DOI:10.12441/spyswjs.20251223002 [文章编号] 1673-1689(2026)08-0055-12

辣木叶粉对鸡肉糜凝胶品质特性的影响

李春兰[1,2*] 陈旭彤[1] 欧嘉颖[1] 黎俏灵[1,2] 王标诗[1,2] 胡小军[1,2]

(1. 岭南师范学院食品科学与工程学院,广东 湛江 524048; 2. 广东省辣木资源开发与利用工程技术研究中心,广东 湛江 524048)

摘要:【目的】探究辣木(*Moringa oleifera*, *M. oleifera*)叶粉对鸡肉糜凝胶品质特性的影响。**【方法】**将质量分数0.3%、0.6%、0.9%、1.2%的辣木叶粉添加至鸡肉糜中,探究辣木叶粉对鸡肉糜凝胶的pH、色泽、蒸煮得率、水分流失率、持水力、质构特性、DPPH自由基和$ABTS^+$自由基的清除率、水分分布和状态、微观结构、蛋白质二级结构以及感官评价的影响。**【结果】**添加质量分数0.3%~0.9%辣木叶粉可使鸡肉糜凝胶的蒸煮得率、持水力、b^*值、质构特性和感官品质明显提升,L^*值和a^*值明显下降。适当添加辣木叶粉可诱导鸡肉糜凝胶中蛋白质二级结构相互转变,使α螺旋、β折叠和无规卷曲占比增加,β转角占比降低,并有效促进鸡肉糜凝胶形成更加均匀紧密的三维网络结构,缩短不易流动水的弛豫时间(T_{22}),提高蛋白质与水结合的能力。此外,辣木叶粉显著增强了鸡肉糜凝胶的抗氧化活性,当质量分数为0.9%时,其对DPPH自由基、$ABTS^+$自由基的清除率分别达到94.33%和89.95%。**【结论】**辣木叶粉可有效改善鸡肉糜的凝胶品质特性和抗氧化性,该研究结果可为鸡肉糜的加工品质提升提供理论依据,并为辣木叶粉的开发利用提供参考。

关键词:辣木叶粉;鸡肉糜凝胶;二级结构;微观结构;水分分布

Effects of *Moringa oleifera* Leaf Powder on the Quality Characteristics of Minced Chicken Gel

LI Chunlan[1,2*] *CHEN Xutong*[1] *OU Jiaying*[1] *LI Qiaoling*[1,2] *WANG Biaoshi*[1,2] *HU Xiaojun*[1,2]

(1. College of Food Science and Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China; 2. Engineering and Technology Research Center of Development and Utilization of *Moringa oleifera* in Guangdong Province, Zhanjiang 524048, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the effects of *Moringa oleifera* (*M. oleifera*) leaf powder on the quality characteristics of minced chicken gel. [**Method**] *M. oleifera* leaf powder was added to minced chicken at mass fractions of 0.3%, 0.6%, 0.9%, and 1.2%. The effects of *M. oleifera* leaf powder on the pH, color, cooking yield, water loss rate, water-holding capacity, textural properties, DPPH free radical and $ABTS^+$ free radical scavenging rates, water distribution and state, microstructure, protein secondary structure, and sensory quality of minced chicken gel were determined. [**Result**] Adding *M. oleifera* leaf powder at mass fractions of 0.3%~0.9% increased the cooking yield, water-holding capacity, b^* value, textural properties, and sensory quality of minced chicken gel, while decreasing L^* and a^* values. The appropriate addition of *M. oleifera* leaf powder induced interconversion among protein secondary structure elements, increasing the proportions of α helixes, β sheets, and random coils and decreasing the proportion of β turns. In addition, it effectively promoted the formation of a more uniform and compact three-dimensional network structure, shortened the relaxation time (T_{22}) of immobilized water, and enhanced the water-binding capacity of proteins. Furthermore, *M. oleifera* leaf powder

基金项目:广东省科技创新战略专项资金("大专项+任务清单")项目(2022A05035)。

通信作者:李春兰(1995—),女,硕士,助理实验师,主要从事肉品加工及贮藏研究。E-mail:13414858022@163.com

收稿日期:2025-12-23 **修回日期:**2026-02-16

significantly enhanced the antioxidant activity of minced chicken gel. Minced chicken gel added with *M. oleifera* leaf powder at a mass fraction of 0.9% showed the DPPH free radical and $ABTS^+$ free radical scavenging rates of 94.33% and 89.95%, respectively. [**Conclusion**] *M. oleifera* leaf powder effectively improved the gel properties and antioxidant activity of minced chicken gel. These findings provide a theoretical basis for improving the processing quality of minced chicken and a reference for the development and utilization of *M. oleifera* leaves.

Keywords: *Moringa oleifera* leaf powder; minced chicken gel; secondary structure; microstructure; water distribution

鸡肉及其凝胶制品凭借高蛋白质、低脂肪、低胆固醇的营养特点，在消费市场与食品工业中占有重要地位。鸡肉蛋白质经热诱导凝胶化后，可形成具备弹性与咀嚼性的三维网络结构，在此过程中，变性的蛋白质分子发生重排与交联，最终构建出稳定的凝胶体系[1]。凝胶网络的稳定性决定了蛋白质凝胶产品的品质和功能特性[2]。然而，鸡肉蛋白质在加工中常面临凝胶性能不佳的问题，导致产品在产量、质地和口感上难以满足工业生产和消费者需求。为改善这一现状，添加功能性成分（如膳食纤维[3]、植物蛋白[4]、亲水胶体[5]和生物活性肽[6]等）已成为解决肉制品的凝胶性能和口感等问题的有效策略。

辣木作为一种原产于印度和非洲的多年生乔木，因其丰富的营养价值与生物活性被誉为“奇迹树”或“生命之树”，现广泛分布于我国广东、云南等地[7]。辣木叶是一种新资源食品[8]，辣木叶粉中含有质量分数 22.42%~34.40% 蛋白质、3.81%~4.04% 脂肪、47.25%~56.60% 碳水化合物、281~808 mg/kg 钙、5.18~14.10 mg/kg 铁、0.65~1.22 mg/kg 锌等[9]，且其还富含酚类、类胡萝卜素、生物碱、黄酮类和抗坏血酸等天然生物活性化合物，展现出抗氧化、抗菌、抗高血压、抗糖尿病、抗癌等生物活性[7]。目前，有关辣木叶的研究多聚焦于其作为家禽饲料添加剂对家禽健康的影响，直接应用于食品体系，尤其是改善蛋白质凝胶特性的研究仍较少。

