

# 组氨酸与氯化钾混合液对兔肉肌球蛋白特性的影响

赵晓阳, 李 可, 邹玉峰, 徐幸莲\*, 周光宏

(南京农业大学 教育部肉品加工与质量控制重点实验室, 江苏 南京 210095)

**摘 要:**目的: 研究组氨酸与氯化钾混合液对肌球蛋白溶出率、聚集特性和热凝胶特性的影响。方法: 提取纯化兔腰大肌肌球蛋白, 并用含有组氨酸的盐溶液透析处理, 测定不同离子强度条件下蛋白溶出率、浊度以及热诱导凝胶的硬度和保水性 (water holding capacity, WHC)。结果: 经组氨酸处理后, 在低离子强度 (1 mmol/L KCl) 条件下肌球蛋白的溶出率从17.2%提高到64.4%, 聚集程度显著下降, 热凝胶的硬度和保水性显著提高 ( $P < 0.05$ ); 而在生理离子强度 (0.15 mol/L KCl) 和高离子强度 (0.6 mol/L KCl) 条件下肌球蛋白的溶出率和聚集特性均未受组氨酸处理的影响, 但其热凝胶硬度值显著降低 ( $P < 0.05$ ); 虽然在高离子强度条件下肌球蛋白热凝胶的保水性显著降低 ( $P < 0.05$ ), 但是在生理离子强度条件下凝胶保水性没有发生变化。结论: 组氨酸处理可以显著增强低离子强度条件下肌球蛋白溶出率及其热凝胶形成能力, 是低钠凝胶类肉制品生产和研发的一个新思路。

**关键词:** 肌球蛋白; 组氨酸; 溶出率; 浊度; 凝胶特性

## Effect of Mixed Solutions of *L*-Histidine and KCl on Heat-Induced Gel Properties of Rabbit Skeletal Myosin

ZHAO Xiao-yang, LI Ke, ZOU Yu-feng, XU Xing-lian\*, ZHOU Guang-hong

(Key Laboratory of Meat Processing and Quality Control, Ministry of Education, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Objective: To study the combined effect of *L*-histidine and KCl on myosin solubility, aggregation and heat-induced gel properties. Methods: Rabbit *Psoas* major myosin was extracted and purified. After dialysis against different concentrations of KCl (1, 150 and 600 mmol/L) in the presence of *L*-histidine, it was measured for solubility, turbidity and heat-induced gel properties at different ionic strengths. Results: After *L*-histidine treatment, the solubility of rabbit meat myosin in a low ionic strength solution (1 mmol/L KCl) increased from 17.2% to 64.4%, and this is accompanied by a significant decrease in the extent of aggregation and a significant increase in the hardness and water-holding capacity (WHC) of heat-induced gels ( $P < 0.05$ ). Nevertheless, at both physiological (0.15 mol/L KCl) and high ionic (0.6 mol/L KCl) strength, neither myosin solubility nor aggregation was affected by the presence of *L*-histidine in dialysis, although a significant decrease in the hardness of heat-induced gels was observed ( $P < 0.05$ ). The WHC of heat-induced gels showed a significant reduction at high ionic strength, but exhibited no change at physiological ionic strength. Conclusion: *L*-histidine treatment can result in a significant increase in myosin solubility and heat-induced gel properties at low ionic strength conditions. This may provide new insights for developing low sodium gel-type meat products.

**Key words:** myosin; *L*-histidine; solubility; aggregation; gel properties

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2014) 09-0006-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201409002

肉制品是人类必需氨基酸的重要来源。肌肉蛋白可以分为高盐溶蛋白, 低盐溶蛋白和不溶性蛋白。高盐溶蛋白主要包括肌原纤维蛋白 (肌球蛋白、肌动蛋白、肌球蛋白、原肌球蛋白等), 低盐溶蛋白主要指肌红蛋白、肌浆蛋白和一些水溶性蛋白, 不溶性蛋白通常为结

缔组织蛋白<sup>[1-2]</sup>。肌球蛋白是肉中的主要蛋白<sup>[3-5]</sup>, 约占肌肉总蛋白的1/3, 占肌原纤维蛋白的50%~55%, 有很好的三维凝胶结构形成能力<sup>[6]</sup>。肌球蛋白通常被认为只在高离子强度条件下溶解, 这限制了肌球蛋白的加工特性, 也不利于低钠肉制品的生产和研发<sup>[7]</sup>。如果肌球蛋白能

