

## 食盐腌制对鸡肉品质、肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响

孟嘉, 许树荣, 邓莎, 何贵萍, 吕远平

### Effects of Salt Marinating on Chicken Quality and Structure Characteristics, Function Characteristics of Chicken Myofibrin Protein

MENG Jiajun, XU Shurong, DENG Sha, HE Guiping, and L Yuanping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020270>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 羟自由基氧化体系对大黄鱼肌原纤维蛋白结构的影响

Effect of Hydroxyl Radical Oxidation System on Structure of Myofibrillar Protein in Cultured *Pseudosciaena crocea*

食品工业科技. 2019, 40(1): 29-33

#### 氧化对肌原纤维蛋白流变学特性及结构的影响

Effect of Oxidation on Rheological Properties and Structure of Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2019, 40(9): 29-33

#### 薯类淀粉与卡拉胶混凝体系特性及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

Characteristics of the Mixed Systems of Tuber Starch and Carrageenan and Its Effect on the Gel Properties of Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2020, 41(2): 1-8,15

#### 黑麦多酚对泥鳅冰温贮藏过程中肌原纤维蛋白功能特性的影响

Effect of Rye Polyphenol on Functional Properties of Loach Myofibrillar Protein during Superchilling Storage

食品工业科技. 2021, 42(1): 312-316

#### 氧化对兔肉肌原纤维蛋白结构、乳化性和凝胶性的影响研究

Effect of Oxidation on the Structure, Emulsification and Gelability of Rabbit Meat Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2020, 41(24): 22-30

#### 转谷氨酰胺酶对鲤鱼肌原纤维蛋白乳化活性和凝胶特性的影响

Effect of Transglutaminase on the Emulsifying Activity Index and Gel Properties of Common Carp Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2019, 40(6): 126-130,278



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孟嘉璐, 许树荣, 邓莎, 等. 食盐腌制对鸡肉品质、肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 45-53.  
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020270

MENG Jiajun, XU Shurong, DENG Sha, et al. Effects of Salt Marinating on Chicken Quality and Structure Characteristics, Function Characteristics of Chicken Myofibrin Protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 45-53. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020270

· 研究与探讨 ·

# 食盐腌制对鸡肉品质、肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响

孟嘉璐<sup>1</sup>, 许树荣<sup>1</sup>, 邓莎<sup>1,2</sup>, 何贵萍<sup>1,2</sup>, 吕远平<sup>1,2,\*</sup>

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065;

2. 四川大学健康食品科学评价体系研究中心, 四川成都 610065)

**摘要:** 为探究食盐浓度对冷藏腌制过程中鸡肉品质和肌原纤维蛋白的影响, 将鸡肉置于不同浓度 (0%、1.6%、3.2%、4.8%、6.4%、8.0%) 的食盐腌制液中, 进行不同时间 (0.2、1、2、3、4 d) 的冷藏腌制后, 测定鸡肉的水分含量、持水性以及肌原纤维蛋白的溶解度、表面疏水性、羰基、巯基、二聚酪氨酸含量等。结果表明: 经过不同浓度食盐液的腌制, 鸡肉的持水性和肌原纤维蛋白表面疏水性发生变化, 随着腌制时间的延长羰基含量和二聚酪氨酸含量增大, 肌原纤维蛋白的溶解度、热稳定性、巯基含量降低, 部分  $\alpha$ -螺旋转化为  $\beta$ -折叠。随着食盐液浓度增大羰基和二聚酪氨酸含量先增加后减小, 巯基含量不断增大, 并且食盐液浓度范围为 3.2%~4.8% 时肌原纤维蛋白各特性指标变化较大。综上, 食盐腌制能促使鸡肉肌原纤维蛋白结构和功能发生改变, 此研究结果可为控制腌制过程中鸡肉品质变化和其肌原纤维蛋白氧化提供理论依据。

**关键词:** 食盐, 腌制时间, 肌原纤维蛋白, 鸡肉品质, 结构特性, 功能特性

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)24-0045-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020270



本文网刊:

## Effects of Salt Marinating on Chicken Quality and Structure Characteristics, Function Characteristics of Chicken Myofibrin Protein

MENG Jiajun<sup>1</sup>, XU Shurong<sup>1</sup>, DENG Sha<sup>1,2</sup>, HE Guiping<sup>1,2</sup>, LÜ Yuanping<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Healthy Food Evaluation Research Center, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** This study was conducted to investigate the effect of salt on the quality and myofibrillar protein during cold storage of chicken breast. After the low-temperature curing with different salt concentration (0.0%, 1.6%, 3.2%, 4.8%, 6.4% and 8.0%) for different times (0.2, 1, 2, 3, 4 d), the chicken samples were used to measure the water content, water holding capacity, solubility, surface hydrophobicity, carbonyl content, sulfhydryl content, and dimer tyrosine content. Results showed that water holding capacity and surface hydrophobicity were changed after brining, the brining time positively affected carbonyl content and dimer tyrosine content while negatively affected sulfhydryl group content, thermal stability, and solubility. In addition, salt treatments could change the structure of samples from  $\alpha$ -helix to  $\beta$ -fold. With the increasing of salt concentration, the contents of carbonyl and dimer tyrosine increased firstly and then decreased, and the content of sulfhydryl increased continuously. When the salt concentrations ranged from 3.2% to 4.8%, the characteristic indexes of myofibrillar protein changed obviously. In conclusion, the structure and function of myofibrillar protein in chicken were affected by salination. These results would provide theoretical data for controlling the changes of chicken quality and

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 2020CDDZ-21-SCU; 巴山黑鸡深加工关键技术研究及其应用示范; 2020 年度四川大学-达州人民政府战略合作专项资金项目。

作者简介: 孟嘉璐 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品工程, E-mail: 790742026@qq.com。

\* 通信作者: 吕远平 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: 364943477@qq.com。

oxidation of myofibrillar protein during the brining process.

