYS765、ILE716) 和 3 个 (LYS147、GLN149、ARG148) 氨基酸残基, 分别参与肌球蛋白与苯乙酮、香草醛、香豆素、谷氨酸、肉桂酸、肉桂醛和

甜菜碱的结合, 配体和不同数量氨基酸残基的结合可能导致受体-配体复合体的稳定性发生变化, 不同配体-受体的结合能也不相同, 见表 5。所得到的配体-受体的相互作用通过非共价结合发生, 主要包括静电引力、碳氢键、氢键和 π -烷基等相互作用力。



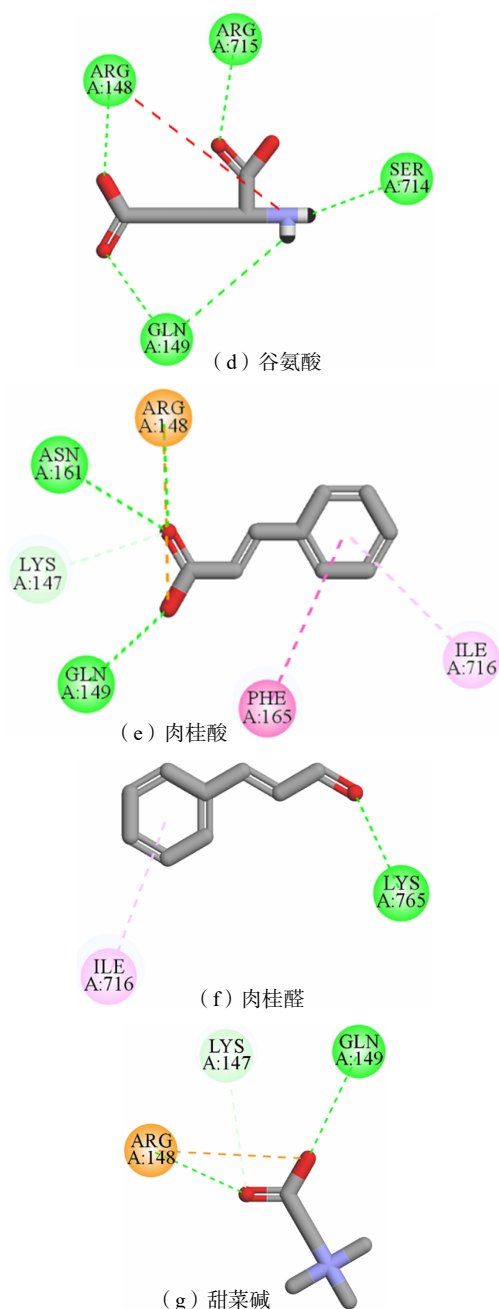


图 13 模型与香辛料提取物之间 2D 相互作用示意

表 5 不同肌球蛋白-香辛料提取物分子对接后的结合能

香辛料提取物	结合能/(kJ·mol ⁻¹)
AP	-83.39
Van	-104.54
Cou	-80.69
Glu	-127.48
CinA	-118.48
Cin	-91.86
Bet	-117.01

3 结论

本研究通过单因素实验结合响应面法,成功优化并确定香辛料酱卤鸡腿的最佳加工工艺参数:卤煮时间为 63 min,卤煮温度为 91 ℃,物料比为 5%。酱卤鸡腿的嫩度和风味品质与 MP 的结构特征及氧化程度密切相关。为进一步揭示香辛料对酱卤鸡腿品质的调控机制,本研究系统测定了 7 种香辛料提取物对 MP 抗氧化特性及功能结构特性的影响。结果显示,这 7 种香辛料提取物均能显著改变 MP 的理化与结构特性:在结构层面,可调节 MP 的黏度、红外光谱吸收强度及二级结构组成;在功能与氧化特性层面,能显著提升 MP 的乳化稳定性及游离巯基含量,同时显著降低 MP 的羰基含量与表面疏水性;此外,对 MP 的自由基清除能力、Zeta 电位及粒径分布也产生了显著影响。为深入解析香辛料提取物与 MP 的作用机制,进一步采用分子对接技术进行探究,发现不同香辛料提取物与 MP 之间的相互作用力类型及结合能存在显著差异。综上,本研究证实香辛料提取物与 MP 的氧化状态及功能结构特性之间存在明确关联,且能通过调控 MP 特性影响酱卤鸡腿品质,为后续优化酱卤禽肉制品加工工艺、提升产品品质提供了重要的理论依据与新思路。

参考文献:

- [1] 杨金霞. 蜂胶提取物-壳聚糖涂层复合明胶涂层对酱卤鸡腿冷藏期间综合保鲜效果的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [2] 陈洪生, 孔保华, 刁静静, 等. 氧化引起的肌肉蛋白质功能性变化及其控制技术的研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(11):215-220.
- [3] KANATT S R, CHAWLA S P, SHARMA A. Antioxidant and radio-protective activities of lemon grass and star anise extracts[J]. Food bioscience, 2014, 6:24-30.
- [4] ESTÉVEZ M, LUNA C. Dietary protein oxidation: a silent threat to human health?[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2017, 57(17):3781-3793.
- [5] 刘艳凤, 陈佳丽, 王可, 等. 香辛料对酱卤鸡腿品质影响的研究[J]. 食品科技, 2019, 44(8):104-108.
- [6] HAN P, AN N, YANG L, et al. Molecular dynamics simulation of the interactions between sesamol and myosin combined with spectroscopy and molecular docking studies[J]. Food hydrocolloids, 2022, 131:

- 107801.
- [7] SUN X X, YU Y M, SALEH A S M, et al. Understanding interactions among flavor compounds from spices and myofibrillar proteins by multi-spectroscopy and molecular docking simulation[J]. International journal of biological macromolecules, 2023, 229:188-198.
- [8] CAO Y G, AI N S, TRUE A D, et al. Effects of (-)-epigallocatechin-3-gallate incorporation on the physicochemical and oxidative stability of myofibrillar protein-soybean oil emulsions[J]. Food chemistry, 2018, 245:439-445.
- [9] 贾娜, 王乐田, 马露, 等. 香辛料提取物对猪肉肌原纤维蛋白功能性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(2):82-88.
- [10] YU Y M, SALEH A S M, SUN X X, et al. Exploring the interaction between myofibrillar proteins and pyrazine compounds: based on molecular docking, molecular dynamics simulation, and multi-spectroscopy techniques [J]. International journal of biological macromolecules, 2023, 253:126844.
- [11] CHEN L, LI C Y, ULLAH N, et al. Different physicochemical, structural and digestibility characteristics of myofibrillar protein from PSE and normal pork before and after oxidation[J]. Meat science, 2016, 121:228-237.
- [12] 徐红, 余志宝, 张若宇, 等. 乳制品乳化性及疏基含量检测方法研究[J]. 饮料工业, 2025, 28(2):41-46.
- [13] 赵鹤鹏, 许秋达, 常丹, 等. 香菇多糖中半乳糖醛酸的含量测定及抗氧化活性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(2):100-104.
- [14] CHENG Y Q, YU Y J, WANG C, et al. Inhibitory effect of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) molasses extract on the formation of heterocyclic amines in deep-fried chicken wings[J]. Food control, 2021, 119:107490.
- [15] LUO J, MUHAMMAD NASIRU M, YAN W J, et al. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on the structure and binding capacity of aroma compounds of myofibrillar proteins from dry-cured bacon [J]. LWT, 2020, 117:108606.
- [16] 谢美娟, 何向丽, 李可, 等. 卤煮时间对酱卤鸡腿品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21):26-30.
- [17] SHAO J J, ZOU Y F, XU X L, et al. Effects of NaCl on water characteristics of heat-induced gels made from chicken breast proteins treated by isoelectric solubilization/precipitation[J]. CyTA – journal of food, 2016, 14(1):145-153.
- [18] 张昕, 高天, 宋蕾, 等. 低温解冻相对湿度对鸡胸肉品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(20):241-246.
- [19] SONG X Z, ZHOU C J, FU F, et al. Effect of high-pressure homogenization on particle size and film properties of soy protein isolate[J]. Industrial crops and products, 2013, 43:538-544.
- [20] 孙祥祥. 道口烧鸡挥发性风味物质形成及调香机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.
- [21] LIU R, ZHAO S M, XIONG S B, et al. Rheological properties of fish actomyosin and pork actomyosin solutions[J]. Journal of food engineering, 2008, 85(2): 173-179.
- [22] 代欣欣, 吕懿超, 殷小钰, 等. 适度氧化的肌原纤维蛋白与醛类化合物相互作用及机制[J]. 食品科学, 2023, 44(18):1-8.
- [23] LEE J, XIONG Y L, CHOI M J. Effect of micro- and nano-sized emulsion fillers combined with trans-cinnamaldehyde on the physicochemical and rheological characteristics of myofibrillar protein gels[J]. Food hydrocolloids, 2023, 143:108865.
- [24] CAO M M, ZHANG X C, ZHU Y Q, et al. Enhancing the physicochemical performance of myofibrillar gels using Pickering emulsion fillers: rheology, microstructure and stability[J]. Food hydrocolloids, 2022, 128:107606.
- [25] 缪雨雁, 曹燕, 立静芝, 等. 不同黏度多糖阿拉伯胶和瓜尔胶对肌原纤维蛋白乳化性质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(6):57-64.
- [26] SHI Y, LI R Y, TU Z C, et al. Effect of γ -irradiation on the physicochemical properties and structure of fish myofibrillar proteins[J]. Radiation physics and chemistry, 2015, 109:70-72.
- [27] GUO A Q, JIANG J, TRUE A D, et al. Myofibrillar protein cross-linking and gelling behavior modified by structurally relevant phenolic compounds[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2021, 69(4):1308-1317.
- [28] WANG L, XU Y, ZHOU S M, et al. Interaction between *Vaccinium bracteatum* Thunb. leaf pigment and rice proteins[J]. Food chemistry, 2016, 194:272-278.
- [29] JONGBERG S, TØRNGREN M A, GUNVIG A, et al. Effect of green tea or rosemary extract on protein oxidation in Bologna type sausages prepared from oxidatively stressed pork[J]. Meat science, 2013, 93(3): 538-546.
- [30] LIU Q, LU Y, HAN J C, et al. Structure-modification by moderate oxidation in hydroxyl radical-generating systems promote the emulsifying properties of soy protein isolate[J]. Food structure, 2015, 6:21-28.
- [31] HUANG X, SUN L, LIU L, et al. Study on the mechanism of mulberry polyphenols inhibiting oxidation of beef