收稿日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31171707)

作者简介: 赵晓阳 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为肉品加工与质量控制。E-mail: 2011108045@njau.edu.cn

\*通信作者: 徐幸莲 (1962—), 女, 教授, 博士, 研究方向为肉品加工与质量控制。E-mail: xlxu@njau.edu.cn

够在低离子强度条件下溶解并具有热凝胶形成能力和保水性,则为显著降低凝胶类肉制品中的食盐添加量提供了可能<sup>[8]</sup>。韩敏义等<sup>[9]</sup>研究了pH值、离子强度、温度等对兔肉肌球蛋白溶出率和浊度的影响,发现溶出率随离子强度增大而升高,浊度随离子强度升高而下降。徐幸莲等<sup>[10]</sup>研究了蛋白浓度、pH值、离子强度对兔肉肌球蛋白热凝胶特性的影响,发现在一定离子强度范围内,肌球蛋白凝胶硬度和保水性随离子强度升高而增大。本课题组前期研究曾发现组氨酸处理可以增强低离子强度条件下肌球蛋白的溶出率,有研究也曾发现过类似现象<sup>[8,11]</sup>,但对组氨酸处理后不同离子强度条件下肌球蛋白分子的溶解性、纤维形成和加工特性的相关性研究目前未见报道。因此本实验以兔骨骼肌肌球蛋白为实验材料,研究组氨酸处理对不同离子强度条件下肌球蛋白溶出率、浊度和热凝胶特性的影响,以探索肌球蛋白低钠热凝胶形成的新途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

兔肉采集自江苏省农业科学院种兔场的3月龄雄性新西兰白兔(2~2.5 kg)。

KCl、K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、组氨酸等均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

Waring Blender 8010ES小型绞肉机 美国Waring公司; Ultra-Turrax T25 basic匀浆机 德国IKA公司; AUY120分析天平 日本岛津公司; J-A型落地式、AR64型台式离心机 美国Beckman Coulter公司; TA-XT2i质构仪 英国Stable Micro System公司; 211型pH计 意大利Hanna公司; DHG9140A烘箱 上海三发科学仪器公司; WFJ2100型可见分光光度计 上海尤尼可公司; ZKSY-600智能恒温水箱 南京科尔仪器设备有限公司; 冷库操作间 上海锐欧冷冻设备有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 肌球蛋白提取纯化

健康的雄性新西兰白兔,宰前充分休息过夜,以减少应激。机械击昏后切断颈部血管,充分放血,迅速剥皮,去头、内脏、爪。先后用自来水、蒸馏水冲洗以去除血迹。腰大肌剥离后置于-10℃冷却0.5 h使其迅速冷却,剔除可见脂肪和结缔组织,切碎后称质量。用高速组织捣碎机搅打约30 s,在0~4℃条件下提取肌球蛋白,参照Wang Shufang等<sup>[12]</sup>的方法,将纯化的肌球蛋白溶解在0.6 mol/L KCl溶液(pH 6.5, 20 mmol/L磷酸缓冲液)中,低温搅拌透析24 h,中间换两次透析液。透析后的肌球蛋白贮存于0~4℃,在1周内使用。若非注明,所有实验均在低温(4℃)条件下操作。

#### 1.3.2 组氨酸处理肌球蛋白

文献中有关组氨酸处理对肌球蛋白的相关报道<sup>[8]</sup>以及本实验前期实验结果均表明,氯化钾溶液中添加浓度为5 mmol/L的组氨酸,对肌球蛋白溶出率及其聚集特性的影响最大。因此,本实验在低温搅拌条件下,用含有5 mmol/L组氨酸的KCl溶液(浓度分别为0.001、0.15、0.6 mol/L)对制备的肌球蛋白透析24 h,中间换3次透析液。以不含组氨酸的KCl溶液为空白对照。

