杨艳, 徐彬, 韩欧燕, 等. 真空低温卤制过程中鸭腿的肌原纤维蛋白结构变化机理研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 110−117. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040384
YANG Yan, XU Bin, HAN Ouyan, et al. Mechanism of Myofibrillar Protein Structural Changes in Duck Legs during Vacuum Low-temperature Braising[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 110−117. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040384

· 研究与探讨 ·

# 真空低温卤制过程中鸭腿的肌原纤维蛋白结构变化机理研究

杨　艳[1,2], 徐　彬[1,2], 韩欧燕[1,2], 魏思盈[1,2], 邹　航[1,2], 胥　伟[1,2,*],
郭丹郡[1,2,*], 朱玲娇[1,2], 易　阳[1,2], 侯温甫[1,2]
（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023;
2.湖北省农产品加工与转化重点实验室, 湖北武汉 430023）

**摘　要:** 本研究以鸭腿作为试验材料，通过组织结构观察、肌原纤维蛋白提取、微观结构测定、蛋白溶解度和肌原纤维小片化指数（MFI）测定等方法，分析真空低温卤制对鸭腿蛋白质结构的影响。结果显示，未卤制鸭腿组织横截面结构紧密、呈均匀团块状，而卤制 2 h 后细胞收缩、纤维间隙增大，肌节出现波浪状弯曲，M 线松散消失。卤制 0~2 h 过程中，肌原纤维蛋白表面疏水性显著增加（$P$<0.05），内源荧光最大发射波长（$\lambda_{max}$）红移至 351 nm，蛋白质溶解度显著下降 62.09%（$P$<0.05），MFI 显著升高（$P$<0.05），表明蛋白热变性程度增大，肉质变硬。卤制 2~8 h，蛋白溶解度先显著升高（$P$<0.05）后保持稳定，MFI 无显著变化（$P$>0.05），内源荧光 $\lambda_{max}$ 从 351 nm 蓝移至 349 nm，最大荧光强度（$FT_{max}$）提高 3.56%，且较大分子量的副肌球蛋白逐渐降解，二级结构中 $\beta$-折叠占比先增加后下降，$\beta$-转角则先降后升，这表明卤制后期蛋白变性程度降低，结构逐渐恢复致密，嫩度改善。综上所述，真空低温卤制技术能够显著提高鸭腿的嫩度和改善其质构特性，该研究为真空低温卤制技术在鸭腿加工中的应用提供了科学依据。

**关键词:** 真空低温卤制, 鸭腿, 肌原纤维蛋白, 微观结构, 机理
**中图分类号:** TS251.55　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0110−08
**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025040384
本文网刊:

# Mechanism of Myofibrillar Protein Structural Changes in Duck Legs during Vacuum Low-temperature Braising

**YANG Yan[1,2], XU Bin[1,2], HAN Ouyan[1,2], WEI Siying[1,2], ZOU Hang[1,2], XU Wei[1,2,*], GUO Danjun[1,2,*], ZHU Lingjiao[1,2], YI Yang[1,2], HOU Wenfu[1,2]**
（1.School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2.Hubei Province Key Laboratory of Agricultural Products Processing and Transformation, Wuhan 430023, China）

**Abstract:** This study utilized duck legs as experimental materials to analyze the effects of vacuum low-temperature braising on the protein structure of duck legs. The research methods included tissue structure observation, myofibrillar protein extraction, microstructure determination, protein solubility measurement, and myofibrillar fragmentation index (MFI) determination. The results showed that the cross-sectional structure of unbraised duck legs was tightly packed and uniform in clumps. After being braised for 2 h, the cells shrank, the fiber gaps widened, sarcomeres displayed wavy deformations, and the M-lines loosened and disappeared. During the 0~2 h of braising period, the hydrophobic characteristics of myofibrillar protein significantly increased ($P$<0.05), the maximum emission wavelength ($\lambda_{max}$) of intrinsic fluorescence red-shifted to

**收稿日期:** 2025−05−06
**基金项目:** 湖北省技术创新计划项目（2024BBB093）; 湖北省科技创新人才计划（2024DJC063）。
**作者简介:** 杨艳（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2457676570@qq.com。
*** 通信作者:** 胥伟（1985−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品蛋白质化学及应用, E-mail: xuwei1216@163.com。
郭丹郡（1993−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品组分与营养, E-mail: missguodj@163.com。

351 nm, protein solubility decreased significantly by 62.09% ($P$<0.05), and MFI increased significantly ($P$<0.05), indicating enhanced protein thermal denaturation and increased meat hardness. From 2 to 8 h of braising, protein solubility first increased significantly ($P$<0.05) and then remained stable, while MFI showed no significant changes ($P$>0.05). The $\lambda_{max}$ of intrinsic fluorescence blue-shifted from 351 nm to 349 nm, and the maximum fluorescence intensity ($FT_{max}$) increased by 3.56%. Meanwhile, larger molecular weight paramyosin gradually degraded. In the secondary structure, the proportion of $\beta$-fold initially increased and then decreased, whereas the $\beta$-turn proportion initially decreased and then increased, suggesting that protein denaturation decreased in the later stage, the structure became more compact, and tenderness improved. In conclusion, vacuum low-temperature braising technology can significantly improve the tenderness and texture of duck legs. This study provides scientific evidence for the application of vacuum low-temperature braising technology in duck legs processing.

**Key words**: vacuum low-temperature braising; duck legs; myofibrillar protein; microstructure; mechanism

鸭腿以其高蛋白、低脂肪的营养特性和独特风味深受消费者青睐[1]。在此基础上发展而来的酱卤鸭腿品类，2023 年市场规模已达 120 亿元，同比增长 7%，据预测该品类将保持年均 7% 的复合增长率，2025 年有望突破 145 亿元[2]。然而，传统高温短时卤制工艺存在明显缺陷：易导致蛋白质过度变性，使肉质硬化、口感下降，且造成营养成分流失[3]。为了解决这些问题，近年来，真空低温卤制技术因其独特优势受到关注[4]。该技术通过在真空环境下进行低温长时间卤制，可减少氧化反应，保持鸭肉色泽和风味；同时实现蛋白质适度变性，使肉质嫩化，最大程度保留营养成分[5]。与传统工艺相比，该技术通过精准控制时间参数优化肉质，有效降低有害物质生成，显著提升产品安全性和品质稳定性[6]。