近年来，随着对新资源食品研究的深入，辣木叶在食品加工中的应用潜力逐渐受到关注。Akter 等[10]报道，添加质量分数 1% 和 2% 的辣木叶粉可有效降低腌制罗非鱼的 pH、游离脂肪酸含量和总挥发性盐基总氮含量，并能减少需氧菌和嗜冷菌数量，且添加质量分数 1% 辣木叶粉的罗非鱼的感官品质优于添加质量分数 2% 的处理组。Bordim 等[11]将辣木叶、蜂胶和葡萄渣的乙醇提取物作为天然有色抗氧化剂，用于改善鸡肉糜的色泽和延长保藏期。此外，雍金叶等[12]将质量分数 0.1%、0.3%、0.6%、0.9% 的辣木叶膳食纤维用于改善鲢鱼糜凝胶性能，结果显示，添加质量分数 0.1%~0.6% 的辣木叶膳食纤维可显著改善鲢鱼糜的凝胶强度、持水力与质构特性；添加质量分数 0.6% 的辣木叶膳食纤维可增强鲢鱼糜凝胶分子间疏水作用，使鲢鱼糜凝胶形成有序致密的网状结构，进一步提高鲢鱼糜凝胶的持水力、硬度与凝胶强度。这些研究初步证明辣木叶在改善食品凝胶性能及品质方面具有潜力，但有关辣木叶粉对鸡肉糜凝胶性能与品质的影响研究较少。

基于此，作者探究了添加不同质量分数的辣木叶粉对鸡肉糜凝胶的 pH、色泽、蒸煮得率、水分流失率、持水力、质构特性、抗氧化活性（DPPH 自由基和 $ABTS^+$ 自由基清除率）、微观结构、水分分布和状态、蛋白质二级结构及感官评价的综合影响，旨在探讨辣木叶粉对鸡肉糜凝胶品质特性的影响及潜在机理，为辣木叶的高值化利用提供策略，也为开发具有高营养价值的肉制品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鸡胸肉：正大食品有限公司；食用盐：广东省广盐集团股份有限公司；辣木叶粉：初级农产品，原料为辣木叶，经干燥、破碎后过 100 目筛，对应粒径约为 150 μm；1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（1，1-diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH）和 2，2’-联氮-双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二铵盐（2，2’-azino-bis（3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid）diammonium salt，ABTS）：分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；无水乙醇：分析纯，西陇科学股份有限公司；二水合磷酸二氢钠、十二水合磷酸氢二钠、氢氧化钠、过硫酸钾、戊二醛：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高速匀浆机：IKAT18型，德国艾卡有限公司；台式高速冷冻离心机：TGL16M型，盐城市凯特实验仪器有限公司；全自动色差计：SC-80C型，北京康光仪器有限公司；食品质构仪：TMS-PRO型，美国Food Technology公司；雷磁pH计：PHS-3C型，上海精科实业有限公司；可见分光光度计：V-5000型，上海元析仪器有限公司；冷场发射扫描电子显微镜：JSM7610F型，日本电子株式会社；傅里叶变换红外光谱仪：Nicolet 6700型，美国赛默飞世尔科技公司；低场核磁共振仪：NMI20型，上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

将适量冰冻鸡胸肉于室温解冻，剔除脂肪和结缔组织后切片称质量，分别加入质量分数2%的食盐和质量分数10%的冰水，经绞肉机斩拌（低速20 s，高速100 s）制成鸡肉糜。随后，分别添加质量分数0、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%（以鸡肉质量计）的辣木叶粉，经低速斩拌混匀后获得辣木鸡肉糜，分别记为对照组、MP0.3组、MP0.6组、MP0.9组和MP1.2组。最后，取约35 g鸡肉糜进行离心（4 ℃，300 *g*，3 min），85 ℃水浴加热20 min，冷却后于−4 ℃保存，过夜备用。

1.3.2 pH的测定

称取6 g鸡肉糜凝胶，加入54 mL蒸馏水，均质后用pH计测定上清液pH。

1.3.3 色泽的测定

参照胡小军等[13]的方法测定样品色泽，记录样品的亮度值（L^*值）、红度值（a^*值）和黄度值（b^*值）。

1.3.4 蒸煮得率、水分流失率的测定

参照童佳鑫等[14]的方法并稍加修改。从冰箱取出鸡肉糜凝胶置于室温，打开离心管盖，使离心管中的鸡肉糜凝胶汁水自然流干，盖上盖子称质量，记为m_2，从离心管取出鸡肉糜凝胶，用滤纸吸干其表面的水分，直接称质量，记为m_3。蒸煮得率和水分流失率分别按式（1）~（2）计算。

$$C=\frac{m_3}{m_1-m_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

C——蒸煮得率，%；

m_0——离心管的质量，g；

m_1——煮制前离心管和鸡肉糜的总质量，g；

m_3——煮制后鸡肉糜凝胶的质量，g。

$$L=\frac{m_1-m_2}{m_1-m_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

L——水分流失率，%；

m_0——离心管的质量，g；

m_1——煮制前离心管和鸡肉糜的总质量，g；

m_2——煮制后离心管和鸡肉糜凝胶的总质量，g。

1.3.5 持水力的测定

参照王恒鹏等[15]的方法并进行修改。称取约5 g鸡肉糜凝胶，称质量并记为m_4，切成颗粒均匀的小丁，用3层滤纸包好放入离心管，4 ℃、5 000 *g*条件下离心15 min，取出鸡肉糜凝胶后称质量，记为m_5，按式（3）计算持水力。

$$H=\frac{m_5}{m_4}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

H——持水力，%；

m_4——离心前鸡肉糜凝胶的质量，g；

m_5——离心后鸡肉糜凝胶的质量，g。

1.3.6 质构特性的测定

参照胡小军等[13]的方法并稍加修改。将鸡肉糜凝胶切成15 mm高的圆柱体，用TPA模式测定样品的硬度、黏附性、弹性、内聚性、胶黏性和咀嚼性。测定参数：探头P15，触发力1.5 N，形变量40%，速度60 mm/min，间隔时间10 s，每个样品至少测定3个平行。

1.3.7 DPPH自由基清除率的测定

参照李春兰[16]的方法并稍加修改。称取30 g鸡肉糜凝胶，切碎后置于烧杯中，加入90 mL无水乙醇充分混合，5 000 r/min均质2 min，所得匀浆于6 000 r/min离心10 min，收集上清液即得到样品液。配制50 μg/mL的DPPH-乙醇溶液，充分溶解，现配现用。将2 mL无水乙醇和4 mL DPPH-乙醇溶液、2 mL样品液和4 mL DPPH-乙醇溶液、2 mL样品液和4 mL无水乙醇溶液分别充分混合，避光反应30 min，于517 nm测定吸光度，按式（4）计算DPPH自由基清除率。

$$D=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100\% \quad (4)$$

式中：

D——DPPH自由基清除率，%；

A_0——2 mL无水乙醇和4 mL DPPH-乙醇溶液的吸光度；

A_1——2 mL样品液和4 mL DPPH-乙醇溶液的吸光度；

A_2——2 mL样品液和4 mL无水乙醇溶液的吸光度。

1.3.8 $ABTS^+$自由基清除率的测定

按照1.3.7的方法制备样品液，参照李春兰[16]的方法测定辣木鸡肉糜凝胶对$ABTS^+$自由基的清除能力。

1.3.9 微观结构观察

参照Zhou等[17]方法并稍加修改。采用冷场发射扫描电子显微镜对样品的微观结构进行观察，将样品切成立方体（3 mm×3 mm×3 mm），用体积分数2.5%戊二醛溶液固定样品24 h，然后用磷酸盐缓冲溶液（0.1 mol/L，pH 7.3）洗涤，室温静置2 h，依次采用质量分数50%、70%、80%、90%、100%的乙醇溶液对样品进行梯度脱水（12 min/次，共2次）。将样品真空冷冻干燥24 h，然后进行喷金、观察和拍摄。