**Key words:** salt; marinating time; myofibrillar protein; chicken quality; structural characteristics; functional characteristics

近年来中国鸡肉消费量逐年提高,人均鸡肉消费量也仅次于猪肉,超过肉类消费量的20%<sup>[1]</sup>。腌制是肉类产品加工的重要环节,食盐是一种常见的腌制剂,与其他腌制剂相比在产品加工保藏和感官特性等方面具有显著优势<sup>[2]</sup>,被广泛应用于各类肉制品加工中。鸡肉中含大量盐溶性的肌原纤维蛋白,约占总蛋白质的50%~55%<sup>[3]</sup>。食盐中大量的氯化钠可以抑制腐败菌活动,同时也可引起鸡肉水分含量、持水性等品质和其肌原纤维蛋白内部结构的变化,进而影响其加工特性与产品品质。目前,国内外已有食盐对肉制品影响的相关研究成果。食盐作为咸味剂,有助于丰富肉制品的风味<sup>[4]</sup>; Sikes等<sup>[5]</sup>发现,食盐可以导致低盐牛肉香肠的肌肉结构发生显著变化,使食盐质量分数为2%的牛肉香肠持水力显著升高;有研究表明鸡肉在食盐腌制过程中发生肌原纤维蛋白氧化和脂肪氧化<sup>[6]</sup>,进而对其蛋白质的羰基含量、巯基含量、二级结构、热变性温度等产生一定的影响<sup>[7-8]</sup>,并且过度的氧化会产生负面作用<sup>[9]</sup>;食盐中含有的大量氯化钠可降低鸡肉肌原纤维蛋白的等电点,从而增强其溶解性,进而提升肌原纤维蛋白的加工特性<sup>[10]</sup>。目前,关于同时探究在冷藏条件下食盐用量和腌制时间对鸡肉肉质和其肌原纤维蛋白氧化的影响的相关文献还很少。鸡肉在不同的食盐水浓度和腌制时间下进行腌制,其肌原纤维蛋白特性会发生一定程度的变化,进而影响肉的品质,因此选出对鸡肉及相关肉制品的肌原纤维蛋白影响最小的腌制时间和浓度是本研究的意义所在。

本实验以新鲜鸡大胸肉为原料,探究食盐腌制对鸡肉相关品质及其肌原纤维蛋白结构功能特性的影响。通过将鸡肉置于不同浓度食盐液中进行不同时间的腌制处理,测定其水分、持水性的变化,并对其肌原纤维蛋白羰基含量、溶解度、二级结构、热稳定性等结构和功能特性指标进行测定,分析讨论其变化规律,为控制鸡肉腌制过程中品质的变化提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

泰森生鲜鸡大胸肉、食盐 成都武侯区沃尔玛超市;氯化钠、氯化钾、氯化镁、盐酸、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(ethylene glycol bis(2-aminoethyl ether) tetraacetic acid, EGTA)、牛血清蛋白、四氯化碳、氢氧化钾、酒石酸钾钠、硫酸铜、三氯乙酸、无水乙醇、乙酸乙酯、盐酸胍、溴酚蓝 分析纯,成都科龙化工试剂厂;2,4-二硝基苯肼(2,4-dinitrophenylhydrazine, DNPH)、总巯基含量检测试剂盒 分析纯,上海泰坦科技股份有限公司;无水溴化钾 光谱纯,成都市科隆化学品有

限公司。

SQP型分析天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;GZX-9 140MBE电热鼓风干燥箱 上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;LKTC-L型水浴锅 广东佛衡仪器有限公司;FSH-2A高速匀浆机 常州润华电器有限公司;1 736 R高速冷冻离心机 Labo-gene公司;UV-1 800PC紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;傅立叶红外光谱仪(IS10-溴化钾压片) 日本津岛;F-7 000荧光分光光度计 德国曼默博尔;DSC204F01差示扫描量热仪 美国Perkin Elmer公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 鸡肉预处理与腌制 鸡胸肉洗净后吸干表面多余水分,去除可见脂肪,筋膜及结缔组织,将整块鸡胸肉分成体积为3 cm×2 cm×2 cm的方块,分为30组,每组质量50 g。将鸡肉分别加入到质量分数为0%、1.6%、3.2%、4.8%、6.4%、8.0%的食盐液中,分别于4℃冷藏腌制0.2、1、2、3、4 d后取出,测定其相关指标。

#### 1.2.2 鸡肉相关品质的测定

1.2.2.1 水分含量的测定 参照GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》<sup>[11]</sup>进行测定,取2.5 g鸡肉搅碎至肉糜状放入称量瓶,放入102℃电鼓风干燥箱中干燥至恒重,并记录干燥前后的质量。

1.2.2.2 持水性的测定 参考许立兴等<sup>[12]</sup>方法,取不同腌制条件下的鸡肉,称取约5 g并精确计重(精确至小数点后两位),置于底部放有纱布的离心管中,在4200 r/min,4℃条件下离心8 min后取出精确计重,持水率按式(1)计算得到。

$$\text{持水率}(\%) = \left( \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中:  $W_1$ ,离心前鸡肉精确重量(g);  $W_2$ ,离心后鸡肉精确重量(g)。

1.2.3 肌原纤维蛋白的提取 肌原纤维蛋白的提取参照李文博等<sup>[13]</sup>的方法,并稍作修改。称取不同腌制条件下鸡肉10 g绞成肉糜状后加入4倍体积缓冲溶液A(pH7.0,其中含0.1 mol/L KCl、1 mmol/L MgCl<sub>2</sub>、7 mmol/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、18 mmol/L K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>、1 mmol/L 乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(EGTA))混匀,然后以10000 r/min转速冰浴匀浆1 min,均质后液体在4℃下以8 000 r/min转速离心15 min,去上清液取沉淀后重复上述操作2次。弃去上清液得到沉淀为粗蛋白,后加入4倍体积缓冲液B(pH6.0,其中含0.1 mol/L NaCl、1 mol/L HCl)混匀,重复上述匀浆和离心操作步骤,在重复第2次后,将第3次匀浆液用4层纱布过滤后再离心,弃去上

清液所得沉淀即为肌原纤维蛋白。

将所得肌原纤维蛋白置于缓冲溶液 C(pH6.0, 0.6 mol/L KCl、10 mmol/L K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)中制得肌原纤维蛋白溶液样品,并用双缩脲法<sup>[14]</sup>测定蛋白溶液质量浓度,其中用牛血清蛋白作为标准蛋白。

#### 1.2.4 鸡肉肌原纤维蛋白功能与结构特性相关指标的测定

1.2.4.1 蛋白质溶解度的测定 参照扶庆权等<sup>[15]</sup>方法,将肌原纤维蛋白溶液样品用缓冲溶液 C 调至 5 mg/mL,取 5 mL 在 4 ℃ 下以 5000 r/min 的转速离心 15 min,取上清液测定其蛋白质浓度。溶解度按式(2)计算得到。

$$\text{溶解度}(\%) = \frac{C_1}{C_0} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: C<sub>0</sub>, 离心前肌原纤维蛋白浓度(mg/mL); C<sub>1</sub>, 离心后肌原纤维蛋白浓度(mg/mL)。