在肉类加工中，肌原纤维蛋白（Myofibrillar Protein，MP）作为其中的关键结构蛋白，其变性程度直接影响肉质的嫩度、保水性和口感。研究表明，传统卤制工艺易导致肌原纤维蛋白过度变性，使蛋白质网络结构过度收缩，这是肉质硬化的主要原因[7−8]。真空低温卤制技术通过精确控制温度和时间，可有效调节肌原纤维蛋白变性程度，改善肉制品质构特性[9]。国外学者在肌原纤维蛋白研究领域取得重要进展，Tornberg 等[10] 通过热加工实验发现，适度蛋白质变性可提升肉类嫩度和保水性，但过度加热会引发蛋白聚集，导致品质劣变；Roldán 等[11] 研究发现，60 ℃/24 h 低温烹饪可减少肌原纤维蛋白过度收缩，维持肉质柔软度并降低蒸煮损失。Baldwin 等[12] 指出精确温控（55~65 ℃）可延缓肌原纤维蛋白剧烈变性，改善肉类嫩度和持水力。国内学者也开展了相关研究，陈美玉[13] 应用真空低温技术调控肌原纤维蛋白变性，改善牛肉质构和保水性；孙红霞等[14] 发现，60 ℃/12 h 条件下牛肉蛋白变性适度，保水性提高，肉质更嫩；李鹏等[15] 结合超声波技术优化真空低温卤制工艺，提升猪肉嫩度和风味均匀性。本团队前期研究发现，将真空低温卤制技术应用于酱卤鸭产品可以显著改善鸭腿的嫩度，降低其硬度、弹性和咀嚼性[16]。然而，针对鸭腿肌原纤维蛋白在真空低温卤制过程中的结构变化机理研究仍不足，需进一步探索其变性规律及对质构特性的影响机制，以优化鸭肉加工工艺并提升产品品质。

因此，本研究聚焦于真空低温卤制体系中鸭腿肌原纤维蛋白构效演变规律，通过系统研究不同卤制时间下的蛋白结构变化规律，旨在提高鸭腿嫩度和改善质构特性。研究成果将为开发智能化、精准化的新型加工技术提供科学依据，对提升禽肉制品附加值和市场竞争力具有重要意义。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

鸭腿　华英食品有限公司；香辛料　武汉舵落口香料批发市场；磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、氯化钠、氧化镁、溴酚蓝、三氯乙酸、EDTA-2Na、硼酸、溴化钾、苏木素染液、丙酮　国药集团化学试剂有限公司；盐酸、乙醇　武汉市红大化工厂；溴甲酚绿指示剂、伊红 Y 染液、甲基红指示剂、戊二醛固定液（纯度 2.5%）　武汉飞扬生物有限公司；柠檬酸铅、醋酸双氧铀、锇酸　Sigma 公司；以上试剂均为分析纯。

BCD-223WDPV 冰箱　青岛海尔股份有限公司；SV-113 真空烹饪机　德国宝有限公司；JY04S-3C 型凝胶成像系统　北京君意东方电泳设备有限公司；CP214 电子天平　上海奥豪斯（上海）仪器有限公司；F98 荧光分光光度计　上海棱光技术有限公司；CI 尼康生物显微镜　上海维翰光电科技有限公司；HRP-9082MBE 电热恒温箱　上海一恒公司；UV2000 型紫外可见分光光度计　尤尼柯（上海）仪器有限公司；HT7700 透射电子显微镜　天津市顺诺仪器科技有限公司；SNLGJ-12 真空冷冻干燥机　天津市顺诺仪器科技有限公司；PHSJ-4F pH 计　上海雷磁仪器有限公司；KQ3200DE 数控超声波清洗机　昆山市超声仪器有限公司；TGL-16G 离心机　上海安亭科学仪器厂；Nicolet IS5 傅里叶变换红外光谱仪（FT-IR）　赛默飞世尔科技有限公司；FW-3190 抽真空封口机　广州市新鲜世界电器有限公司；BX53 光学显微镜　日本 Olympus 公司。

### 1.2　实验方法

#### 1.2.1　样品的制备

1.2.1.1　鸭腿前处理　选择大小均一的鸭腿，首先将

冷冻鸭腿在室温下流动水解冻。解冻后,用流动水冲洗鸭腿,去除表面的油脂和血渍。接着,将食盐均匀涂抹在鸭腿表面进行腌制(鸭腿与盐的质量比为 50:1),保鲜膜密封,室温静置 2 h。将腌制好的鸭腿放入冷水中焯水至水开无浮沫产生为止,时间约 15~20 min。最后,用流动水清洗鸭腿表面的浮沫。

1.2.1.2 卤水制备 配方:清水 2 kg,桂皮 24 g,八角、干辣椒、花椒、草果各 20 g,小茴香、草寇、白蔻各 12 g,丁香、甘草、香叶各 4 g,胡椒、三奈、砂仁、白芷各 8 g,干(良)姜、陈皮各 40 g,冰糖 30 g,盐 64 g,老抽、油各 60 g,味精 12 g,料酒 70 g。将配方中的清水、香辛料及调料混合煮制 2 h,冷却后过滤得到卤水。

1.2.1.3 真空低温卤制 将鸭腿和卤水按 1:3.5(g/mL)的料液比装入真空包装袋中。使用真空密封机对包装袋进行抽真空处理,随后将包装袋放入已设定为 70 ℃、8 h 的真空烹饪机中,加热至目标温度后进行恒温卤制[17]。在卤制过程中,每隔 2 h 取出一次样品,分别标记为 T0、T2、T4、T6、T8,用于后续实验分析。

1.2.2 鸭腿肌原纤维蛋白提取 参考陈美玉[13]的方法提取肌原纤维蛋白:分别称取 1.2.1.3 中的样品 5 g,各加入 20 mL 磷酸盐缓冲液(0.02 mol/L,含 0.1 mol/L NaCl 和 0.001 mol/L EDTA-2Na,pH7.0)进行分散。在冰水浴中以 10000 r/min 剪切 30 s 后,以相同转速离心 10 min,去除上清液。重复上述清洗步骤 4 次,最后一次离心前混合液经双层纱布过滤后离心,沉淀经冷冻干燥得到肌原纤维蛋白粉末。