1.3.10 水分分布及状态的测定

根据Zhang等[18]的方法并稍加修改，来测定鸡肉糜凝胶的T_2弛豫时间。称取2.0 g样品于15 mm核磁管中，并插入脉冲NMR分析仪的NMR探针中。测试参数为：质子共振频率22 MHz，重复采样等待时间3.0 s，半回波时间150 μs，回波个数5 000，重复扫描16次，90°脉冲宽度14 μs，180°脉冲宽度28 μs。

1.3.11 蛋白质二级结构测定

参照冯洁等[19]的方法并稍加修改，采用傅里叶变换红外光谱测定蛋白质二级结构。将鸡肉糜凝胶真空冷冻干燥48 h，冻干样品与溴化钾混合并均匀研磨，压成薄片。在4 000~400 cm^{-1}范围内进行扫描，使用峰值拟合软件并结合高斯拟合算法分析蛋白质的二级结构。

1.3.12 感官评价

参照李安华等[20]的方法，选15名经过培训的在校学生作为评定小组成员，从色泽、风味、组织结构、口感、多汁性等方面对样品进行感官评价，评分标准见表1。小组评定成员评分结果的平均值即为辣木鸡肉糜凝胶的各项指标得分。

1.4 数据分析

采用SPSS 2020软件进行One-way ANOVA检验，$P<0.05$代表差异显著。使用Origin 2021软件作图，使用Peakfit 4处理红外光谱数据。所有试验指标均重复测定3次，结果以平均值±标准差表示。

表1 辣木叶粉鸡肉糜凝胶的感官评价标准

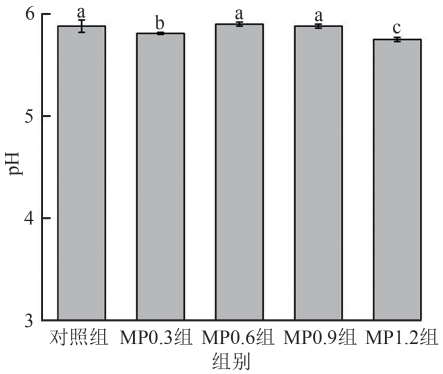
Table 1 Sensory scoring criteria of minced chicken gel added with *M. oleifera* leaf powder

指标	评分标准	得分/分
色泽	色泽均匀，带有辣木叶粉的浅绿色或鸡肉本身颜色	16~20
	色泽较均匀，颜色稍深或稍浅	11~15
	其他杂色，色泽不均匀	0~10
风味	清香柔和，有鸡肉固有滋味和适当辣木风味，咸淡适中，无异味	16~25
	肉味正常，香气一般，辣木风味较淡或较浓，无异味	8~15
	无鸡肉味，无鸡肉清香，有异味	0~7
组织结构	富有弹性，切面紧密，气泡细小均匀	16~25
	弹性一般，切面较均匀，略有较大气泡	8~15
	弹性差，切面粗糙，有大气泡	0~7
口感	爽口，嫩滑，细腻，软硬适中	10~15
	质地稍硬或略软烂，较细腻	5~9
	过硬或过软，有渣，无韧度	0~4
多汁性	鲜美多汁	10~15
	较干，汁液少	5~9
	过干，无汁液	0~4

2 结果与讨论

2.1 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶pH的影响

pH对评估肉制品品质具有重要作用。如图1所示，相比于对照组的pH（5.94），MP0.3组的pH显著降低至5.81；MP0.6组和MP0.9组的pH增加，但与对照组相比差异不显著；MP1.2组的pH显著降低至5.71。辣木叶粉的添加对鸡肉糜凝胶pH的影响呈现非单调性变化，这可能是由于辣木叶粉中含有水溶性有机酸、酚类物质、碱性矿物质和氨基酸等[9,21]。Isra等[21]研究发现，在鱼丸中添加辣木叶粉，鱼丸的pH从6.54增加至6.61，鱼丸中精氨酸、组氨酸和赖氨酸含量随着辣木叶粉添加量的增加呈先增加后减少的趋势，而天冬氨酸含量则呈先增加后减少再增加的趋势。Akter等[10]研究表明，添加质量分数1%和2%的辣木叶粉会降低腌制罗非鱼的pH，这可能归因于辣木叶中的酚类物质及微生物发酵产酸作用。因此，当辣木叶粉质量分数较低时，有机酸和酚类物质的溶出可能导致鸡肉糜凝胶pH下降；随着辣木叶粉质量分数的增加，辣木叶粉中溶出的碱性矿物质和氨基酸与鸡肉糜凝胶自身的蛋白质缓冲体系的共同作用，使得pH小幅回升；当辣木叶粉质量分数增加至1.2%时，较多酸性物质的溶出使得pH降低。Bordim等[11]研究表明，在鸡肉糜中添加质量分数0.5%辣木叶的乙醇提取物，鸡肉糜在14 d内的pH均低于对照组。结果表明，辣木叶粉的添加会影响鸡肉糜凝胶的pH。



图中不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

图1 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶pH的影响

Fig. 1 Effect of *M. oleifera* leaf powder on pH of minced chicken gel

2.2 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶色泽的影响

色泽是决定食品可接受性的重要因素。由表2和图2可知，辣木叶粉的添加使鸡肉糜凝胶的L^*值和a^*值均显著降低（P<0.05），除MP0.3组外，其他处理组的b^*值显著升高（P<0.05），表明添加辣木叶粉使鸡肉糜凝胶的亮度降低，绿色和黄色加深，这与辣木叶粉本身呈深绿色相关（辣木叶粉的L^*值为52.9±0.40，a^*值为−2.3±0.03，b^*值为23.2±0.26。Nuryahyani等[22]研究表明，在星斑鱼鱼丸中添加质量分数5%~15%的新鲜和蒸制辣木叶，鱼丸的L^*值从68.54降至52.44，a^*值从2.97降至1.65，b^*值从15.05升至17.33。Das等[3]报道，在山羊肉中添加质量分数1.0%、3.0%的未成熟辣木荚粉，羊肉的L^*值和a^*值降低，b^*值增加。因此，辣木叶粉的添加可使鸡肉糜凝胶呈现出辣木叶粉特有的色泽。

表2 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶色泽的影响

Table 2 Effect of *M. oleifera* leaf powder on color of minced chicken gel

组别	L^*值	a^*值	b^*值
对照组	55.83±2.31^{a}	−2.13±0.58^{a}	17.72±0.79^{d}
MP0.3组	48.25±0.12^{b}	−3.56±0.23^{b}	18.15±0.15^{d}
MP0.6组	45.36±0.03^{c}	−4.50±0.60^{bc}	20.78±0.09^{c}
MP0.9组	43.84±0.17^{cd}	−4.85±0.72^{c}	22.19±0.31^{b}
MP1.2组	42.38±0.17^{d}	−4.98±0.56^{c}	23.44±0.15^{a}