1.2.4.2 表面疏水性的测定 参照楼宵玮等<sup>[16]</sup>的方法并稍作修改,将肌原纤维蛋白溶液用缓冲溶液 C 调至 5 mg/mL,取 1 mL 加入 0.2 mL 的 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液至 50 mL 离心管中制得样品,空白对照组为 1 mL 磷酸缓冲溶液 C 加入 0.2 mL 的 1 mg/mL 溴酚蓝溶液。所制得的样品与空白对照在 25 ℃ 下振荡 10 min 后在 4 ℃ 下以 5000 r/min 的转速离心 10 min,取上清液稀释 10 倍后测定 595 nm 波长处得吸光度,蛋白质表面疏水性用溴酚蓝结合量表示。表面疏水性按式(3)计算得到。

$$\text{溴酚蓝结合量}(\mu\text{g}) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 200 \quad \text{式(3)}$$

式中: A<sub>0</sub>, 空白对照吸光度; A<sub>1</sub>, 样品吸光度。

1.2.4.3 紫外吸收光谱的测定 参照 Lange 等<sup>[17]</sup>方法并稍作修改,将肌原纤维蛋白溶液用缓冲溶液 C 调至 1 mg/mL,置于紫外分光光度计中测定 230~340 nm 波长范围内的紫外吸收光谱,扫描速度为 2 nm/min。

1.2.4.4 扫描量热分析 测定方法参照李春强<sup>[18]</sup>并稍作修改,将肌原纤维溶液用缓冲溶液 C 调至 50 mg/mL,取约 4 mg 样品于铝盒中,空白对照为空铝盒,在 30~120 ℃ 温度范围内进行扫描,扫描速率为 10 ℃/min,得出肌原纤维蛋白的变性温度。

1.2.4.5 羰基含量的测定 采用 DNPH 法进行测定,参照 Oliver 等<sup>[19]</sup>的方法并稍作修改。在 2 mL 的离心管中加入 0.1 mL 浓度为 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液(缓冲溶液 C 稀释制得)与含有 0.02 mol/L DNPH 的 2 mol/L HCl 溶液,振荡摇匀 1 min 后在 25 ℃ 下反应 45 min,空白对照加入不含 0.5 mL 不含 DNPH 的 2 mol/L 的 HCl 溶液。后加入 0.5 mL 的 20% 三氯乙酸振荡摇匀,以 8000 r/min 于 4 ℃ 下离心 10 min,弃上清液取沉淀用 1 mL 体积比为 1:1 的无水乙醇和乙酸乙酯混合物洗涤 3 次。将沉淀溶

于 1 mL 的 1 mol/L 盐酸胍溶液中,37 ℃ 水浴溶解 30 min 后在 10000 r/min 下离心 10 min 取上清液,在 370 nm 波长下测定吸光度值,羰基含量按式(4)计算得到。

$$\text{羰基含量}(\text{nmol/mg肌原纤维蛋白}) = \frac{A \times n}{\varepsilon \times \rho} \times 10^6 \quad \text{式(4)}$$

式中: A, 样品在 370 nm 波长处的吸光度; n, 稀释倍数; ε, 摩尔吸光系数 22000 L/(mol·cm); ρ, 蛋白质质量浓度(mg/mL)。

1.2.4.6 巯基含量的测定 将肌原纤维蛋白溶液用缓冲溶液 C 调至 5 mg/mL,使用总巯基检测试剂盒进行巯基的测定及含量的计算。

1.2.4.7 二聚酪氨酸含量的测定 参照 Davies 等<sup>[20]</sup>的方法并稍作修改,将肌原纤维蛋白溶液用缓冲溶液 C 调至 1 mg/mL,在 4 ℃ 下以 3500 r/min 冷冻离心 5 min 后取上清液,用荧光分光光度计测定其荧光强度(激发波长 325 nm、发射波长 420 nm),用双缩脲法测定上清液蛋白质含量,相对荧光强度用荧光强度除以蛋白质浓度,表示为 AU,即为二聚酪氨酸含量。

1.2.4.8 二级结构的测定 方法参照 Kun 等<sup>[21]</sup>并稍作修改,将肌原纤维蛋白溶液放入-80 ℃ 预冻 5 h,后冷冻干燥 36 h。取 2 mg 冻干后样品与 200 mg 无水溴化钾充分研磨混合,然后制成溴化钾压片。将其置于傅里叶红外光谱仪中进行扫描与分析,扫描范围为 400~4000 cm<sup>-1</sup>,分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>。使用 PeakFit 软件对原始图谱酰胺 I 带进行曲线拟合,肌原纤维蛋白质二级结构相对含量由积分面积计算得出。

### 1.3 数据处理

所有实验均至少重复 3 次,数值取其平均值加减标准差,利用 Excel 2019、SPSS 26.0、Origin 2019 软件对实验数据进行统计分析处理, P<0.05 则为有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉相关品质的影响

2.1.1 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉水分含量的影响 图 1 为不同浓度食盐液腌制下鸡肉水分含量的变化。由图 1 可看出,在不同浓度食盐液的腌制过程中鸡肉水分含量变化不大,均保持在 75% 左右。但腌制过后的鸡肉水分含量相较于未腌制的略有增大,在 3 d 时 4.8% 食盐液浓度的腌制下的鸡肉水分达到了最高值 78.93%。可能是因为腌制过程中会出现盐溶效应,使鸡肉中盐溶性的肌原纤维蛋白溶解度增加<sup>[22]</sup>,水分含量上升。3~4 d 时当腌制液浓度超过 4.8% 时鸡肉水分含量略有降低,可能是因为食盐溶液的高渗透压下,水分向腌制液转移,同时蛋白氧化使疏水基团暴露,导致水分含量降低。总体而言,食盐的腌制对鸡肉水分含量影响不大。

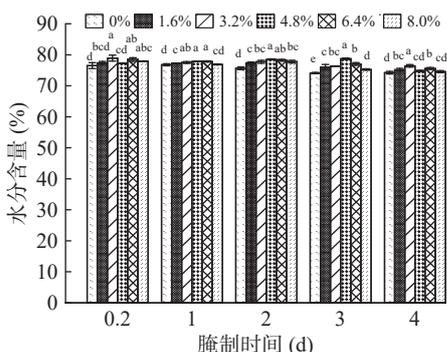


图 1 不同食盐浓度和腌制时间对鸡肉水分含量的影响

Fig.1 Effects of different salt concentration and curing time on moisture content of chicken

注: 图中小写字母不同, 则表示同一腌制时间、不同食盐浓度组间差异显著( $P<0.05$ ), 图 2、图 4~图 5、图 7~图 10 同。

### 2.1.2 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉持水性的影响

鸡肉的持水性对其品质和嫩度有很大的影响, 图 2 反映了不同浓度食盐液腌制下鸡肉持水性的变化规律。图 2 表明, 新鲜鸡肉持水性为 9.56%, 冷藏过后持水性下降, 可能是由于微生物的活动和蛋白质的水解氧化使其细胞结构变松散, 水分向细胞外扩散<sup>[23]</sup>。添加食盐腌制的鸡肉持水性均增大, 且腌制液浓度为 0%~4.8% 时, 持水性随着食盐浓度上升而增加, 在 2 d 时 4.8% 食盐浓度下最高达到 19.52%。表明食盐腌制使鸡肉持水性上升, 是因为鸡肉中存在大量的盐溶性蛋白, 食盐提高蛋白质溶解度从而增加了其细胞持水率。但当食盐浓度继续增加后鸡肉持水性又略有下降, 有可能因为高浓度盐使肌肉细胞脱水。总体来说, 食盐腌制使鸡肉持水性增大, 且食盐液浓度为 4.8% 时增大效果最显著。