1.2.3 微观结构测定 根据 Li 等[18]的方法进行改良:取不同卤制时长的鸭腿样品,切成 20 mm×20 mm×5 mm 的样本块,依次进行组织固定、梯度脱水、石蜡渗透和包埋。将样本切成 5 μm 厚的切片,经苏木素-伊红染色后,置于光学显微镜下观察并采集图像。

1.2.4 超微结构测定 依据李超[19]的方法作适当改进:取不同卤制时长的鸭肉样品,切成 10 mm×10 mm×3 mm 的立方体,立即置于 4 ℃ 预冷的戊二醛固定液中固定 24 h,随后用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH7.0)漂洗 4 次(10 min/次)。接着在 1% 锇酸溶液中后固定 2 h,重复上述缓冲液冲洗程序。固定后的样品经梯度乙醇脱水后进行渗透、包埋和切片,切片用醋酸双氧铀 50% 乙醇饱和溶液和柠檬酸铅染色各 10 min,最后用透射电子显微镜观察并记录。

1.2.5 蛋白溶解度测定 蛋白浓度测定参考 Bradford[20]的方法进行优化:称取 5 g 不同卤制时间处理后的肌原纤维蛋白,溶于 200 mL 磷酸钠缓冲液(pH6.25,含 0.6 mol/L NaCl 和 0.05 mol/L $Na_2HPO_4$),配成 2.5 mg/mL 蛋白溶液。25 ℃ 条件下平衡 60 min 后,以 4000 r/min 离心 10 min,用紫外可见分光光度计在 595 nm 处测上清液吸光度,计算公式如下:

$$蛋白溶解度(\%)=\frac{离心后上清液蛋白浓度}{离心前蛋白浓度}\times 100$$

1.2.6 肌原纤维小片化指数测定 依据 Clausen 等[21]的方法稍加调整:称取 5 g 不同卤制时长处理的肌原纤维蛋白,溶于 50 mL 磷酸盐缓冲液(含 0.001 mol/L $MgCl_2$, 0.1 mol/L NaCl, 0.001 mol/L $NaN_3$, 0.02 mol/L $Na_2HPO_4$, pH7.0±0.1)。10000 r/min 离心 15 min,取上清液,重复 3 次后定容至 0.5 mg/mL。最后在 540 nm 处测吸光值($A_{540}$),计算公式为:

$$肌原纤维小片化指数 = A_{540}\times 200$$

1.2.7 聚丙烯酰胺凝胶电泳 参考胡吕霖等[22]的方法稍加调整:配制梯度凝胶系统(分离胶 12%,浓缩胶 5%),将消化液冻干后用生理盐水分散,将 1 mg/mL 蛋白溶液与缓冲液按 4:1 体积比混合,沸水浴处理 10 min。样品制备完成后,取 15 μL 处理液注入预制胶加样孔。电泳操作时,使用 Tricine-SDS 缓冲液进行电泳(60 V,30 min;120 V,40 min)。电泳完成,取出凝胶片,用考马斯亮蓝染色 15 min,再脱色。最终通过全自动凝胶成像分析系统完成蛋白条带的数字化存档[23]。

1.2.8 蛋白质二级结构测定 根据 Zhang 等[24]的方法做适当修改:精确称取肌原纤维蛋白冻干粉末(2 mg)和溴化钾(200 mg),在干燥环境中共混研磨并进行压片处理,将制备的薄片置于傅里叶变换红外光谱仪(400~4000 $cm^{-1}$)样品仓中进行全谱扫描,聚焦酰胺 I 带(1600~1700 $cm^{-1}$),经二阶导数转换及去卷积峰拟合后,根据峰位归属计算 $\alpha$-螺旋、$\beta$-折叠、$\beta$-转角和无规则卷曲的相对含量。

1.2.9 蛋白质表面疏水性测定 依据 Cao 等[25]的方法:将 10 mL 蛋白溶液(5 mg/mL)与 2 mL 溴酚蓝(BPB,1 mg/mL)混合,搅拌 10 min,离心 15 min 后取上清液稀释 10 倍,在 595 nm 处测吸光值(A)。空白对照($A_0$)为 10 mL 磷酸盐缓冲液(PBS,20 mmol/L,pH6.0)与 2 mL BPB(1 mg/mL)的混合液,用 PBS 调零。

$$溴酚蓝结合量(\mu g)=\frac{200\times(A-A_0)}{A_0}$$

1.2.10 内源荧光光谱测定 根据熊杰等[26]方法稍作修改:以磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L KCl,0.01 mol/mL $Na_2HPO_4$,pH7.0)作为空白液,将 1.2.2 中制得的肌原纤维蛋白粉末分别溶于磷酸盐缓冲液,配制为 1 mol/mL 蛋白溶液,使用荧光分光光度计在以下参数下扫描:激发波长 275 nm,发射光谱范围 300~500 nm,狭缝宽度 10 nm,扫描速度 1000 nm/min。通过最大发射波长位移方向及荧光强度变化,表征蛋白质三级构象变化。

### 1.3　数据处理

每组实验做三组平行，结果通过平均值±标准差的形式呈现，利用 SPSS 20.0、Origin Pro 2020 软件等对实验数据进行分析和处理。组间比较采用单因素方差分析，$P<0.05$ 认为差异具有统计学意义。

## 2　结果与分析

### 2.1　真空低温卤制过程中鸭腿的微观结构分析

2.1.1　真空低温卤制过程中鸭腿的横纵切组织结构的变化分析　图 1 是真空低温卤制过程中鸭腿的内部组织结构变化情况。观察横切组织结构可以发现，未卤制时（T0）的鸭腿横切组织结构为均匀、排列紧密的团块状，除白色结缔组织外看不到间隙。卤制 6~8 h（T6~T8），细胞间的间隙逐渐变大，白色结缔组织的条带随着卤制时间的增长变得模糊，以致出现不规则的网状结构。这与陈美玉[13] 在研究真空低温加热对牛肉的微观结构影响的结果相似。这种变化主要与鸭腿中的结构蛋白有关，结构蛋白在卤制过程中发生收缩，导致水分从肌肉中排出，而随着卤制时间的延长其变性程度逐渐增加，细胞外的间隙显著增大[10]。观察纵切组织结构可以发现，未卤制时（T0）鸭腿的纤维细胞结构致密均匀，排列有序。而当鸭腿开始卤制后，肌纤维间的细胞间隙逐渐变大，排列方式从有序状态变为无序状态。并且与卤制 0 h（T0）或卤制 2 h（T2）的鸭腿相比，卤制 6~8 h（T6~T8）的纤维细胞扭曲程度增加，这是因为鸭腿中的部分可溶性蛋白和汁液流失，结缔组织蛋白溶解使得纤维间结构趋于松散，扭曲程度加大。