注：同列不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

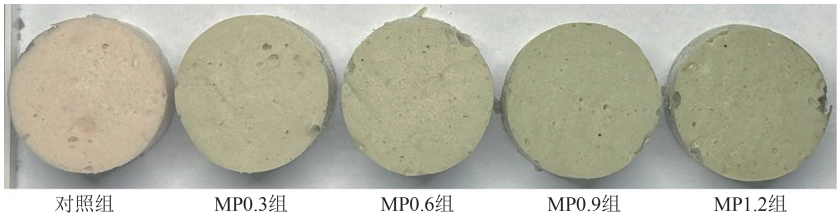
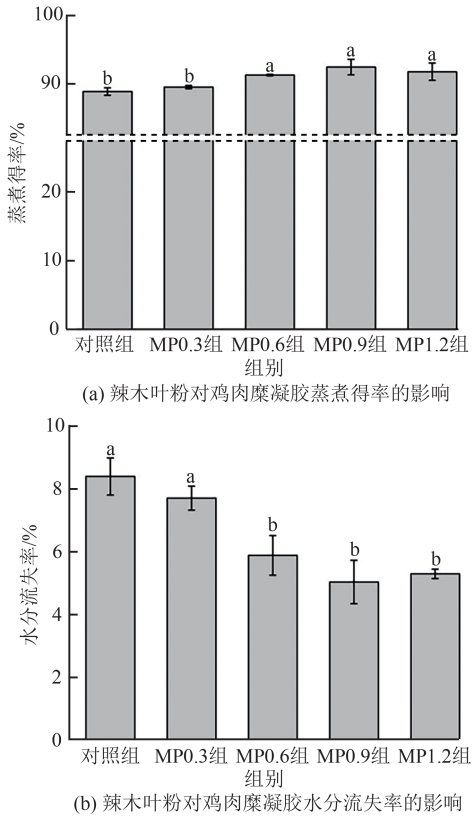


图2 不同组别鸡肉糜凝胶的样品图

Fig. 2 Images of minced chicken gel samples from different groups

2.3 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶蒸煮得率、水分流失率的影响

蒸煮得率、水分流失率是影响凝胶品质的重要因素。如图3所示，随着辣木叶粉质量分数的增加，蒸煮得率呈现先升高后降低的趋势，从88.82%升高至92.40%后降低至91.71%，在辣木叶粉质量分数为0.9%时达到最大值。而水分流失率则呈相反趋势（先降低后升高），从8.39%降低至5.03%后升至5.29%，在辣木叶粉质量分数为0.9%时达到最小值。在肉类中添加膳食纤维等成分可以提高蒸煮得率并减少烹饪过程中的水分流失。辣木叶粉的主要成分是多糖、多酚等活性物质，具有较多活性反应位点。在烹饪过程中，这些活性物质可能通过多种途径改善鸡肉糜凝胶的保水性：一是与蛋白质发生相互作用，或改变蛋白质与蛋白质之间的相互作用；二是其自身水合能力强；三是其在凝胶网络中发挥填充或镶嵌作用。Das等[3]研究表明，在山羊肉中添加质量分数1.5%~3.0%辣木荚粉，山羊肉的蒸煮得率从92.02%提高至95.28%。Zhao等[23]研究表明，添加质量分数0.75%~1.75%的洋车前子壳粉可改善午餐肉的网络结构，使午餐肉的蒸煮损失率从9.21%降低至4.21%，乳化稳定性从5.78%降至4.21%。结果表明，辣木叶粉的添加可提高鸡肉糜凝胶的蒸煮得率并降低水分流失率。



(a) 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶蒸煮得率的影响

(b) 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶水分流失率的影响

图中不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

图3 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶蒸煮得率和水分流失率的影响

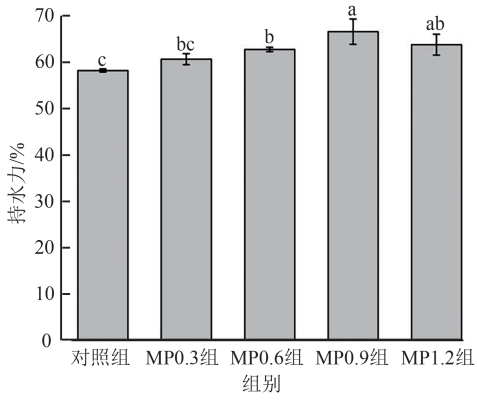
Fig. 3 Effects of *M. oleifera* leaf powder on cooking yield and water loss rate of minced chicken gel

2.4 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶持水力的影响

持水力是衡量鸡肉糜凝胶嫩度与口感的关键指标。由图4可知，添加辣木叶粉的鸡肉糜凝胶持水力均高于对照组，且随辣木叶粉质量分数的增加呈先升高后下降的趋势。鸡肉糜凝胶持水力在辣木叶粉质量分数为0.9%时达到峰值，且MP1.2组与MP0.9组无显著差异。结果表明，适量添加辣木叶粉可显著提升鸡肉糜凝胶持水力，这可能是因为辣木叶粉富含多糖、多酚等活性物质，其大量极性基团可增强蛋白质-水及蛋白质间的相互作用，促进鸡肉糜形成稳定复合物与致密凝胶网络。此外，辣木叶粉具有良好的吸水性，可作为填充剂减少凝胶内部空隙，从而更好地束缚水分子。雍金叶等[12]研究表明，在鲢鱼糜凝胶中添加适量的辣木膳食纤维能提高持水力。Nuryahyani等[22]发现，在星斑鱼中添加质量分数5%~15%的新鲜和蒸制辣木叶，可使样品的持水力从72.44%分别提升至97.67%和106.29%。

2.5 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶质构特性的影响

质构测试是评估肉制品质构特性的传统方法[23]。由表3可知，与对照组相比，鸡肉糜凝胶的硬度、咀嚼性及胶黏性随辣木叶粉质量分数的



图中不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

图4 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶持水力的影响

Fig. 4 Effect of *M. oleifera* leaf powder on water-holding capacity of minced chicken gel

增加呈先升高后降低的趋势，在辣木叶粉质量分数为0.9%时达到峰值；辣木叶粉对鸡肉糜凝胶的弹性无显著影响，且对黏附性的影响无明显规律。内聚性可反映蛋白质分子交联形成凝胶的品质与功能，MP0.3组、MP0.6组、MP0.9组的内聚性无显著差异，但均高于对照组，而MP1.2组的内聚性与对照组相比显著下降。这可能是因为适量添加辣木叶粉可促进蛋白质间的相互作用，促进鸡肉糜形成致密的凝胶网络结构；而过量添加则会干扰蛋白质间的相互作用，导致凝胶网络不均一、致密度下降，进而降低鸡肉糜凝胶的整体质构特性。雍金叶等[12]研究表明，适量添加辣木膳食纤维可使鱼糜凝胶的硬度增强，而过量添加可能会造成鱼糜凝胶质地劣化。因此，适量添加辣木叶粉，可明显改善鸡肉糜凝胶的质构特性。