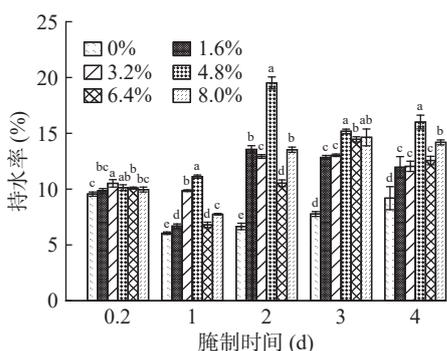


图 2 不同食盐浓度和腌制时间对鸡肉持水性的影响

Fig.2 Effects of different salt concentration and curing time on water holding capacity of chicken

## 2.2 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白功能与结构特性的影响

### 2.2.1 牛血清蛋白标准曲线

本实验待测肌原纤维蛋白溶液的定量采用双缩脲法, 其中以牛血清白蛋白作为标准蛋白。图 3 为牛血清蛋白标准曲线, 取 5 g 鸡肉中提取出的肌原纤维蛋白, 加入缓冲溶液 C 至 20 mL, 测得此蛋白溶液样品浓度为 80 mg/mL,

其余相关指标的测定均用此蛋白溶液进行稀释(缓冲溶液 C)得到待测样品。

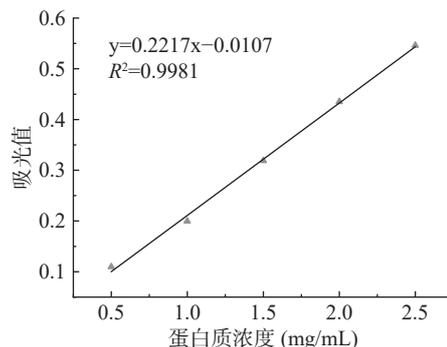


图 3 牛血清蛋白标准曲线

Fig.3 Standard curve of bovine serum albumin

### 2.2.2 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白溶解度的影响

蛋白质的溶解度也可以反应其氧化程度, 图 4 为不同浓度食盐液腌制下鸡肉肌原纤维蛋白溶解度的变化。由图 4 可知, 1~4 d 肌原纤维蛋白的溶解度较 0.2 d 明显降低, 由 0.2 d 的 65.6%~75.9% 在 3 d 最低降低至 10.97%~15.78%, 可能因为蛋白质氧化导致其天然构象发生改变, 疏水基团暴露使溶解度下降, 同时肌原纤维蛋白氧化使其巯基转化为二硫键引起蛋白质聚集, 导致溶解度降低<sup>[24]</sup>。添加食盐腌制的鸡肉溶解度相较于未添加的显著增加 ( $P<0.05$ ), 是因为肌原纤维蛋白为盐溶性蛋白, 腌制液中大量带负电荷的氯离子与带正电荷的肌原纤维蛋白分子的相互作用导致静电斥力下降<sup>[25]</sup>, 阻止了蛋白质的沉淀, 使溶解度增大。整体而言, 食盐腌制使鸡肉肌原纤维蛋白溶解度降低, 且此效果在食盐液为 3.2%~4.8% 浓度范围内尤为明显。

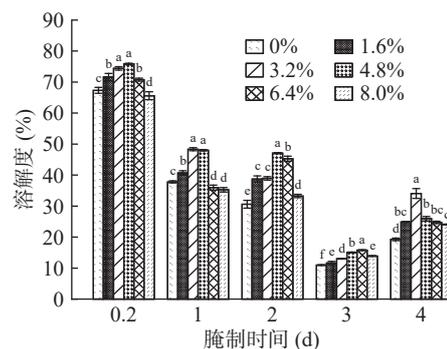


图 4 不同食盐浓度和腌制时间对溶解度的影响

Fig.4 Effects of different salt concentration and curing time on solubility

### 2.2.3 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

蛋白质的表面疏水性是维持其三级结构的主要作用力<sup>[3]</sup>, 蛋白质氧化程度越高表面疏水性越大。图 5 为不同浓度食盐液的腌制后鸡肉肌原纤维蛋白表面疏水性的变化。由图 5 得出, 随着腌制的进行表面疏水性在 0.2~3 d 增大, 当食盐液浓度为 0% 时, 由 0.2 d 的 115.40  $\mu\text{g}$  增大至最大值

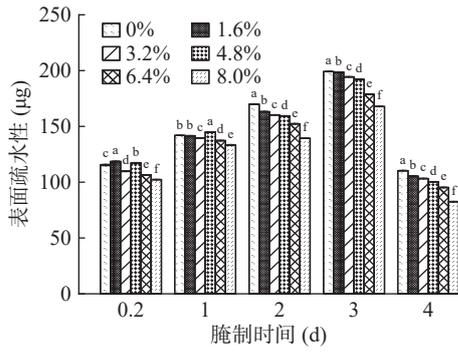


图 5 不同食盐浓度和腌制时间对表面疏水性的影响

Fig.5 Effects of different salt concentration and curing time on surface hydrophobicity

3 d 的 199.07 µg, 可能是由于蛋白质氧化导致其空间结构发生变化, 使其内部色氨酸、苯丙氨酸残基等疏水性氨基酸残基暴露, 从而使表面疏水性增大<sup>[26]</sup>。但在 4 d 时表面疏水性下降, 且随着食盐浓度的增加显著下降 ( $P < 0.05$ )。可能是因为微生物活动使蛋白质疏水结构改变以及鸡肉水分含量的改变所导致, 同时因为食盐液中的氯化钠抑制了肌原纤维蛋白内部的

疏水键和共价键的作用, 并且蛋白质氧化使其内部分子交联形成聚合物, 导致其对蛋白酶敏感性降低, 蛋白质的酶解降低<sup>[27]</sup>, 使表面疏水性下降。总体而言, 一定浓度的食盐液的短时间腌制有促进肌原纤维蛋白氧化的作用。