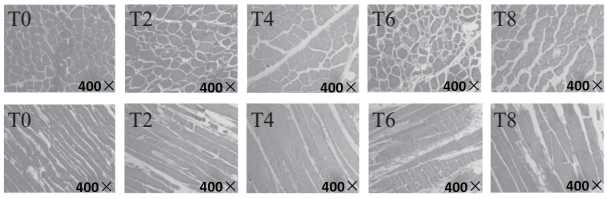



图 1　真空低温卤制鸭腿的横（上）纵（下）截面微观组织图

Fig.1　Microstructure of sous-vide marinated duck drumsticks in the transverse (top) and longitudinal (bottom) cross sections

注：T 表示卤制时间（h）；0、2、4、6、8 表示卤制过程中的不同时刻，图 2、图 5、图 8 同。

2.1.2　真空低温卤制过程中鸭腿的超微结构变化分析　肌节是肌原纤维的基本单元，由暗带（A 带）和明带（I 带）组成。I 带中央深色的细线称为 Z 线[27]，M 线位于 A 带中央，由细胞骨架蛋白构成，易发生蛋白结构变性[28]。如图 2 所示，未经卤制处理（T0）的鸭肉肌纤维排列较为规整，肌节中的 I 带、A 带和 Z 线清晰可见。在卤制 0~8 h 过程中，鸭腿肌肉的微观结构发生变化，其中，肌节形状逐渐变为波浪状结构且长度减小，Z 线混乱，M 线变得松散膨胀并逐渐消失，明暗带界限变得模糊，肌纤维结构逐渐解体。产生波浪状肌节的原因可能是真空低温卤制导致肌肉变性伸展，使 I 带结构发生不可逆的变化[29]。研究表明，

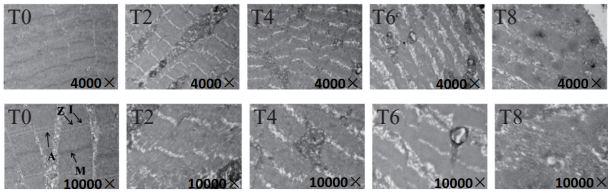



图 2　真空低温卤制鸭腿的透射电镜成像

Fig.2　Transmission electron microscopy of sous-vide marinating duck drumsticks

当肉类被加热至 40~60 ℃ 时，肌肉纤维横向收缩，肌浆蛋白则膨胀、聚集形成凝胶，而当加热至 60 ℃ 以上时，肌肉纤维发生横向和纵向收缩[30]。这说明卤制过程中，卤制温度和时间都会对肌肉的肌纤维结构产生影响。

### 2.2　肌原纤维蛋白溶解度的变化

蛋白质的溶解度可以作为衡量其变性程度的指标，且与肉制品的嫩度呈正相关[31]，溶解度越低表示蛋白变性程度越大[32]。图 3 是 MP 溶解度的变化情况。以未卤制时的鸭腿作为参照，在卤制 0~2 h 过程中，蛋白质溶解度显著降低 62.09%（$P<0.05$），主要是由于加热导致其表面疏水性增加和电荷分布改变，从而引发变性，溶解度下降[33]。同时，研究表明，肌浆蛋白和肌动蛋白在 50~90 ℃ 的加热过程中，热变性速率会加快，蛋白质聚集沉淀现象明显，从而使溶解度降低更显著[34]。卤制 2~4 h 时，蛋白质溶解度显著上升（$P<0.05$）。这可能是因为在真空低温卤制过程中鸭腿蛋白质温度持续保持 70 ℃，而适当加热可以分解蛋白质，产生可溶性小分子聚合物，同时蛋白质适度变性也使其分子空间构象发生改变，立体结构舒展，从而导致蛋白质溶解度升高[35]。在卤制 4~8 h 过程中，肌原纤维蛋白溶解度随卤制时间延长无显著差异（$P>0.05$），进一步说明真空低温卤制可以更好地维持鸭腿嫩度。

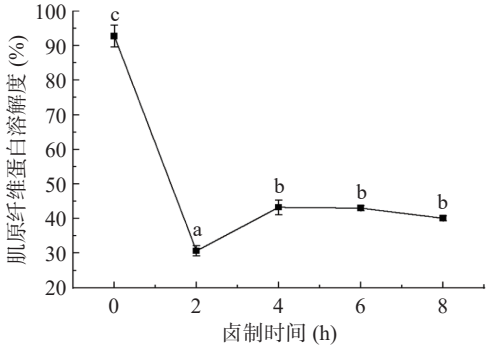



图 3　真空低温卤制对鸭腿肌原纤维蛋白溶解度的影响

Fig.3　Effect of sous-vide marinating duration on the solubility of myofibrillar proteins in duck drumsticks

注：图中不同字母表示有显著性差异（$P<0.05$），图 4、图 7 同。

### 2.3　肌原纤维小片化指数分析

肌原纤维小片化指数（MFI）用于衡量肌原纤维及其骨架蛋白的完整性。MFI 值越高，表明肌原纤维结构越不完整[14]。Geesink 等[36] 研究发现 MFI 值

与肉制品嫩度存在一定相关性，即肉制品的 MFI 值越大，肉质越嫩。由图 4 可知，与未卤制时的鸭腿相比，卤制 2 h 的鸭腿中 MFI 值显著增大（$P$<0.05），这说明鸭腿在卤制前期肉质开始嫩化，可能因为鸭腿经卤制处理后，肌动球蛋白和肌动蛋白变性解离，细胞膜遭受破坏并且出现膜破裂等现象，导致钙离子浓度增加激活了部分内源性蛋白酶活，增加了蛋白质水解[14]。同时，戴妍[37] 也发现，随热处理时间延长，猪肉的 MFI 值提高。此外，卤制导致肌节的受损也会影响肌原纤维蛋白结构，提高肌肉嫩度。但卤制 2 h 后，MFI 值无显著变化趋势（$P$>0.05），这与上述蛋白质的溶解性结果一致，也说明真空低温长时卤制对鸭腿嫩度影响较小。