#### 1.3.3 蛋白含量测定

采用双缩脲法测定蛋白含量,以牛血清白蛋白(bovine serum albumin, BSA)作为标准蛋白。

#### 1.3.4 肌球蛋白溶出率的测定

蛋白溶液在4℃, 5 000×g离心15 min。取上清液测其蛋白含量。按照式(1)计算肌球蛋白溶出率。

$$\text{肌球蛋白溶出率}/\% = \frac{\text{离心后上清液中蛋白含量}}{\text{离心前蛋白含量}} \times 100 \quad (1)$$

#### 1.3.5 聚集特性测定(浊度)

取肌球蛋白溶液稀释到2 mg/mL,室温(25℃)放置20 min后,测在波长340 nm处的吸光度 $A_{340 \text{ nm}}$ <sup>[9]</sup>。

#### 1.3.6 肌球蛋白热凝胶制备

将透析得到的肌球蛋白溶液调整到10 mg/mL,取2 mL置于5 mL离心管中,水浴中以1℃/min升温速率从20℃升至70℃,70℃保温20 min,然后在4℃条件下过夜(12 h)。

#### 1.3.7 凝胶硬度测定

利用质构仪的Return to Start模式测定凝胶硬度,使用探头为P/0.5S。质构分析参数设定:测试前探头下降速率1 mm/s,测试速率1 mm/s,测试后探头上升速率10 mm/s,穿刺测试距离为10 mm,感应力5 g,用质构仪自带的软件Texture Expert English 1.22中的TPAFRAC.MAC过程进行分析<sup>[13-14]</sup>,计算出凝胶硬度。每个处理做3组平行。

#### 1.3.8 凝胶保水性测定

装入肌球蛋白凝胶的离心管准确称质量为 $m_1$ ;4℃条件下10 000×g离心5 min,用吸水纸擦干后再次称质量为 $m_2$ ,离心管质量为 $m_0$ 。按照式(2)计算凝胶保水性。

$$\text{保水性}/\% = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (2)$$

### 1.4 统计分析

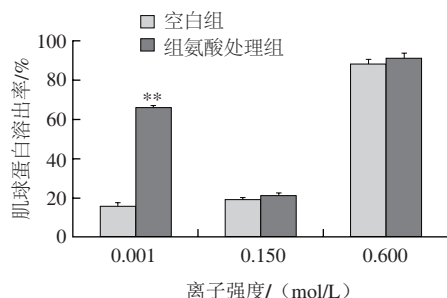
数据均用SAS8.2处理,采用ANOVA分析方差,并用Student's *t*-检验进行差异显著性分析( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 组氨酸对肌球蛋白溶出率的影响

由图1可知,低离子强度(1 mmol/L KCl)溶液中肌球蛋白溶出率低,添加组氨酸可使其溶出率从17.2%提高

到64.4% ( $P<0.01$ )；而在生理离子强度 (0.15 mol/L) 溶液中，肌球蛋白溶出率也很低 (19.2%)，但添加组氨酸并未显著提高其溶出率；在高离子强度 (0.6 mol/L) 溶液中，肌球蛋白溶出率较大 (88.0%)，添加组氨酸也未显著增加其溶出率。肌球蛋白在高离子强度下形成分散的单体，处于可溶状态，因此溶出率较大。而在生理离子强度条件下自发聚集形成纤维，溶出率很小<sup>[9]</sup>。添加组氨酸后，在低离子强度条件下，会使肌球蛋白形成的肌丝发生解体，促进蛋白溶解。而在生理离子强度条件下，不会导致肌丝解体<sup>[15-16]</sup>，因此肌球蛋白溶出率未发生显著变化。

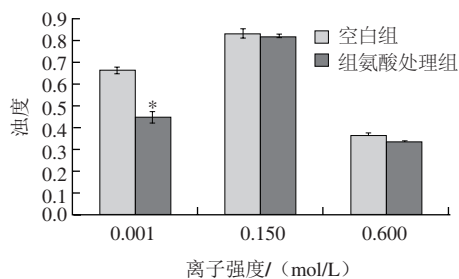


\*\*与空白组相比，差异极显著 ( $P<0.01$ )。下同。

图1 不同离子浓度下组氨酸对肌球蛋白溶出率的影响

Fig.1 Effect of L-histidine treatment on the solubility of rabbit skeletal myosin at different ionic strengths