2.2.4 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白紫外吸收光谱的影响 图 6 表示不同浓度食盐液腌制下鸡肉肌原纤维蛋白紫外吸收光谱的变化。由图 6 得出, 不同浓度食盐液的腌制后鸡肉肌原纤维蛋白的紫外吸收光谱相似, 均在 280 nm 波长左右出现峰的拐点。肌原纤维蛋白中的芳香族氨基酸具有紫外吸收的特性, 所以紫外吸收光谱可用于反应蛋白质氧化之后结构的变化<sup>[28]</sup>。随着腌制的进行吸收峰峰位出现蓝移, 说明肌原纤维蛋白被氧化后结构发生变化, 导致色氨酸等芳香族氨基酸暴露在表面被氧化, Wang 等<sup>[29]</sup> 研究发现兔肉肌原纤维蛋白侧链色氨酸的氧化会导致紫外吸收峰的降低甚至消失。随着食盐浓度的变化吸收峰峰位也发生了改变, 表明食盐促进了蛋白质的氧化和结构的变化, 导致其色氨酸包

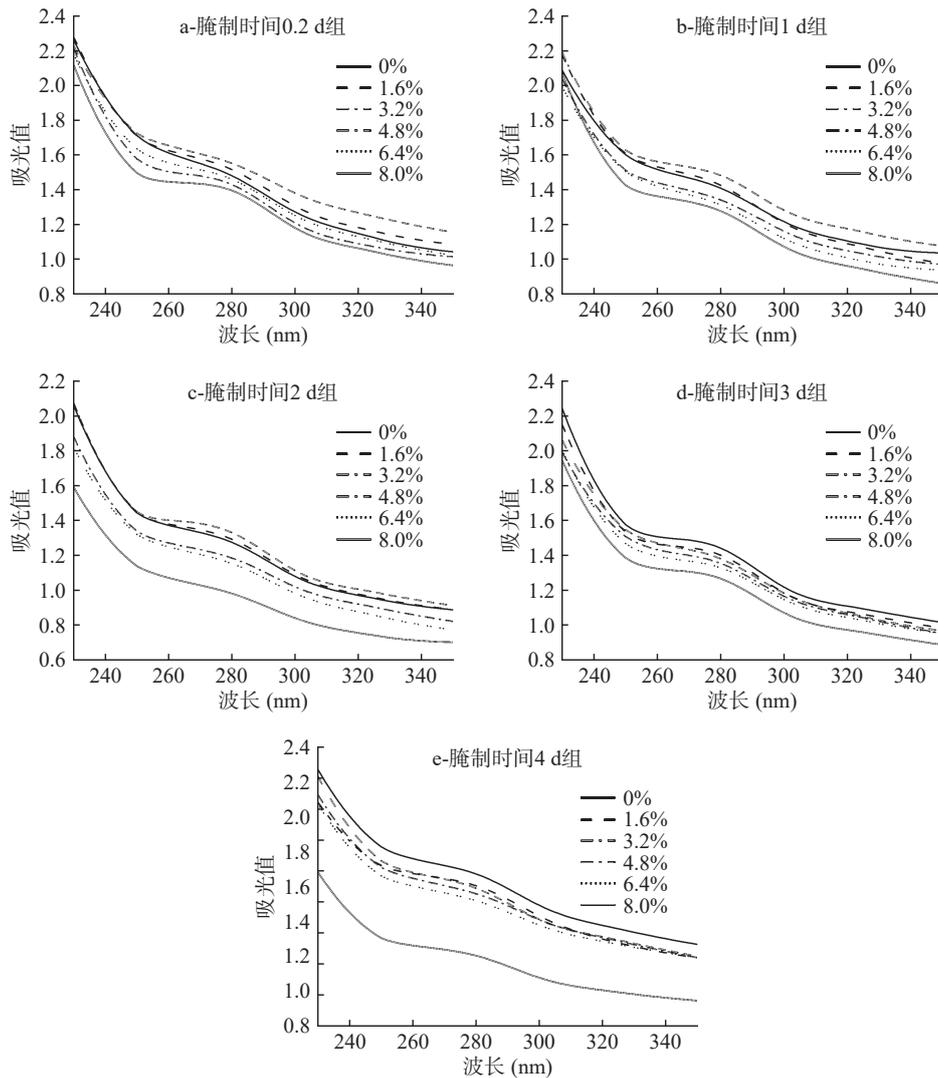


图 6 不同食盐浓度和腌制时间对紫外吸收光谱的影响

Fig.6 Effects of different salt concentration and curing time on UV absorption spectrum

理或暴露从而引起紫外吸收的变化,但其紫外吸收同时也会受到各种其他氨基酸的干扰。总之,食盐的腌制使鸡肉肌原纤维蛋白的紫外吸收光谱发生蓝移。

**2.2.5 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白热稳定性的影响** 蛋白质氧化会导致其结构和功能的变化,使其热变性温度发生改变。差示扫描量热分析是用来测定蛋白质变性过程中能量变化的一项技术<sup>[30]</sup>,蛋白质变性温度越高,即蛋白质的结构越稳定<sup>[31]</sup>。图 7 为不同浓度食盐液腌制下鸡肉肌原纤维蛋白热变性温度的变化。由图 7 可以得出,鸡肉变性温度均较 0.2 d 时降低,0% 浓度腌制液下由 0.2 d 的 88.35 °C 在 4 d 降至 70.43 °C,说明随着时间的延长,蛋白质氧化结构变得松散易热变性。0.2~2 d 腌制时间内随着食盐液浓度的增加,变性温度显著降低 ( $P<0.05$ ),2~4 d 腌制时间内食盐浓度升高使变性温度增加,腌制后期高浓度食盐使其变性温度有所回升可能是由于高浓度食盐抑制了微生物的活动,并且使蛋白酶活性降低,从而抑制了蛋白质的变性。整体而言,食盐的腌制使鸡肉肌原纤维蛋白热变性温度降低,结构稳定性下降。

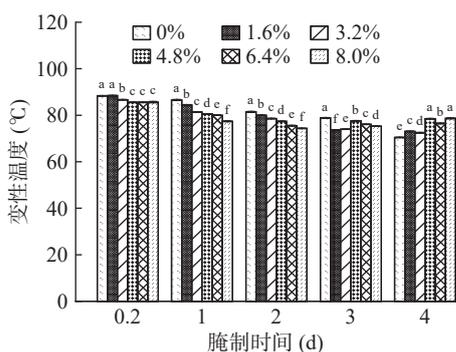


图 7 不同食盐浓度和腌制时间对热稳定性的影响  
Fig.7 Effects of different salt concentration and curing time on thermal stability