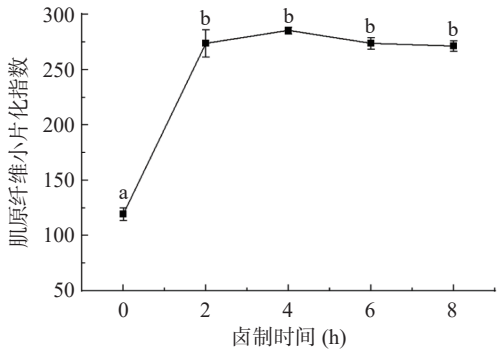



图 4 真空低温卤制对鸭腿肌原纤维小片化指数的影响

Fig.4 Effect of time of sous-vide marinating on the MFI of duck drumsticks

## 2.4 肌原纤维蛋白聚丙烯酰胺凝胶电泳分析

SDS-PAGE 凝胶电泳可直观检测肽链断裂后产生的蛋白碎片或聚合物[38]。如图 5 所示，可以观察到 4 种不同分子质量条带：肌球蛋白重链（MHC，200 kDa），副肌球蛋白（PM，100 kDa），肌动蛋白（Actin，45 kDa），以及肌球蛋白轻链（MLC，11~17 kDa）[39]。不同处理组肌原纤维蛋白组分呈现分子量迁移特征，随着卤制时间从初始阶段（T0）延续至成熟阶段（T8），鸭腿样品内肌原纤维蛋白组分发生明显分子结构解聚与重排反应，不同分子量分布区域条带强度呈现梯度性变化，其中高分子量蛋白组分通过分子间交联行为逐渐减少，同时伴随低分子量多肽成分的持续积累，这导致电泳图谱中部分条带消失，同时有新的条带出现。与未卤制的鸭腿（T0）相比，PM 条带随着卤制时间的增加而逐渐变浅，表明蛋白质发生了降解。与此同时，60~75 kDa 之间出现了新的小分子条带。然而，位于 35~48 kDa 分子量区段的肌动蛋白条带在热处理过程中保持相对稳定，未呈现显著迁移或消减现象，说明肌动蛋白分子间相互作用网络具有更强的耐热性。而且 Podolak 等[40] 研究发现，肌动蛋白的热变性温度约为 75 ℃，进一步说明 70 ℃ 的卤制温度对其无影响。60 kDa 处的蛋白分子在卤制初期就完全消失，随着卤制时间的延长，电泳图谱中稍低分子质量的位置出现了新的条带。最显著的变化发生在 25 kDa 的小分子条带处，随着卤制时间的增加，此处逐渐形成了一个新的条带。这可能是由于大分子蛋白在卤制过程中因高温而发生降解或聚集所致。

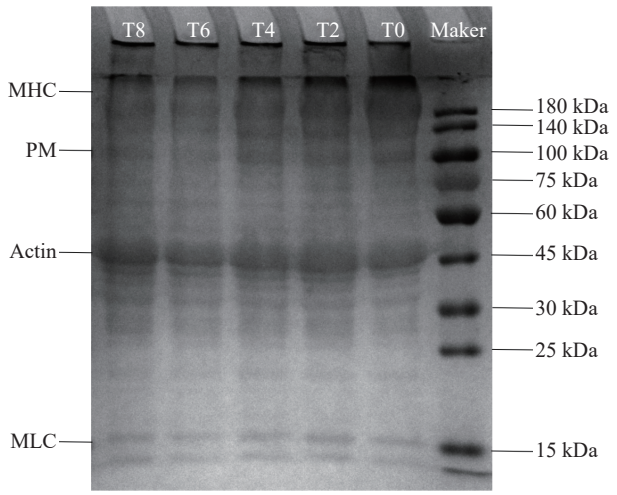



图 5 真空低温卤制鸭腿肌原纤维蛋白的 SDS-PAGE 电泳图谱

Fig.5 SDS-PAGE electrophoresis pattern of myofibrillar protein in duck drumsticks subjected to sous-vide marinating

## 2.5 肌原纤维蛋白二级结构分析

傅里叶变换红外光谱（FT-IR）可用于检测蛋白质的二级结构[41]。如图 6 所示，卤制 0 h 时，鸭腿肌原纤维蛋白中主要结构为 $\alpha$-螺旋（31.21%）和无规则卷曲（31.68%），这可能与卤制前对鸭腿进行腌制、焯水等前处理导致肌原纤维蛋白部分变性有关。在卤制 0~8 h 过程中，$\alpha$-螺旋和无规则卷曲占比未呈现显著变化（$P$>0.05），表明这两种结构在卤制过程中相对稳定，未受到显著破坏或重组。卤制 0~4 h，$\beta$-转角占比显著下降（$P$<0.05），较 0 h 降低 4.90%，$\beta$-折叠占比显著增加（$P$<0.05），4 h 时达到峰值，较 0 h 增加了 6.34%，这一变化与肌原纤维蛋白氢键强度提升及疏水作用增强有关，其增强了蛋白链间的相互作用，最终形成更稳定的 $\beta$-折叠结构，该结果与郑卓琦等[42] 的研究相似。在卤制 4~8 h 过程中，$\beta$-折叠占比显著

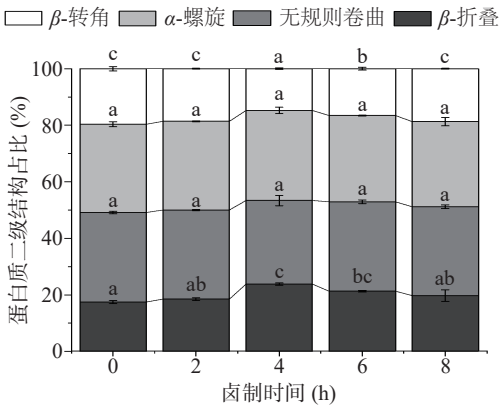



图 6 真空低温卤制鸭腿肌原纤维蛋白的二级结构

Fig.6 Secondary structure of sous-vide marinated duck drumstick myofibrillar protein