表3　辣木叶粉对鸡肉糜凝胶质构特性的影响

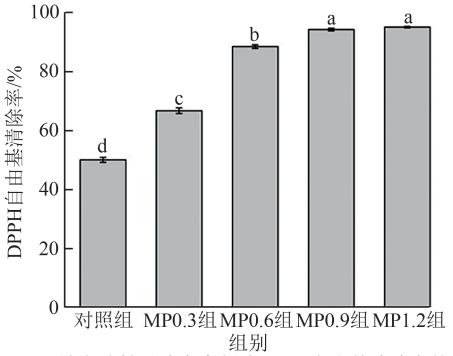
Table 3　Effects of *M. oleifera* leaf powder on texture properties of minced chicken gel

组别	硬度/N	黏附性	内聚性	弹性/%	胶黏性	咀嚼性/N
对照组	55.63±2.65^{c}	0.14±0.10^{c}	0.58±0.02^{b}	5.51±0.38^{a}	32.43±2.04^{c}	178.61±16.30^{c}
MP0.3组	59.23±2.42^{bc}	0.09±0.01^{c}	0.61±0.01^{a}	5.46±0.33^{a}	35.93±1.17^{b}	195.98±7.13^{b}
MP0.6组	61.83±1.97^{b}	0.11±0.00^{c}	0.60±0.01^{ab}	5.36±0.17^{a}	36.93±1.07^{b}	198.13±1.69^{b}
MP0.9组	68.03±2.16^{a}	0.28±0.09^{b}	0.61±0.02^{a}	5.43±0.11^{a}	41.17±0.78^{a}	223.68±8.44^{a}
MP1.2组	66.53±1.12^{a}	0.41±0.06^{a}	0.56±0.01^{c}	5.41±0.12^{a}	37.13±0.90^{b}	200.86±2.54^{b}

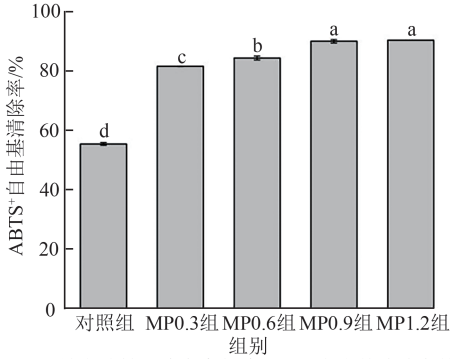
注：同列不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

2.6　辣木叶粉对鸡肉糜凝胶DPPH自由基、ABTS^{+}自由基清除能力的影响

如图5所示，随辣木叶粉质量分数的增加，鸡肉糜凝胶DPPH自由基清除率由50.12%显著提升至95.16%，但MP0.9组（94.33%）与MP1.2组（95.16%）无显著差异，MP0.3组、MP0.6组、MP0.9组、MP1.2组较对照组分别提升了33.22%、76.70%、88.21%、89.86%。鸡肉糜凝胶ABTS^{+}自由基清除率呈相似的变化趋势，由55.43%显著提升至90.31%，MP0.9组（89.95%）与MP1.2组无显著差异，MP0.3组、MP0.6组、MP0.9组、MP1.2组较对照组分别提升了47.07%、52.12%、62.28%、62.93%。结果表明，辣木叶粉可有效提高鸡肉糜凝胶的DPPH自由基、ABTS^{+}自由基清除能力，这一作用可能与辣木叶中富含的酚类、糖苷、生物碱、类黄酮、单宁、皂苷等天然生物活性成分有关，上述物质均具有良好的抗氧化活性[24]。聂卉等[25]研究表明，在全麦馒头中添加质量分数3‰的辣木叶粉，其DPPH自由基清除率可从2.17%提升到23.6%。Ibrahim等[26]研究发现，辣木叶及其提取物均能有效清除DPPH自由基，可以延缓肉类的变质并延长保藏期。Sánchez-Ortiz等[27]发现，辣木叶含表儿茶素、芦丁和二羟基苯甲酸等活性物质，在燕麦面包中添加辣木叶可显著提高DPPH自由基和ABTS^{+}自由基清除能力，这些研究结果与本研究类似。综上，辣木叶粉能提高鸡肉糜凝胶DPPH自由基和ABTS^{+}自由基清除率，使鸡肉糜凝胶表现出较好的抗氧化活性。



(a) 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶DPPH自由基清除率的影响



(b) 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶ABTS^{+}自由基清除率的影响

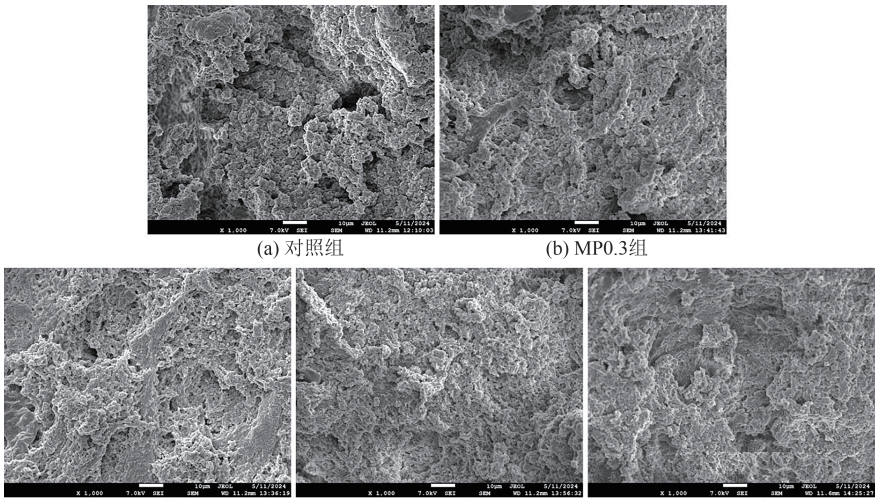
图中不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

图5　辣木叶粉对鸡肉糜凝胶DPPH自由基、ABTS^{+}自由基清除率的影响

Fig. 5　Effects of *M. oleifera* leaf powder on the DPPH free radical and ABTS^{+} free radical scavenging rates of minced chicken gel