## 2.2 组氨酸对肌球蛋白聚集特性的影响

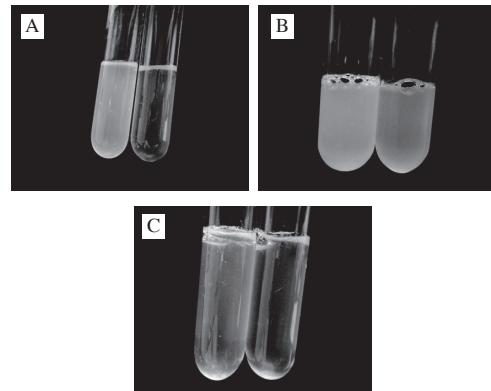


\*与空白组相比，差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

图2 不同离子浓度下组氨酸对肌球蛋白聚集特性(浊度)的影响

Fig.2 Effect of L-histidine treatment on aggregation (turbidity) properties of rabbit skeletal myosin at different ionic strengths

由图2、3可知，肌球蛋白聚集能力在生理离子强度 (0.15 mol/L) 条件下最大，在低离子强度 (0.001 mol/L) 条件下次之，在高离子强度 (0.6 mol/L) 条件下最小。添加组氨酸后，低离子强度溶液浊度显著下降 ( $P<0.05$ )，溶液变得澄清透明；而另外两组浊度未发生显著变化。肌球蛋白在低离子强度条件下形成细丝状多聚物，导致浊度较大；而在高离子强度下形成分散的单体，难以形成丝状体，因此浊度较小<sup>[17]</sup>。添加组氨酸后，在低离子强度条件下，肌球蛋白丝状体发生解体，导致浊度降低；而生理强度下，肌球蛋白丝状体依然存在，因而浊度未发生显著降低<sup>[15]</sup>。



A. 0.001 mol/L KCl; B. 0.15 mol/L KCl; C. 0.6 mol/L KCl; 左侧试管. 未添加组氨酸; 右侧试管. 添加组氨酸。

图3 不同离子强度肌球蛋白溶液

Fig.3 Myosin solutions with different ionic strengths

## 2.3 组氨酸对肌球蛋白凝胶硬度的影响

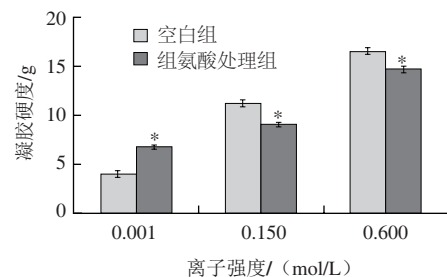


图4 不同离子浓度下组氨酸对肌球蛋白凝胶硬度的影响

Fig.4 Effect of L-histidine treatment on the hardness of heat-induced myosin gels at different ionic strengths

由图4可知，高离子强度条件下肌球蛋白凝胶硬度值最高，为16.56 g。添加组氨酸后，低离子强度组肌球蛋白凝胶硬度显著增大 ( $P<0.05$ )，达到6.71 g；而另外两组凝胶硬度显著减小 ( $P<0.05$ )，分别为8.98 g和14.68 g。在0~0.4 mol/L范围内，肌球蛋白凝胶硬度会随着离子强度的增加而变大<sup>[18]</sup>。添加组氨酸后，肌球蛋白在低离子强度条件下的溶出率增大，蛋白分子在溶液中分布均匀，疏水侧链等主要功能基团受热解折叠后容易发生广泛的分子间交联，从而增加蛋白分子间的凝聚强度<sup>[19-20]</sup>，使肌球蛋白凝胶硬度增大；但是在高离子强度条件下，可能并不利于肌球蛋白的分子构象或存在状态，凝胶形成时分子交联强度减弱<sup>[15]</sup>，导致肌球蛋白凝胶的硬度减小。

## 2.4 组氨酸对肌球蛋白凝胶保水性的影响

由图5可知，组氨酸处理前，不同离子强度下保水性由高到低分别为16.3%、26.2%和47.0%。添加组氨酸后，高离子强度条件下，肌球蛋白凝胶保水性显著降低 ( $P<0.05$ )，保水性为40.7%；生理离子强度条件下，凝胶保水性未发生显著变化；而在低离子强度条件下，肌球蛋白凝胶保水性显著增加 ( $P<0.05$ )，为19.3%。