下降（$P<0.05$），$\beta$-转角占比显著回升（$P<0.05$），这可能是因为随着真空低温卤制时间的延长，维持蛋白质二级结构的氢键网络被破坏，导致 $\alpha$-螺旋和 $\beta$-折叠结构解体[43-44]。Wang 等[45] 研究发现脉冲超声处理使鸡肉肌原纤维蛋白 $\beta$-折叠和 $\alpha$-螺旋含量下降，$\beta$-转角含量增加，本研究结果与该变化趋势一致。综上，不同卤制时间下蛋白质二级结构的变化较复杂，总体表现为 $\alpha$-螺旋和无规则卷曲占比无显著性变化，$\beta$-折叠结构占比先增加后下降，$\beta$-转角占比先降低后升高。

### 2.6　肌原纤维蛋白表面疏水性分析

鸭腿蛋白质的凝胶作用可以提升其持水力和嫩度，而维持蛋白质凝胶最重要的作用力是疏水基的相互作用[46]。溴酚蓝可结合蛋白表面疏水区域，其结合量可用于衡量蛋白的表面疏水性[47]。如图 7 所示，在卤制初期（0~2 h），鸭腿肌原纤维蛋白溴酚蓝结合量显著增加（$P<0.05$），这可能是因为 70 ℃ 长时间卤制导致蛋白质氢键断裂、结构展开，促使非极性氨基酸残基进一步暴露，从而增强了疏水性[48]。卤制 2 h 后，蛋白质的表面疏水性为最大值，而在加热中后期（2~8 h），蛋白疏水性变化不显著（$P>0.05$），可能是由于大部分蛋白在卤制前期已完成变性、氧化和聚集。

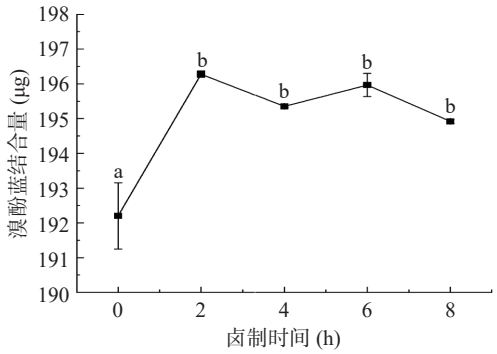



图 7　真空低温卤制鸭腿的溴酚蓝结合量

Fig.7　Bromophenol blue binding amount of sous-vide marinated duck drumsticks

### 2.7　肌原纤维蛋白内源荧光特性分析

蛋白质三级结构的变化可由分子内荧光光谱监测[49]。如图 8 和表 1 所示，未经卤制处理的鸭腿

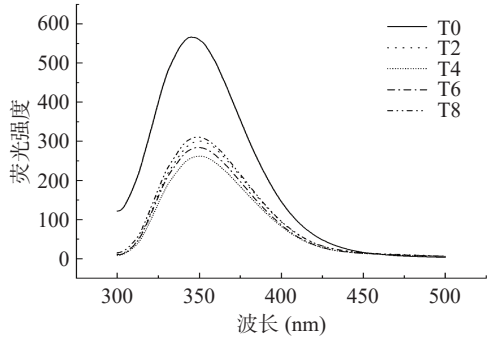



图 8　真空低温卤制鸭腿肌原纤维蛋白的内源荧光光谱

Fig.8　Intrinsic fluorescence spectra of myofibrillar protein in duck drumsticks subjected to sous-vide marinating

表 1　真空低温卤制过程中鸭腿的最大荧光强度

Table 1　Maximum fluorescence intensity of duck drumsticks in sous-vide marinating process

| 组别 | $\lambda_{max}$（nm） | $FT_{max}$ |
|---|---|---|
| T0 | 345 | 566.10 |
| T2 | 351 | 300.31 |
| T4 | 350 | 261.90 |
| T6 | 350 | 284.53 |
| T8 | 349 | 310.99 |

（T0）最大荧光发射波长（$\lambda_{max}$）位于 345 nm，卤制 2 h（T2），$\lambda_{max}$ 红移至 351 nm，红移现象表明氨基酸残基所处环境变得更亲水，说明真空低温卤制使鸭腿肌原纤维蛋白结构发生解离。在卤制 2 h 后的阶段（T2~T8），最大荧光强度（$FT_{max}$）提高 3.56%，$\lambda_{max}$ 从 351 nm 蓝移至 349 nm，这种蓝移可能源于长时间卤制使蛋白质发生二次折叠，部分色氨酸残基重新掩埋于肌原纤维蛋白聚合体内部[50]。与 T0 相比，整个卤制过程（0~8 h）$FT_{max}$ 明显降低。这可能是卤制使蛋白结构展开，掩盖色氨酸信号，导致荧光淬灭[51]。但当卤制时间超过 4 h（T4~T8）后，鸭腿的 $FT_{max}$ 逐渐升高。可能是随卤制时间增加，色氨酸侧链氧原子的电子转移能力增强，使其微环境疏水性降低[19]。

## 3　结论

本研究系统地分析了真空低温卤制加工体系中鸭腿肌原纤维蛋白结构的变化，揭示了真空低温卤制处理对鸭腿嫩度的改善机制。研究结果表明：卤制初期（0~2 h），肌原纤维蛋白溶解度显著降低，表面疏水性增强，肌原纤维结构解体（MFI 升高、肌节变形、M 线消失），肉质趋于硬化。后期（2~8 h），肌原纤维蛋白溶解度回升后保持稳定，MFI 无显著变化，部分大分子蛋白降解，微观组织结构显示肌纤维间隙增大、结缔组织溶解，嫩度显著改善。该研究通过调控蛋白质变性程度，优化肉质的嫩度与质构特性，为真空低温技术在禽肉加工中的应用提供了理论支撑，对提升鸭腿制品的品质和市场竞争力具有重要意义。未来研究将结合蛋白质组学技术，深入解析其动态降解规律与调控节点，揭示蛋白降解与肉质嫩化的关联机制，为加工工艺精准优化提供分子层面的理论支撑，并探索多参数优化及其他禽类适用性。

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

## 参考文献

［1］贺文杰. 三种常用香辛料的主效成分对卤鸭腿品质影响及机理研究［D］. 武汉：武汉轻工大学, 2021. ［HE Wenjie. Research on the influence and mechanism of the main active components of three commonly used spices on the quality of marinated duck legs［D］. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.］