2.7 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶微观结构的影响

通过扫描电子显微镜分析辣木叶粉对鸡肉糜凝胶微观结构的影响。如图 6 所示，对照组表面呈粗糙、凹凸、疏松状，存在多个不规则、大小不均匀的“水通道”或气孔。肌原纤维蛋白受热变性导致吸附的水分渗出，使肉糜凝胶中形成大量“水通道”。Zhuang 等[28]研究表明，“水通道”的存在或形成可能会阻碍蛋白质聚合并导致凝胶网络断裂，这也与对照组较低的蒸煮得率、持水力和较高水分流失率的结果一致。适量（0.3%~0.9%）添加辣木叶粉后，鸡肉糜凝胶的粗糙度降低、连续性增加、孔径变小、孔洞数量减少。这可能是由于辣木叶粉可以充当活性填料或共聚物，占据蛋白质凝胶基质网络中的空隙，从而降低凝胶肉制品的孔隙率。MP0.3 组、MP0.6 组和 MP0.9 组的粗糙度、孔径和数量得到显著改善，MP0.9 组的凝胶网络结构尤其致密，几乎无孔洞，这可能是因为辣木叶粉本身含有多酚、多糖等物质，其与蛋白质发生相互作用增加了凝胶网络的交联，减少了“水通道”的形成。而过量添加辣木叶粉（质量分数 1.2%）可能会阻碍凝胶网络的交联，导致体系内部结构被破坏，变得相对疏松和多孔[29]。有研究表明，适量添加再生纤维素，其与水的相互作用可导致“水通道”减少，且再生纤维素表面丰富的羟基与蛋白质分子/水分子的羟基形成氢键，能有效稳定水分子，并与周围的水分子发生自旋能量交换，导致凝胶网络结构更致密；而过量添加再生纤维素会导致颗粒聚集，阻止凝胶网络的交联，使结构相对疏松和多孔[30]。



(a) 对照组 (b) MP0.3组 (c) MP0.6组 (d) MP0.9组 (e) MP1.2组

图 6 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶微观结构的影响

Fig. 6 Effect of *M. oleifera* leaf powder on the microstructure of minced chicken gel

2.8 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶水分分布和状态的影响

加热和胶凝过程中，肉糜凝胶中的水分分布及状态对肉糜的品质和产量至关重要。如图 7 所示，鸡肉糜凝胶有 3 类峰，分别为：弛豫时间为 T_{21}（0.1~1.0 ms）的特征峰，对应水分状态为结合水；弛豫时间为 T_{22}（1~10 ms）的特征峰，对应水分状态为不易流动水；弛豫时间为 T_{23}（10~1 000 ms）的特征峰，对应水分状态为自由水[31]。弛豫时间反映各种状态下水的结合程度与受限程度。如表 4 所示，与对照组相比，当辣木叶粉质量分数从 0.3% 增加至 0.9% 时，鸡肉糜凝胶的 T_{22} 逐渐缩短，说明蛋白质凝胶结构对不易流动水的束缚增强，凝胶结构

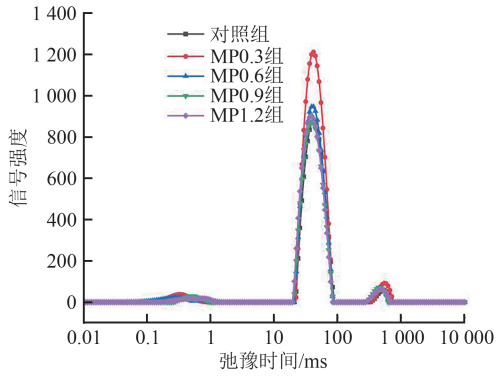


图 7 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶水分分布的影响

Fig. 7 Effect of *M. oleifera* leaf powder on the water distribution of minced chicken gel

更紧密。这可能是因为辣木叶粉与蛋白质的相互作用使鸡肉糜内部孔隙变小，从而导致凝胶过程中与水和脂肪分子相关质子的迁移受到限制，这与热诱导下鸡肉糜凝胶的持水力和凝胶强度增强有关[31]，且与本研究中的鸡肉糜凝胶持水力和硬度变化的结果一致。此外，从微观结构图中也可看出，添加辣木叶粉后，蛋白质凝胶结构更致密，孔洞变少，孔径更小。

当弛豫时间分别为T_{21}、T_{22}、T_{23}时，其对应特征峰的峰面积占总峰面积的百分比分别为P_{21}、P_{22}、P_{23}。由表4可知，与对照组相比，处理组的P_{21}由（2.97±0.45）%显著提升至（3.17±0.06）%，说明辣木叶粉可提升鸡肉糜凝胶结合水的保留量。所有组别的P_{22}均>85%，表明不易流动水为鸡肉糜凝胶的主要水分状态。与对照组相比，处理组的P_{22}均下降，而P_{23}均上升，推测辣木叶粉原有结合水在加热过程中流失，部分不易流动水转变为自由水。这说明辣木叶粉-蛋白质基质的持水力主要与凝胶形成能力相关，而非吸水能力。Zhao等[32]发现，鸡肉糜经凝乳糖处理后也表现出类似的情况。综上所述，弛豫时间的分布及比例的变化表明，辣木叶粉能降低凝胶中水分的流动性，增强凝胶的束缚水结构与持水能力。

表4　辣木叶粉对鸡肉糜凝胶水分分布和状态的影响

Table 4　Effects of *M. oleifera* leaf powder on the water distribution and state of minced chicken gel

组别	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms	P_{21}/%	P_{22}/%	P_{23}/%
对照组	0.41±0.03^{b}	40.58±1.60^{a}	517.37±20.97^{a}	2.17±0.60^{b}	94.40±0.69^{a}	3.40±0.44^{b}
MP0.3组	0.35±0.09^{b}	40.58±1.61^{a}	554.57±22.48^{a}	2.97±0.45^{a}	93.03±0.75^{b}	4.00±0.30^{ab}
MP0.6组	0.45±0.05^{b}	38.72±0.00^{ab}	460.84±18.25^{bc}	3.00±0.20^{a}	93.03±0.21^{b}	3.93±0.06^{ab}
MP0.9组	0.38±0.05^{b}	36.99±1.50^{b}	440.47±30.56^{c}	3.17±0.06^{a}	92.20±0.40^{b}	4.67±0.42^{a}
MP1.2组	1.07±0.18^{a}	37.85±1.50^{b}	506.08±35.11^{ab}	2.90±0.10^{a}	92.60±0.80^{b}	4.53±0.70^{a}

注：同列不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

2.9　辣木叶粉对鸡肉糜凝胶二级结构的影响

通过傅里叶变换红外光谱评估辣木叶粉对鸡肉糜凝胶二级结构的影响。如表5所示，与对照组相比，α螺旋、β折叠和无规卷曲占比随着辣木叶粉质量分数增加呈先增加后减少，β转角占比先减少后增加，这意味着辣木叶粉的添加改变了这4种蛋白质二级结构的占比。α螺旋通过羰基氧和酰胺氢之间的分子内氢键保持其有序结构；β折叠结构通常通过肽链之间的氢键来维持稳定；β转角由4个连续的氨基酸残基组成，主要作用是改变多肽链的方向；无规卷曲是典型的柔性和开放结构[33]。β转角结构减少、无规卷曲结构增加，表明辣木叶粉可使肽链方向改变，蛋白质结构更柔性开放，暴露更多活性位点，促使α螺旋与β折叠相关氢键断裂重组，形成更多α螺旋和β折叠结构[33-34]。Xu等[35]在鸡肉中加入八角不溶性膳食纤维，发现α螺旋和β折叠含量的增加可以有效促进肉类蛋白质凝胶形成稳定的三维网络结构，进而减少蒸煮损失，增强鸡肉糜凝胶的结构稳定性。潘腾[36]研究表明，β折叠有利于暴露氨基酸侧链功能基团，增强分子间相互作用力，使蛋白质有序聚集，从而提高凝胶的持水力。此外，α螺旋、β折叠占比的变化与蒸煮得率、硬度、持水力等呈相同趋势，与水分流失率呈相反趋势。结果表明，辣木叶粉的添加可以有效促进鸡肉糜凝胶形成稳定的三维网络结构，进而减少蒸煮损失，提高持水力，增强鸡肉糜凝胶的结构稳定性。