**2.2.6 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白羰基含量的影响** 羰基含量是反应蛋白质氧化的重要指标,鸡肉中羰基的形成是由氨基酸侧链直接氧化或者主肽链断裂所导致<sup>[32]</sup>,或是因鸡肉氧化生成非蛋白羰基化合物。图 8 是不同浓度食盐液腌制下鸡肉肌原纤维蛋白羰基含量的变化。由图 8 得出,新鲜鸡肉的羰基含量为 0.16 mmol/mg,经过腌制的鸡肉羰基含量均显著增加 ( $P<0.05$ ),表明外源氯化钠使蛋白质的氧化程度加深导致羰基含量增大。Xiong 等<sup>[33]</sup>发现脂质氧化的产物与肌原纤维蛋白发生共价结合从而使蛋白羰基含量增加,所以鸡肉中少量脂肪的氧化也会导致羰基含量增大。羰基含量在 4 d 时 4.8% 食盐液浓度下达到最高值 7.21 mmol/mg,但食盐液浓度高于 4.8% 后羰基含量降低,可能是由于肌原纤维蛋白被氧化后部分羰基残基产生交联使其被消耗所导致。综上所述,食盐腌制促进鸡肉肌原纤维蛋白氧化导致羰基含量上升,并且 4.8% 浓度的食盐

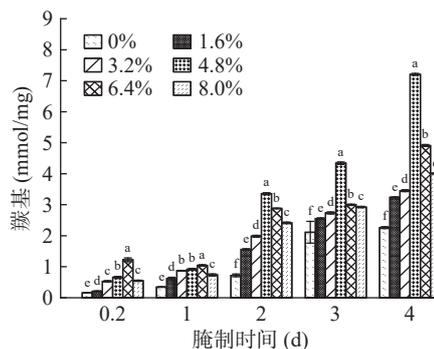


图 8 不同食盐浓度和腌制时间对羰基含量的影响  
Fig.8 Effects of different salt concentration and curing time on carbonyl content

液促氧化效果最明显。

**2.2.7 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白巯基含量的影响** 巯基是肌原纤维蛋白中反应活性最高的基团<sup>[34]</sup>,存在于蛋白质表面及其内部,极易受氧化形成二硫键,或进一步氧化生成磺酸类产物<sup>[35]</sup>,蛋白质氧化加深巯基含量减少。图 9 反映不同浓度食盐液腌制下鸡肉肌原纤维蛋白的巯基含量。由图 9 可以得出,经过腌制的鸡肉巯基含量均显著降低 ( $P<0.05$ ),且食盐液浓度越高降低幅度越大,新鲜鸡肉的巯基含量为 54.80 mmol/mg,在 8.0% 浓度食盐液 4 d 的腌制下降到了 13.67 mmol/mg。表明食盐使肌原纤维蛋白的结构发生改变,内部包埋的巯基暴露于表面,促进其被氧化导致含量下降。并且腌制时间越长,巯基含量越少,与李学鹏等<sup>[36]</sup>得出的六线鱼的肌原纤维蛋白氧化时间增加,巯基含量呈不断下降趋势的结论一致。整体而言,食盐的腌制使鸡肉肌原纤维蛋白的巯基含量下降,且食盐液浓度越高此趋势越明显。

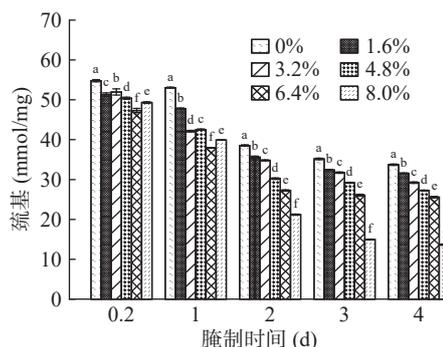


图 9 不同食盐浓度和腌制时间对巯基含量的影响  
Fig.9 Effects of different salt concentration and curing time on sulfhydryl group content

**2.2.8 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白二聚酪氨酸含量的影响** 酪氨酸是敏感型氨基酸,蛋白质氧化产生的酪氨酸残基和酪氨酸自由基会结合形成二聚酪氨酸<sup>[37]</sup>,所以二聚酪氨酸的含量也是蛋白质氧化程度的指标。图 10 是不同浓度食盐液腌制下鸡肉肌原纤维二聚酪氨酸含量的变化。从图 10

得出, 肌原纤维蛋白二聚酪氨酸含量变化趋势类似于羰基含量, 其含量随着时间的延长不断增加, 4 d 时的平均含量上升为 0.2 d 时的 10 倍左右。这是由于蛋白质的氧化促使了二聚酪氨酸的生成, 也可能因为蛋白质氧化之后通过部分共价键和非共价键的作用发生了聚集<sup>[38]</sup>所导致。总体来说, 添加食盐腌制的鸡肉二聚酪氨酸含量相较于未腌制的显著增加( $P<0.05$ ), 说明食盐促进了蛋白质的氧化。

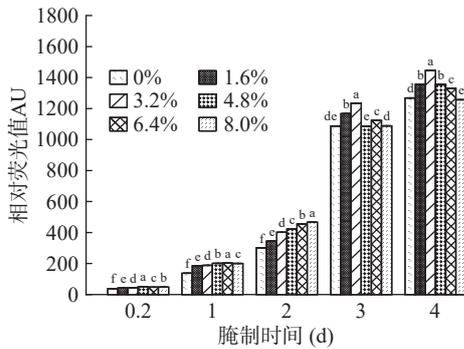


图 10 食盐浓度和腌制时间对二聚酪氨酸含量的影响  
Fig.10 Effects of salt concentration and curing time on dipoly tyrosine content

2.2.9 食盐浓度在腌制过程中对鸡肉肌原纤维蛋白二级结构的影响 蛋白质常见的二级结构可分为  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -转角、 $\beta$ -折叠和无规则卷曲<sup>[39]</sup>, 肌原纤维蛋白氧化使二级结构发生变化。红外光谱 1600~1700  $\text{cm}^{-1}$  范围内的酰胺 I 带, 多用来分析蛋白质二级结构的变化<sup>[40]</sup>。图 11 表示了不同浓度食盐液腌制下鸡肉肌原纤维蛋白二级结构相对含量的变化。从图 11 看出,  $\beta$ -转角含量和无规则卷曲含量整体基本无变化。 $\alpha$ -螺旋含量随着腌制时间延长不断增加,  $\beta$ -折叠含量有所下降, 如在 3.2% 食盐浓度腌制下-螺旋由 13.59% 增加至 17.96%,  $\beta$ -折叠由 61.81% 降低至 57.80%。可能是由于蛋白质氧化使其结构改变导致螺旋、折叠结构之间相互转化, 同时有研究表明羰基含量增加也会导致  $\alpha$ -螺旋含量增加。在不同腌制时间下, 食盐浓度增高  $\alpha$ -螺旋含量增加,  $\beta$ -折叠含量下降, 可能是由于食盐腌制使肌原纤维蛋白分子断裂, 导致多肽链重排, 对其二级结构具有破坏作用。总体而言, 食