［2］市场调研在线网. 中国酱鸭腿行业市场前景预测及投资价值评估分析报告［EB/OL］.［2025-01-07］. https: //www. docin.

com/p-4797503221. html. [Market research online network china braised duck leg industry market prospect forecast and investment value evaluation analysis report[EB/OL]. [2025-01-07]. https://www.docin.com/p-4797503221.html. ]
[3] 顾思远. 低温慢卤牛肉的开发及其保藏研究研究[D]. 成都: 成都大学, 2020. [GU Siyuan. Research on the development and preservation of low-temperature slow-braised beef[D]. Chengdu: Chengdu University, 2020. ]
[4] 刘雪, 闫晓明. 酱卤肉制品研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(23): 10−15. [LIU Xue, YAN Xiaoming. Research progress of braised and marinated meat products[J]. Modern Food, 2022, 28(23): 10−15. ]
[5] HWANG S I, LEE E J, HONG G P. Effects of temperature and time on the cookery properties of sous-vide processed pork loin[J]. Food Science of Animal Resources, 2019, 39(1): 65−72.
[6] 谭青玲. 真空低温烹饪技术对卤鸭品质影响及机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023. [TAN Qingling. Research on the impact and mechanism of vacuum low-temperature cooking technology on the quality of braised duck[D]. Chongqing: Southwest University, 2023. ]
[7] JAMES B J, YANG S W. Effect of cooking method on the toughness of bovine M. semitendinosus[J]. International Journal of Food Engineering, 2012, 8(2): 1168−1174.
[8] VASANTHI C, VENKATARAMANUJAM V, DUSHYANTHAN K. Effect of cooking temperature and time on the physicochemical, histological and sensory properties of female carabeef (buffalo) meat[J]. Meat Science, 2007, 76(2): 274−280.
[9] 高永芳. 基于不同交联模式调控低盐肌原纤维蛋白凝胶化机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024. [GAO Yongfang. Study on the mechanism of regulating low-salt myofibrillar protein gelation based on different cross-linking patterns[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024. ]
[10] TORNBERG E. Effects of heat on meat proteins-Implications on structure and quality of meat products[J]. Meat Science, 2005, 70(3): 493−508.
[11] 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.
[12] BALDWIN D E. Sous vide cooking: A review[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2012, 1(1): 15−30.
[13] 陈美玉. 基于水分迁移及肌原纤维蛋白特性研究真空低温加热对牛肉品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [CHEN Meiyu. Effect of water migration and the structural change of myofibril proteins on beef quality during sous-vide cooking[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. ]
[14] 孙红霞, 黄峰, 丁振江, 等. 不同加热条件下牛肉嫩度和保水性的变化及机理[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 84−90. [SUN Hongxia, HUANG Feng, DING Zhenjiang, et al. Changes in tenderness and water-holding capacity and underlying mechanism during beef stewing[J]. Food Science, 2018, 39(1): 84−90. ]
[15] 李鹏, 孙京新, 冯婷, 等. 不同滚揉腌制对鸭肉蛋白及水分分布的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(10): 157−164. [LI Peng, SUN Jingxin, FENG Ting, et al. Effects of pressure-transform tumbling curing assisted by ultrasound on the protein and water distribution of duck muscle[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(10): 157−164. ]
[16] ZHAO Lingling, XU Bin, WU Ruifang, et al. Comparative analysis of the qualities of traditional and sous-vide marinated duck drumsticks[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(10): 6113−6126.
[17] 徐彬, 高帮君, 胥伟, 等. 酱卤鸭腿真空低温卤制工艺优化及其品质分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(1): 115−121. [XU Bin, GAO Bangjun, XU Wei, et al. Optimization of vacuum low-temperature marinating technology and quality analysis of marinated duck legs[J]. China Condiment, 2023, 48(1): 115−121. ]
[18] LI Yuan, HUANG Jiayin, ZHOU Yaqi, et al. Structure-related differential proteins identification for sous-vide cooking hairtail (*Trichiurus lepturus*) product[J]. Food & Function, 2020, 11(11): 9960−9972.
[19] 李超. 加热处理对鸭肉嫩度的影响及其机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [LI Chao. Effects of heat treatment on duck meat tenderness and its mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. ]
[20] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1−2): 248−254.
[21] CLAUSEN I, JAKOBSEN M, ERTBJERG P, et al. Modified atmosphere packaging affects lipid oxidation, myofibrillar fragmentation index and eating quality of beef[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(2): 85−96.
[22] 胡吕霖, 任思婕, 沈清, 等. 不同烹饪方式及体外模拟消化环境对鲟鱼蛋白质氧化及消化性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 63−70. [HU Lülin, REN Sijie, SHEN Qing, et al. Effect of different cooking treatments and *in vitro* digestion on protein oxidation and digestibility of sturgeon fillets[J]. Food Science, 2018, 39(20): 63−70. ]
[23] 李京九, 宋明菲, 牛越, 等. 超高压处理过程中卤鸭腿肌原纤维蛋白结构变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 1−8. [LI Jingjiu, SONG Mingfei, NIU Yue, et al. Structural changes of myofibrillar proteins in marinated duck drumsticks during ultra-high pressure processing treatment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 1−8. ]
[24] ZHANG Ruihua, PANG Xiaoyang, LU Jing, et al. Effect of high intensity ultrasound pretreatment on functional and structural properties of micellar casein concentrates[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 47: 10−16.
[25] CAO Yungang, AI Nasi, 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.
[26] 熊杰, 伯朝英, 常海军. 甘草提取物对冷藏鸡肉糜脂肪和蛋白质氧化及品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 75−81,88. [XIONG Jie, BO Zhaoying, CHANG Haijun. Effects of licorice extract on oxidation and quality characteristics of fat and protein in refrigerated chicken meat batter[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 75−81,88. ]
[27] 王颖. 肌联蛋白磷酸化影响宰后肌肉嫩化过程的生物学机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. [WANG Ying. The mechanism of effect of titin phosphorylation on the muscle tenderization during post-mortem[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019. ]
[28] 周金星, 毕亚玲, 高登慧. 肌肉组织学结构及其与肉品品质的关系[J]. 山地农业生物学报, 2004, 23(5): 438−441. [ZHOU Jinxing, BI Yaling, GAO Denghui. A study on the structure of muscle histology and meat quality[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2004, 23(5): 438−441. ]
[29] ZUCKEFWAN H, SOLOMON M B. Ultrastructural changes