表5　辣木叶粉对鸡肉糜凝胶二级结构的影响

Table 5　Effect of *M. oleifera* leaf powder on the secondary structure of minced chicken gel

组别	α螺旋占比/%	β折叠占比/%	β转角占比/%	无规卷曲占比/%
对照组	16.08±0.79^{b}	26.24±0.04^{c}	42.06±1.12^{a}	15.62±0.43^{a}
MP0.3组	17.20±1.50^{ab}	31.51±0.50^{b}	34.78±3.40^{b}	16.51±1.50^{a}
MP0.6组	18.26±1.08^{a}	32.47±0.10^{a}	31.65±3.70^{b}	17.64±2.52^{a}
MP0.9组	18.74±0.84^{a}	32.55±0.52^{a}	30.41±3.33^{b}	18.30±2.01^{a}
MP1.2组	17.68±0.16^{ab}	32.29±0.23^{a}	33.47±0.45^{b}	16.88±0.69^{a}

注：同列不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

2.10　辣木叶粉对鸡肉糜凝胶感官品质的影响

辣木叶富含多酚、类胡萝卜素、类黄酮及其

他生物活性化合物，这些化合物可赋予食物良好的味道和香气[8]。由图 8 可知，添加辣木叶粉能够提升鸡肉糜凝胶的风味和组织结构得分。此外，在口感方面，MP0.3 组得分最高，和对照组得分一致。在色泽方面，MP0.9 组、MP1.2 组和对照组得分最高，可能是因为辣木叶粉赋予鸡肉糜凝胶的深绿色更受人喜爱。然而，鸡肉糜凝胶的多汁性得分随辣木叶粉质量分数的增加而降低。这可能是因为辣木叶粉的填充和刚性凝胶网络的形成，阻碍了咀嚼过程中汁液的瞬间释放；同时辣木叶粉本身的粗糙度也可能在触觉层面削弱湿润感，最终导致多汁性得分降低。Evivie 等[37]发现，在大豆肉丸中添加质量分数 2% 或更多的辣木叶粉降低了感官评价小组成员的接受度，而添加质量分数 1% 的辣木叶粉与对照组样品具有相同的接受度。结果表明，适量添加辣木叶粉能改善鸡肉糜凝胶的整体感官品质。

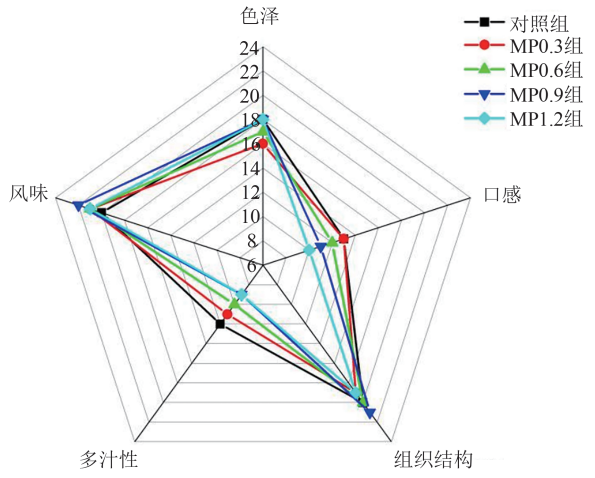


图 8 辣木叶粉对鸡肉糜凝胶感官品质的影响

Fig. 8 Effect of *M. oleifera* leaf powder on the sensory quality of minced chicken gel

3 结论

评估了辣木叶粉对鸡肉糜凝胶品质特性的影响，揭示其作用机理。研究表明，适量添加辣木叶粉可有效优化鸡肉糜凝胶的品质与抗氧化性能，过量添加则会产生负面影响。辣木叶粉主要通过多维度调控鸡肉糜的凝胶形成过程、实现品质提升，其核心机制如下：一是调控蛋白质二级结构，辣木叶粉可诱导鸡肉糜凝胶蛋白质构象发生改变，通过调节蛋白质二级结构占比，为凝胶三维网络的稳定形成奠定了结构基础；二是调控水分状态，通过缩短弛豫时间 T_{22}、降低水分流动性，增强凝胶的持水能力，减少水分流失；三是优化凝胶网络结构，通过改善凝胶网络的连续性与致密性，减少网络孔洞数量及减小孔径，强化凝胶网络结构的稳定性。从应用价值来看，适量添加辣木叶粉可显著提升鸡肉糜凝胶综合品质与抗氧化能力，添加最佳质量分数为 0.9%，质量分数过高会降低产品品质与接受度，因此需合理控制添加范围。本研究为辣木的特色资源高值化利用开辟了可行路径，可助力农产品精深加工，提高资源利用率与产品附加值。

参 考 文 献

[1] Han K Y，Li S S，Yang Y L，et al. Mechanisms of inulin addition affecting the properties of chicken myofibrillar protein gel [J]. Food Hydrocolloids，2022，131：107843.

[2] Zheng C M，Cai N，Huang C C，et al. Evaluation of amidated pectin as fat substitutes for minced chicken breast：physicochemical properties and edible quality[J]. Food Research International，2023，173（Pt 2）：113371.

[3] Das A，Biswas S，Nanda P K，et al. *Moringa* pod derived antioxidant dietary fibre as a quality enhancer in goat meat nuggets[J]. Sustainable Food Technology，2024，2（1）：232-242.

[4] Nie Y Q，Xiong Y L，Jiang J. Texture，microstructure，and *in vitro* digestion of hybrid meat gel-type sausages formulated with functionalized pea protein [J]. Food Hydrocolloids，2025，167：111422.

[5] Geng L J，Liang J，Wang D，et al. Gel properties of chicken-*Squilla* low-fat mince gel with inulin：physicochemical properties，microstructure，intermolecular interactions，and formation mechanism [J]. Food Chemistry：X，2025，27：102347.

[6] Zou Y，Li L，Yang J，et al. Effect of ultrasound assisted collagen peptide of chicken cartilage on storage quality of chicken breast meat[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2022，89：106154.

[7] Azmi N，Akanno A，Jacobsen C，et al. *Moringa oleifera* as a multifunctional bioresource：nutritional，medicinal and its pickering emulsifying potential[J]. Food Hydrocolloids for Health，2025，8：100231.

[8] Yang M，Tao L，Kang X R，et al. *Moringa oleifera* Lam.

leaves as new raw food material: a review of its nutritional composition, functional properties, and comprehensive application[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023,138:399-416.

[9] Liang K H, Cao J, Wang J H, et al. A comprehensive review of *Moringa oleifera* leaves and seeds with a focus on their food-related aspects [J]. Journal of Food Composition and Analysis,2025,140:107247.