- myofibrillar protein[J]. Food chemistry, 2022, 372:131241.
- [32] ZHANG Z Y, YANG Y L, TANG X Z, et al. Effects of ionic strength on chemical forces and functional properties of heat-induced myofibrillar protein gel[J]. Food science and technology research, 2015, 21(4):597-605.
- [33] CAO Y G, XIONG Y L. Chlorogenic acid-mediated gel formation of oxidatively stressed myofibrillar protein[J]. Food chemistry, 2015, 180:235-243.
- [34] PROMEYRAT A, GATELLIER P, LEBRET B, et al. Evaluation of protein aggregation in cooked meat[J]. Food chemistry, 2010, 121(2):412-417.
- [35] ZHU W H, GUO H F, HAN M L, et al. Evaluating the effects of nanoparticles combined ultrasonic-microwave thawing on water holding capacity, oxidation, and protein conformation in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantles [J]. Food chemistry, 2023, 402:134250.
- [36] LIN R R, YUAN H F, WANG C R, et al. Study on the flavor compounds of Fo Tiao Qiang under different thawing methods based on GC-IMS and electronic tongue technology[J]. Foods, 2022, 11(9):1330.
- [37] ZHANG Y L, LIU G S, XIE Q W, et al. Physicochemical and structural changes of myofibrillar proteins in muscle foods during thawing: occurrence, consequences, evidence, and implications[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2023, 22(4):3444-3477.
- [38] HAN Z, CAI M J, CHENG J H, et al. Effects of constant power microwave on the adsorption behaviour of myofibril protein to aldehyde flavour compounds[J]. Food chemistry, 2021, 336:127728.
- [39] 张慧芸, 孔保华, 孙旭. 香辛料提取物抗氧化活性及其作用模式的研究[J]. 食品科学, 2010, 31(5):111-115.
- [40] WANG K, LI Y, ZHANG Y M, et al. Improving physico-chemical properties of myofibrillar proteins from wooden breast of broiler by diverse glycation strategies[J]. Food chemistry, 2022, 382:132328.
- [41] HAN Z Y, ZHANG J L, ZHENG J Y, et al. The study of protein conformation and hydration characteristics of meat batters at various phase transition temperatures combined with low-field nuclear magnetic resonance and Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Food chemistry, 2019, 280:263-269.
- [42] LI J, DAI Z C, CHEN Z H, et al. Improved gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from frozen shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by high-intensity ultrasound[J]. Food hydrocolloids, 2023, 135:108188.
- [43] LIU H, WEI X R, NIE R T, et al. Molecular docking simulation combining with multi-spectroscopy techniques clarify how small molecule ligands bind to biomacromolecule: myosin and aldehydes as a case study[J]. LWT, 2022, 155:112977.
- [44] WANG H T, ZHU J M, ZHANG H W, et al. Understanding interactions among aldehyde compounds and porcine myofibrillar proteins by spectroscopy and molecular dynamics simulations[J]. Journal of molecular liquids, 2022, 349:118190.
- (责任编辑 韩超)