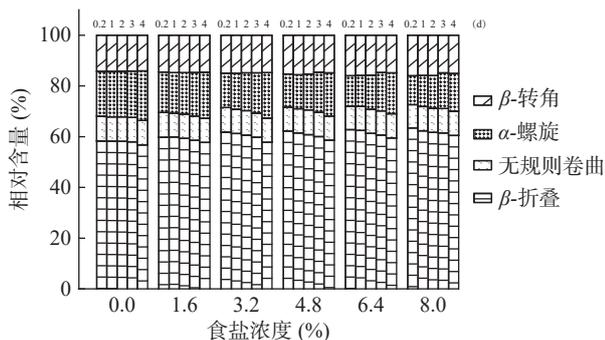


图 11 不同食盐浓度和腌制时间对二级结构的影响  
Fig.11 Effects of different salt concentration and curing time on secondary structure

盐腌制使肌原纤维蛋白二级结构发生变化, 导致部分  $\alpha$ -螺旋向  $\beta$ -折叠转化。

### 3 结论

通过对鸡肉和其肌原纤维蛋白相关指标变化的测定, 可以得出食盐的腌制会改变鸡肉持水性, 并对其肌原纤维蛋白的氧化有一定的促进作用, 导致其结构和功能特性改变。经不同浓度食盐液的腌制, 鸡肉水分含量基本不变, 持水性显著增大( $P<0.05$ ), 且食盐液浓度为 4.8% 时增大效果最显著。食盐的添加促进了鸡肉肌原纤维蛋白羰基和二聚酪氨酸含量的上升, 巯基含量的下降, 同时还会引起肌原纤维蛋白二级结构的改变导致部分  $\alpha$ -螺旋向  $\beta$ -折叠转化, 紫外吸收光谱的峰位蓝移, 热变性温度降低, 说明食盐具有一定的促进肌原纤维蛋白氧化的作用。此外, 在同一腌制时间下随着食盐液浓度的增大, 羰基含量先增大后减小, 巯基含量不断减小, 表面疏水性先上升后降低, 溶解度先下降后升高。在考虑食盐液浓度和腌制时间对鸡肉影响的同时, 还应结合环境微生物和蛋白酶的因素, 以期更全面的分析鸡肉各指标变化的原因。综上, 腌制工艺中食盐的添加会影响鸡肉肌原纤维蛋白氧化程度并改变其食用品质, 食盐液在 3.2%~4.8% 浓度范围内对肌原纤维蛋白特性变化的影响较大, 并且在腌制时间为 3 d 时鸡肉部分指标变化较明显, 所以选择合适的腌制液浓度和时间对鸡肉制品质量来说至关重要。

### 参考文献

- [1] 尹德凤, 向建军, 廖且根, 等. 宁都黄鸡鸡胸肉冷藏过程中营养品质的变化[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(10): 81-85. [YIN D F, XIANG J J, LIAO Q G, et al. Changes of nutrient quality of ningdu yellow chicken breast meat during cold storage[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(10): 81-85.]
- [2] UUSUNEN M, PUOLANNE E. Reducing sodium intake from meat products[J]. *Meat Science*, 2005, 70(3): 531-541.
- [3] 高子武, 吴丹璇, 王恒鹏, 等. 腌制方式对牛肉肌原纤维蛋白特性及水分分布的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(24): 179-186. [GAO Z W, WU D X, WANG H P. Effects of curing processing on myofibrillar protein characteristics and water distribution of beef[J]. *Food Fermentation Industries*, 2021, 47(24): 179-186.]
- [4] TOBIN B D, O'SULLIVAN M G, HAMILL R M, et al. The impact of salt and fat level variation on the physiochemical properties and sensory quality of pork breakfast sausages[J]. *Meat Science*, 2013, 93: 145-152.
- [5] SIKES A L, TOBIN A B, TUME R K. Use of high pressure to reduce cook loss and improve texture of low-salt beef sausage batters[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2009, 10: 405-412.
- [6] 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): 239-244. [CHEN H S, KONG B H, DIAO J J, et al. Functionality changes in muscle proteins induced by oxidation and control tech-