[10] Akter R, Nisa M S F, Dulal M A, et al. Enhancement of quality and storability of vacuum-packed refrigerated tilapia pickle using *Moringa* leaf powder [J]. Food Chemistry Advances,2025,6:100882.

[11] Bordim J, Marques C, Calegari M A, et al. Potential effect of naturally colored antioxidants from *Moringa oleifera*, propolis, and grape pomace: evaluation of color and shelf life of chicken paté [J]. Food Chemistry Advances,2023,3:100409.

[12] 雍金叶,邹钰萱,田洋,等. 辣木膳食纤维对鲢鱼糜凝胶性能的影响[J]. 食品科学,2024,45(20):74-81.
Yong J Y, Zou Y X, Tian Y, et al. Effect of *Moringa oleifera* dietary fiber on gel properties of silver carp surimi [J]. Food Science,2024,45(20):74-81.(in Chinese)

[13] 胡小军,李春兰,王标诗,等. 超高压处理对虾滑预制菜品质特性的影响[J]. 食品工业科技,2023,44(11):88-94.
Hu X J, Li C L, Wang B S, et al. Effect of ultra-high pressure on the quality properties of shrimp slips prepared dishes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023,44(11):88-94.(in Chinese)

[14] 童佳鑫,赵磊,夏杨毅,等. 静置时间对鸡肉糜凝胶性质的影响[J]. 食品工业科技,2024,45(11):72-78.
Tong J X, Zhao L, Xia Y Y, et al. Effect of resting time on gel properties of the chicken minced meat gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024,45(11):72-78.(in Chinese)

[15] 王恒鹏,王引兰,孟阳,等. 儿茶素共结晶微胶囊制备及其对热诱导鸡肉糜凝胶品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2024,50(22):302-309.
Wang H P, Wang Y L, Meng Y, et al. Fabrication of catechin co-crystallized microcapsules and their effect on gel qualities of heat-induced chicken batter[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(22): 302-309.(in Chinese)

[16] 李春兰. 食用菌替代部分背膘对猪肉糜凝胶品质特性及贮藏稳定性的影响[D]. 锦州:渤海大学,2022:54.

[17] Zhou L, Zhang J, Lorenzo J M, et al. Effects of ultrasound emulsification on the properties of pork myofibrillar protein-fat mixed gel[J]. Food Chemistry, 2021,345:128751.

[18] Zhang Z Y, Yang Y L, Tang X Z, et al. Chemical forces and water holding capacity study of heat-induced myofibrillar protein gel as affected by high pressure[J]. Food Chemistry,2015,188:111-118.

[19] 冯洁,费雨萱,周锦均,等. 真空低温烹饪对南美白对虾肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品科学,2025,46(20):268-276.
Feng J, Fei Y X, Zhou J J, et al. Effect of sous vide on the structure of myofibrillar protein from *Penaeus vannamei*[J]. Food Science,2025,46(20):268-276.(in Chinese)

[20] 李安华,周民生,曹新江. 藜麦鸡肉丸的加工工艺[J]. 肉类工业,2021(8):7-13.
Li A H, Zhou M S, Cao X J. Processing technology of quinoa chicken meatballs[J]. Meat Industry,2021(8):7-13.(in Chinese)

[21] Isra L, Ali M S, Salma U, et al. Physical, nutritional, and sensory characterization of pangas (*Pangasianodon hypophthalmus*) fish ball incorporated with *Moringa leaves* powder[J]. Food Chemistry Advances, 2024, 4: 100715.

[22] Nuryahyani R, Kristanti D, Ishartani D, et al. Nutritional and sensory properties of starry trigger (*Abalistes stellaris*) fish balls additional fresh and steamed *Moringa* (*Moringa oleifera*) leaves[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2022,995(1):012020.

[23] Zhao Z H, Sun N, Li C, et al. Application of psyllium husk powder addition on the textural properties, oxidative stability and sensory attributes of non-phosphates luncheon meat[J]. Meat Science,2025,222:109760.

[24] Chatepa L E C, Mwamatope B, Chikowe I, et al. Extraction of phytoconstituents and antioxidant properties from *Moringa oleifera* L. leaves and seeds from Malawi: a comparative study using deep eutectic and conventional solvents[J]. Food and Humanity,2025,4:100635.

[25] 聂卉,李晓静,杜笑. 辣木全粉对馒头品质的影响研究[J]. 中州大学学报,2021,38(4):117-120.
Nie H, Li X J, Du X. Study on the effects of *Moringa oleifera* powder on the quality of steamed bread [J].

Journal of Zhongzhou University，2021，38（4）：117-120.（in Chinese）

[26] Ibrahim E E M，Alqurashi R M，Alfaraj F Y. Antioxidant activity of *Moringa oleifera* and olive *Olea europaea* L. leaf powders and extracts on quality and oxidation stability of chicken burgers[J]. Antioxidants，2022，11（3）：496.

[27] Sánchez-Ortiz L K，Sánchez-Quezada V，Gaytán-Martínez M，et al. Influence in physicochemical，nutritional，and antioxidant properties by addition *Moringa oleifera* leaves in *Avena sativa* bread[J]. Food Chemistry，2024，460：140743.

[28] Zhuang X B，Wang L J，Jiang X P，et al. The effects of three polysaccharides on the gelation properties of myofibrillar protein：phase behaviour and moisture stability[J]. Meat Science，2020，170：108228.

[29] Hou Y，Liu H，Zhu D S，et al. Influence of soybean dietary fiber on the properties of konjac glucomannan/κ-carrageenan corn oil composite gel [J]. Food Hydrocolloids，2022，129：107602.

[30] Zuo D D，Chen Y，Li Y S，et al. Cellulose as filler particle affects the poroviscoelasticity behavior of meat gels：hydration properties and microstructure[J]. Food Hydrocolloids，2025，159：110620.

[31] Han M Y，Wang P，Xu X L，et al. Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with microstructural characteristics[J]. Food Research International，2014，62：1175-1182.

[32] Zhao X，Zhou C，Xu X L，et al. Ultrasound combined with carrageenan and curdlan addition improved the gelation properties of low-salt chicken meat paste[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，172：114230.

[33] Abu Bakar Siddique M，Maresca P，Pataro G，et al. Effect of pulsed light treatment on structural and functional properties of whey protein isolate[J]. Food Research International，2016，87：189-196.

[34] Liu H T，Zhang J N，Wang H，et al. High-intensity ultrasound improves the physical stability of myofibrillar protein emulsion at low ionic strength by destroying and suppressing myosin molecular assembly[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2021，74：105554.

[35] Xu Y，Yan H M，Xu W P，et al. The effect of water-insoluble dietary fiber from star anise on water retention of minced meat gels[J]. Food Research International，2022，157：111425.

[36] 潘腾. 猪肉肌球蛋白热诱导凝胶形成机制[D]. 北京：中国农业大学，2017：85-89.

[37] Evivie S E，Ebabhamiegbebho P A，Imaren J O，et al. Evaluating the organoleptic properties of soy meatballs（BEEF）with varying levels of *Moringa oleifera* leaves powder[J]. Journal of Applied Sciences and Environmental Management，2016，19（4）：649.