肌球蛋白在低离子强度条件下以纤丝形式存在,形成的凝胶网络结构多孔性差,所以保水性差<sup>[21-22]</sup>。高离子强度条件下,肌球蛋白以单体形式存在,故在加热变性后先形成凝聚颗粒,再交联成比较均一的网络,多孔性佳,从而由于毛细管张力的作用使凝胶具有更好的持水力<sup>[11,23]</sup>。添加组氨酸后,低离子强度条件下肌球蛋白溶出率增加,凝胶交联作用增大,凝胶网络中包含的自由水较多,保水性增强<sup>[21]</sup>;而在高离子强度条件下,未改善肌球蛋白的三维凝胶网络形成能力和凝胶保水能力。

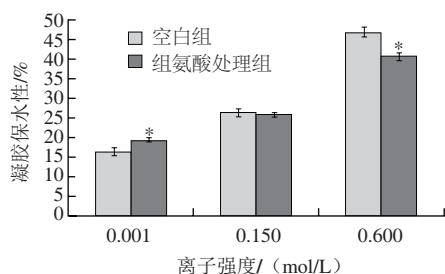


图5 不同离子浓度下组氨酸对肌球蛋白凝胶保水性的影响

Fig.5 Effect of L-histidine treatment on the water-holding capacity of heat-induced myosin gels at different ionic strengths

### 3 讨论

肌球蛋白是肌肉中含量最高也是最重要的蛋白质,它的溶出率等生化特性以及热诱导凝胶形成等加工特性决定了切片火腿等凝胶类肉制品的微结构和黏弹性。Westphalen等<sup>[5]</sup>和Lesiow等<sup>[7]</sup>以及前期研究表明<sup>[2,9]</sup>,0.1~0.4 mol/L离子强度范围内,单体或肉糜体系中的肌球蛋白溶出率随离子强度增大显著升高,离子强度继续升高,溶出率无显著变化。本实验也得到相同结果。低离子强度条件下肌球蛋白分子自发聚集形成均一的纤丝结构,溶出率小,但是经组氨酸处理后肌球蛋白溶出率显著增大,说明这种形成纤丝的特性被破坏。不过值得注意的是,本实验中低离子强度下兔肉肌球蛋白溶出率增加效果没有Hayakawa等<sup>[8]</sup>的实验结果显著,这应该是原料肉种类的差异,兔肉等哺乳动物与鸡肉等禽肉的肌球蛋白分子虽属同分异构体,但在氨基酸组成和空间构型均存在差异,导致组氨酸处理对溶出率的影响程度不同。

高离子强度条件下肌球蛋白会从肌纤维解离,以单体或低聚体的溶解态存在,而低离子强度和生理离子强度条件下肌球蛋白以纤丝形式存在,溶出率低,浊度值高。本实验发现低离子强度组浊度小于生理离子强度组,和相关文献报道<sup>[9]</sup>稍有差异。早期研究表明,肌球蛋白分子在零或高于0.3 mol/L的离子强度条件下溶解,这说明0~0.15 mol/L离子强度范围内,肌球蛋白溶出率应该不是持续增加的趋势,本实验结果支持该结论。组氨

酸处理后,低离子强度组的浊度显著降低,但生理离子强度和高离子强度组的浊度未发生改变,说明组氨酸处理与离子强度存在交互作用,组氨酸改变低强度条件下肌球蛋白分子的存在状态,进而影响其热凝胶形成等加工特性。

凝胶强度的测试结果表明,离子强度高,肌球蛋白热诱导凝胶的硬度值大。这是阐释现代肌肉蛋白热凝胶形成机制的实验基础:离子强度高,肌球蛋白等盐溶性蛋白溶解,在肉糜体系中形成均一的三维溶胶网络结构,加热使更多的疏水交联和二硫键形成,黏性的溶胶变成硬度和弹性值更大的凝胶。组氨酸处理后,低离子强度组的凝胶硬度值显著增大,而另外两组则显著降低( $P<0.05$ ),这和溶出率的变化趋势一致。组氨酸处理对肌球蛋白最直接影响是溶出率的变化,低离子强度条件下溶出率增加,蛋白分子在体系中均匀分布,加热过程中更多的疏水基团和活性巯基暴露,从而形成的凝胶网络结构致密,硬度也显著增加<sup>[15]</sup>。而在生理离子强度和高离子强度条件下,组氨酸处理并未增强肌球蛋白分子的溶出率,组氨酸的存在或肌球蛋白与组氨酸的结合反而会不利于加热过程中肌球蛋白分子的解折叠或分子间的交联,活性巯基等功能基团的交联作用减弱,导致凝胶硬度降低。