in bovine longissimus muscle caused by the hydrodyne process[J]. Journal of Muscle Foods, 1998, 9(4): 419−426.
[30] DOMINGUEZ-HERNANDEZ E, SALASEVICIENE A, ERTBJERG P. Low-temperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms[J]. Meat Science, 2018, 143: 104−113.
[31] 张斌斌, 李兴艳, 夏杨毅, 等. 兔肉宰后成熟过程中肌原纤维蛋白功能性质的变化[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 105−110,115. [ZHANG Binbin, LI Xingyan, XIA Yangyi, et al. Changes of myofibril protein functional properties during rabbit postmortem aging[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(4): 105−110,115.]
[32] 夏军军, 李洪军, 贺稚非, 等. 不同腌制方式对牛肉品质特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 12−19. [XIA Junjun, LI Hongjun, HE Zhifei, et al. Effects of different curing strategies on quality characteristics of beef[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2016, 38(2): 12−19.]
[33] OMANA D A, XU Y, MOAYEDI V, et al. Alkali-aided protein extraction from chicken dark meat: Chemical and functional properties of recovered proteins[J]. Process Biochemistry, 2010, 45(3): 375−381.
[34] 胡亚丽. 罗非鱼肌肉蛋白热变性聚集行为及其抑制[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015. [HU Yali. Behavior of heat-induced denaturation and aggregation of protein from tilapia muscle and its inhibition[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.]
[35] 杨海琦, 陈季旺, 楚天奇, 等. 油炸工艺对即食小龙虾品质的影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(6): 9−16. [YANG Haiqi, CHEN Jiwang, CHU Tianqi, et al. Effect of frying process on quality attributes of ready-to-eat crayfish[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2020, 39(6): 9−16.]
[36] GEESINK G H, TAYLOR R G, BEKHIT A E D, et al. Evidence against the non-enzymatic calcium theory of tenderization[J]. Meat Science, 2001, 59(4): 417−422.
[37] 戴妍. 欧姆加热对猪肉蛋白质降解、氧化以及凝胶特性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. [DAI Yan. Effects of ohmic cooking on pork meat protein degradations[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.]
[38] 钟玉洁, 武煊, 江依, 等. 亚油酸氧化引起大足黑山羊肌原纤维蛋白保水性变化的机制研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 48−55. [ZHONG Yujie, WU Xuan, JIANG Yi, et al. The mechanism of linoleic acid oxidation-induced changes in water retention of Dazu black goat myofibrillar protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10): 48−55.]
[39] WANG Haifeng, YANG Zhi, YANG Huijuan, et al. Comparative study on the rheological properties of myofibrillar proteins from different kinds of meat[J]. LWT, 2022, 153: 112458.
[40] PODOLAK R, ENACHE E, STONE W, et al. Sources and risk factors for contamination, survival, persistence, and heat resistance of *Salmonella* in low-moisture foods[J]. Journal of Food Protection, 2010, 73(10): 1919−1936.
[41] 何建川, 邵阳, 张波. 蛋白质和变性蛋白质二级结构的FTIR分析进展[J]. 化学研究与应用, 2012, 24(8): 1176−1180. [HE Jianchuan, SHAO Yang, ZHANG Bo. Progress in study of protein secondary structure and denaturized protein by FTIR[J]. Chemical Research and Application, 2012, 24(8): 1176−1180.]
[42] 郑卓琦, 李岩, 李松艳, 等. 原花色素对鸡胸肉肌原纤维蛋白凝胶特性影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(5): 140−153. [ZHENG Zhuoqi, LI Yan, LI Songyan, et al. Effect of proanthocyanidins on gel properties of chicken breast myofibrillar protein[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(5): 140−153.]
[43] 马军, 古丽孜亚·吐尔斯别克, 祖木来提·热西提, 等. 不同腌制方式对羊肉肌原纤维蛋白结构和特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(22): 239−245. [MA J, GULZIYA T, RESHIT Z, et al. Effect of different curing methods on structure and properties of myofibrillar protein in mutton[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(22): 239−245.]
[44] 陈思琪. 电磁耦合辅助气调包装对冷鲜猪肉保鲜效果的研究[D]. 成都: 西华大学, 2024. [CHEN Siqi. Study on the effect of electromagnetic coupling-assisted gas-conditioning packaging on the preservation of chilled pork freshness[D]. Chengdu: Xihua University, 2024.]
[45] WANG Jingyu, YANG Yuling, TANG Xiaozhi, et al. Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 225−233.
[46] 胡坤, 方少瑛, 王秀霞, 等. 蛋白质凝胶机理的研究进展[J]. 食品工业科技, 2006, 27(6): 202−205. [HU Kun, FANG Shaoying, WANG Xiuxia, et al. A review on advances of food protein gelation mechanisms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006, 27(6): 202−205.]
[47] 窦川林, 林静, 董唯, 等. 茶多酚处理对泥鳅微冻贮藏过程中肌原纤维蛋白功能性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 250−256. [DOU Chuanlin, LIN Jing, DONG Wei, et al. Effect of tea polyphenol on functional properties of loach myofibrillar protein during superchilled storage[J]. Food Science, 2018, 39(23): 250−256.]
[48] CHELH I, GATELLIER P, SANTÉ-LHOUTELLIER V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. Meat Science, 2006, 74(4): 681−683.
[49] 朱秀清, 姜永鹏, 杨鑫鑫, 等. 冷榨对大豆蛋白结构特性的影响研究[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 179−185. [ZHU Xiuqing, JIANG Yongpeng, YANG Xinxin, et al. Effects of cold-pressing on soybean protein structure characteristics[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(12): 179−185.]
[50] 严慧. 表面活性剂与卵清蛋白的相互作用[D]. 扬州: 扬州大学, 2005. [YAN Hui. Interaction between surfactants and ovalbumin[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2005.]
[51] SHENG Long, SU Peng, HAN Ke, et al. Synthesis and structural characterization of lysozyme-pullulan conjugates obtained by the Maillard reaction[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 71: 1−7.