- nologies: a review[J]. *Food Science*, 2015, 36(11): 239–244. ]
- [ 7 ] FU X, LIN Q, XU S, et al. Effect of drying methods and antioxidants on the flavor and lipid oxidation of silver carp slices[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 61(1): 251–257.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] ESTEVEZ M, CAVA R. Lipid and protein oxidation, release of iron from heme molecule and colour deterioration during refrigerated storage of liver pté[J]. *Meat Science*, 2004, 68(4): 551–558.
- [ 10 ] DAMODARAN S, PARKIN K L, FENNEMA O R. Fennema's food chemistry[M]. Food Chemistry, 2007: 146–149.
- [ 11 ] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品中水分的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–2. [ National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 Determination of moisture in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1–2. ]
- [ 12 ] 许立兴, 关文强, 赵菲, 等. 冰温贮藏对鸡胸肉品质变化的影响[J]. *食品科技*, 2015, 40(11): 96–102. [ XU L X, GUAN W Q, ZHAO F, et al. Quality properties of chicken breasts during ice temperature storage[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(11): 96–102. ]
- [ 13 ] 李文博, 罗玉龙, 郭月英, 等. 苏尼特羊宰后成熟过程中肌原纤维蛋白特性与肉品质的变化分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(3): 48–55. [ LI W B, LUO Y L, GUO Y Y, et al. Analysis of changes in myofibrillar protein properties and meat quality during post-mortem aging of sunit sheep carcasses[J]. *Food Science*, 2021, 42(3): 48–55. ]
- [ 14 ] 周茹, 倪渠峰, 林伟伟, 等. 肌原纤维蛋白溶解度对盐离子浓度的依赖性[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(3): 32–39. [ ZHOU R, NI Q F, LIN W W, et al. The dependency of the myofibrils solubility on the ion concentration[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(3): 32–39. ]
- [ 15 ] 扶庆权, 张方刚, 宋尚新, 等. 包装方式对牛肉贮藏过程中蛋白质氧化及降解的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 308–314. [ FU Q Q, ZHANG W G, SONG S X, et al. Effects of different packaging methods on protein oxidation and degradation of beef during refrigeration storage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(18): 308–314. ]
- [ 16 ] 楼宵玮, 蒋娅婷, 潘道东, 等. 氯化钠对肌原纤维蛋白与风味物质相互作用的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(5): 74–79. [ LONG X W, JIANG Y T, PAN D D, et al. Effect of NaCl on the interaction of flavor compounds with myofibrillar proteins[J]. *Food Science*, 2017, 38(5): 74–79. ]
- [ 17 ] LANGE R, BALNY C. UV-visible derivative spectroscopy under high pressure[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2002, 1595(1/2): 80–93.
- [ 18 ] 李春强. 肌原纤维蛋白的氧化程度对谷氨酰胺转移酶催化交联作用的影响及其机理研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2013. [ LI C Q. Mechanism of transglutaminase-catalyzed cross-linking of oxidatively stressed myofibrillar[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013. ]
- [ 19 ] OLIVER C N, AHN B, MOERMAN E J, et al. Age-related changes in oxidized proteins[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(12): 5488–5491.
- [ 20 ] DAVIS K J. Protein damage and degradation by oxygen radicals. IV. Degradation and denaturated proteins[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(20): 9895–9901.
- [ 21 ] KUN Y, YUAN H Z, GUO J, et al. Low frequency magnetic field plus high pH promote the quality of pork myofibrillar protein gel: A novel study combined with low field nmr and raman spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2020: 326.
- [ 22 ] LIEN, HUONG, HUYNH, et al. Isolation and characterization of protein isolated from defatted cashew nut shell: Influence of pH and NaCl on solubility and functional properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 55(2): 621–626.
- [ 23 ] OLSSON G B, OFSTAD R, LDEMEL J B, et al. Changes in water-holding capacity of halibut muscle during cold storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2003, 36(8): 771–778.
- [ 24 ] 曹云刚, 马文慧, 艾娜丝, 等. 氧化强度对肌原纤维蛋白结构及凝胶性能的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 21–27. [ CAO Y G, MA W H, AI N S, et al. Effects of different oxidation intensities on the structure and gel properties of myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2019, 40(20): 21–27. ]
- [ 25 ] ZIDANI S, FAHLOUL D, BACHA A. Effects of pH, NaCl, ethanol and drying methods on the solubility of *Saccharomyces cerevisiae* proteins[J]. *CYTA - Journal of Food*, 2012, 10(1): 42–47.
- [ 26 ] 程述震, 王晓拓, 张洁, 等. 电子束剂量率对牛肉蛋白结构和理化性质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 150–156. [ CHENG S Z, WANG X T, ZHANG J, et al. Effect of electron beam dose rate on myofibrillar protein structure and physicochemical characteristics of chilled beef[J]. *Food Science*, 2018, 39(3): 150–156. ]
- [ 27 ] GRUNE T, JUNG T, MERKER K, et al. Decreased proteolysis caused by protein aggregates, inclusion bodies, plaques, lipofuscin, ceroid, and 'aggresomes' during oxidative stress, aging and disease[J]. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2004, 36(12): 2519–2530.
- [ 28 ] HIROSE Y, FUJITA T, ISHII T, et al, et al. Antioxidative properties and flavonoid composition of *Chenopodium quinoa* seeds cultivated in Japan[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(4): 1300–1306.
- [ 29 ] WANG Z, HE Z, GAN X, et al. The effects of lipid oxidation product acrolein on the structure and gel properties of rabbit meat myofibrillar proteins[J]. *Food Biophysics*, 2018, 13(4): 1–13.
- [ 30 ] 管军军. 微波合成大豆蛋白-糖接枝物机理、结构及功能性 [D]. 无锡: 江南大学, 2005. [ GUAN J J. Mechanism, conformation and functional properties of soy protein-saccharide grafts synthesized by microwave[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005. ]
- [ 31 ] 姜国川, 王丽岩, 刘亚春, 等. 改性处理对猪肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(19): 89–95. [ JIANG G C, WANG L Y, LIU Y C, et al. Effect of modification on the structure and gel properties of porcine myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2019, 40(19): 89–95. ]
- [ 32 ] 叶凤凌, 池玉闽, 周敏之, 等. 氧化对兔肉肌原纤维蛋白结构、乳化性和凝胶性的影响研究 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 22–30. [ YE F L, CHI Y M, ZHOU M Z, et al. Effect of oxidation on the structure, emulsification and gelability of rabbit

- meat myofibrillar protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(24): 22-30. ]
- [ 33 ] XIONG Y L, PARK D, OOIZUMI T. Variation in the cross-linking pattern of porcine myofibrillar protein exposed to three oxidative environments[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2009, 57(1): 153-159.
- [ 34 ] 赵亚南,张牧焜,王道营,等.氯化钠对鸡肉冷藏过程中肌原纤维蛋白氧化的影响[J].*肉类研究*, 2020, 34(8): 1-7. [ ZHAO Y N, ZHANG M H, WANG D Y, et al. Effects of sodium chloride on myofibrin protein oxidation during cold storage[J]. *Meat Research*, 2020, 34(8): 1-7. ]
- [ 35 ] 李晨伊.亚硝酸钠对西式火腿中肌原纤维蛋白氧化影响的研究[D].咸阳:西北农林科技大学, 2016. [ LI C Y. Research on the effect of myofibrillar protein oxidation in ham by nitrosation[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2016. ]
- [ 36 ] 李学鹏,周凯,王金厢,等.羟自由基对六线鱼肌原纤维蛋白的氧化规律[J].*中国食品学报*, 2014, 14(6): 19-27. [ LI X P, ZHOU K, WANG J X, et al. Effects of hydroxyl radical oxidation system on myofibrillar protein structure and properties in *Hexagrammos Otakii*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(6): 19-27. ]
- [ 37 ] 李玲,季慧,康大成,等.氧化条件下茶多酚对猪肉肌原纤维蛋白理化和凝胶特性的影响[J].*食品科学*, 2019, 40(2): 12-17. [ LI L, JI H, KANG D C, et al. Effect of tea polyphenols on physicochemical and gel properties of pork myofibrillar protein under oxidative conditions[J]. *Food Science*, 2019, 40(2): 12-17. ]
- [ 38 ] 李学鹏,周凯,王金厢,等.自由基氧化对大黄鱼肌原纤维蛋白交联和聚集的影响[J].*中国食品学报*, 2015, 15(4): 13-21. [ LI X P, ZHOU K, WANG J X, et al. Effects of radical oxidation on the cross-linking pattern of myofibrillar protein in large yellow croaker (*Pseudosciaena Crocea*)[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(4): 13-21. ]
- [ 39 ] 张海璐,黄翔,杨燃,等.氧化对羊肉肌原纤维蛋白分子与理化特性的影响[J].*食品科学*, 2020, 41(23): 8-14. [ ZHANG H L, HUANG X, YANG R, et al. Effect of oxidation on molecular and physicochemical properties of mutton myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 8-14. ]
- [ 40 ] 蔡梦洁.恒功率微波处理牛肉肌原纤维蛋白对风味物质吸附能力研究[D].广州:华南理工大学, 2019. [ CAI M J. Effects of constant power microwave on the binding ability of myofibrillar protein from beef to flavor compounds[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. ]