肌肉蛋白的热诱导凝胶过程主要经两步完成:首先是蛋白变性发生解折叠,活性功能基团暴露;随后这些基团之间发生新的交联从而形成三维凝胶网络结构<sup>[18]</sup>。高离子强度条件下肌球蛋白以溶解态存在,加热后相互交联形成的凝胶网络多孔性佳,凝胶保水力高,而低离子强度和生理离子强度条件下肌球蛋白以纤丝状态存在,加热过程中分子解折叠程度有限,而且蛋白-蛋白分子结合远高于蛋白-水分子的结合而且加热过程中分子解折叠程度有限,胶凝时难以形成均一致密的凝胶体,凝胶孔洞较大,因此无法保持较多水分<sup>[24-26]</sup>。但是低离子强度下经组氨酸处理后,纤丝结构破坏,蛋白-水分子之间的结合增多,凝胶保水性显著改善( $P<0.05$ );而生理离子强度和高离子强度下,组氨酸处理并未改善蛋白-蛋白与蛋白-水分子的结合平衡,凝胶保水性没有变化甚至会显著降低( $P<0.05$ )。

Krishnamurthy等<sup>[27]</sup>和Hayakawa等<sup>[8]</sup>研究发现,调整pH值、添加低浓度钙盐或组氨酸处理不仅会改变肌球蛋白分子杆状区域的长度,也会改变杆部区域的构象变化,这说明组氨酸处理对肌球蛋白溶解程度、纤丝聚集以及热凝胶特性的影响可能是通过改变肌球蛋白的分子结构实现的,产生这些影响的本质原因值得进一步探讨。

高钠食品存在的对健康不利的影响逐渐为消费者和农业食品行业所关注,而肌球蛋白的高盐溶解特性限制了低钠肉制品的生产和研发。尽管本实验中组氨酸处

理后低离子强度组肌球蛋白的凝胶强度和保水性仍显著低于高离子强度组, 但该处理确实可增大肌球蛋白在低离子强度下的溶出率, 并可显著改善其凝胶强度和保水性。后续研究中通过配方的调整和加工工艺的改进, 有助于进一步改善肌球蛋白在低离子强度条件下的热凝胶形成能力, 并有利于充分探索肌球蛋白的低钠热凝胶形成机制。

#### 4 结 论

不同离子强度条件下, 组氨酸处理对原料肉肌球蛋白的生化特性和热加工特性的影响存在显著差异。组氨酸处理可以显著增加肌球蛋白在低离子强度溶液中的溶出率, 显著降低其聚集特性, 并且可以显著提高肌球蛋白热凝胶的硬度和保水性。组氨酸处理不影响生理离子强度和高离子强度条件下肌球蛋白溶出率和聚集特性, 也不会改变生理离子强度条件下肌球蛋白热凝胶的保水性, 但会使高离子强度组的保水性降低, 并且显著降低两组的热凝胶硬度值。

#### 参考文献:

- [1] 李继红, 彭增起. 温度、盐浓度和pH对盐溶蛋白质热诱导凝胶影响的研究[J]. 肉类工业, 2004(4): 39-41.
- [2] 费英, 韩敏义, 杨凌寒, 等. pH对肌原纤维蛋白二级结构及其热诱导凝胶特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 164-170.
- [3] FUKUSHIMA H, SATOH Y, YOON S H, et al. Rheological properties of fast skeletal myosin rod and light meromyosin from walleye Pollack and white croaker: contribution of myosin fragments to thermal gel formation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(23): 9193-9198.
- [4] HIGUCHI T, OJIMA T, NISHITA K, et al. Heat-induced structural changes and aggregation of walleye Pollack myosin in the light meromyosin region[J]. Fisheries Science, 2002, 68(5): 1145-1150.
- [5] WESTPHALEN A D, BRIGGS J L, LONERGAN S M, et al. Influence of muscle type on rheological properties of porcine myofibrillar protein during heat-induced gelation[J]. Meat Science, 2006, 72: 697-703.
- [6] 周光宏, 徐幸莲, 彭增起. 肉品科学研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(3): 1-10.
- [7] LESIOW T, XIONG Youling L. Chicken muscle homogenate gelation properties: effect of pH and muscle fiber type[J]. Meat Science, 2003, 64(4): 399-403.
- [8] HAYAKAWA T, ITO T, WAKAMATSU J, et al. Myosin is solubilized in a neutral and low ionic strength solution containing L-histidine[J]. Meat Science, 2009, 82: 151-154.
- [9] 韩敏义, 林丽军, 徐幸莲, 等. 兔骨骼肌肌球蛋白溶液浊度和溶解度研究[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(4): 93-96.
- [10] 徐幸莲, 黄鸿兵, 林丽军, 等. 蛋白质浓度、pH值、离子强度对兔骨骼肌肌球蛋白热凝胶特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2004, 20(3): 159-163.
- [11] FENG Yuming, HULTIN H O. Effect of pH on the rheological and structural properties of gels of water-washed chicken-breast muscle at physiological ionic strength[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(8): 3927-3935.
- [12] WANG Shufang, SMITH D M. Heat-induced denaturation and rheological properties of chicken breast myosin and F-actin in the presence and absence of pyrophosphate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1994, 42(12): 2665-2670.
- [13] SUN Jingxin, WU Zhen, LI Ping, et al. Effect of peanut protein isolate on functional properties of chicken salt-soluble proteins from breast and thigh muscles during heat-induced gelation[J]. Meat Science, 2012, 91(1): 88-92.
- [14] BALANGE A K, BENJAKUL S. Effect of oxidised tannic acid on the gel properties of mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) mince and surimi prepared by different washing processes[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23: 1693-1701.
- [15] HAYAKAWA T, ITO T, WAKAMATSU J, et al. Myosin filament depolymerizes in a low ionic strength solution containing L-histidine[J]. Meat Science, 2010, 84, 742-746.
- [16] ITO Y, TATSUMI R, WAKAMATSU J, et al. The solubilization of myofibrillar proteins of vertebrate skeletal muscle in water[J]. Animal Science Journal, 2003, 74: 417-425.
- [17] ZACHARY H, PARK J W. Rheological and biochemical characterization of salmon myosin as affected by constant heating rate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 76(2): 343-349.
- [18] 杨龙江, 南庆贤. 肌肉蛋白质的热诱导凝胶特性及其影响因素[J]. 肉类工业, 2001(10): 39-42.
- [19] 白云, 钟国良, 周光宏, 等. 蛋白浓度对兔腰大肌肌球蛋白热凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 83-86.
- [20] Nowsad A A, KANO H, NIWA E. Thermal gelation characteristics of breast and thigh muscles of spent hen and broiler and their surimi[J]. Meat Science, 2000, 54: 169-175.
- [21] LEFEVRE F, FAUCONNEAU B. Thermal denaturation and aggregation properties of Atlantic Salmon myofibrils and myosin from white and red muscles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(12): 4761-4770.
- [22] 韩敏义, 费英, 徐幸莲, 等. 低场NMR研究pH对肌原纤维蛋白热诱导凝胶的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2098-2104.
- [23] BERTRAM H C, KRISTENSEN M, ANDERSEN H J. Functionality of myofibrillar proteins as affected by pH, ionic strength and heat treatment—a low-field NMR study[J]. Meat Science, 2004, 68(2): 249-256.
- [24] LIU Ru, ZHAO Siming, XIE Bijun, et al. Contribution of protein conformation and intermolecular bonds to fish and pork gelation properties[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 898-906.
- [25] LIU Ru, ZHAO Siming, LIU Yuanming, et al. Effect of pH on the gel properties and secondary structure of fish myosin[J]. Food Chemistry, 2010, 121(1): 196-202.
- [26] XIA Xiufang, KONG Baohua, XIONG Youling, et al. Decreased gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from repeatedly frozen-thawed porcine longissimus muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation[J]. Meat Science, 2010, 85(3): 481-486.
- [27] KRISHNAMURTHY G, CHANG Haisheng, HERBERT O, et al. Solubility of chicken breast muscle proteins in solutions of low ionic strength[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(2): 408-415.