

doi: 10.12131/20190170

文章编号: 2095-0780-(2020)03-0119-06

• 综述 •

## 红色肉贮藏期间肌红蛋白与肉色变化研究进展

黄卉<sup>1</sup>, 孙申宇<sup>1,2</sup>, 魏涯<sup>1</sup>, 李来好<sup>1</sup>, 杨贤庆<sup>1</sup>, 郝淑贤<sup>1</sup>,  
岑剑伟<sup>1</sup>, 赵永强<sup>1</sup>, 陈胜军<sup>1</sup>, 林织<sup>3</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/国家水产品加工技术研发中心/农业农村部水产品加工重点实验室, 广东广州 510300; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;  
3. 广东顺欣海洋渔业集团有限公司, 广东阳江 529800)

**摘要:** 肉色是反映肉类品质最直观指标, 其在贮藏期间的变化与品质的相关性是近年的研究热点。文章综述了肌红蛋白与肉色变化的关系及主要影响因素, 以及线粒体通过影响肌红蛋白的存在形式对肉色的调控作用, 旨在为贮藏过程中的肉色保鲜技术提供理论基础。

**关键词:** 肉色; 变化机制; 肌红蛋白; 线粒体; 蛋白质组学

中图分类号: TS 254.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research progress on color transformation of red meat during storage

HUANG Hui<sup>1</sup>, SUN Shenyu<sup>1,2</sup>, WEI Ya<sup>1</sup>, LI Laihao<sup>1</sup>, YANG Xianqing<sup>1</sup>, HAO Shuxian<sup>1</sup>,  
CEN Jianwei<sup>1</sup>, ZHAO Yongqiang<sup>1</sup>, CHEN Shengjun<sup>1</sup>, LIN Zhi<sup>3</sup>

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/National R&D Center for Aquatic Product Processing/Key Laboratory of Aquatic Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China;  
2. College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 2013306, China;  
3. Guangdong Shunxin Ocean Fishery Group Co. Ltd., Yangjiang 529800, China)

**Abstract:** Meat color is the most direct index of meat quality, and the correlation between its changes during storage and quality has been a hotspot in recent years. The paper reviews the relationship between myoglobin and meat color change, discusses the main influencing factors, and investigates the mitochondrial regulation of meat color by affecting the presence of myoglobin. The review provides a theoretical basis for the preservation technology of meat color during storage.

**Key words:** Meat color; Change mechanism; Myoglobin; Mitochondria; Proteomics

中国肉类总产量居世界第一, 2017 年人均肉类占有量为 61.7 kg, 超过世界平均水平<sup>[1]</sup>。肉色是消费者购买肉类产品时判断品质最直观, 最敏感的指标, 同时也是肉类产品货架期管理的重要指标。

宰后红色肉呈色主要来自于体内的肌红蛋白。肌红蛋

白一般有 3 种存在形式: 脱氧肌红蛋白(Deoxymyoglobin, DeoMb)、氧合肌红蛋白(Oxymyoglobin, OxyMb)、高铁肌红蛋白(Metmyoglobin, MetMb), 这三者之间的比例决定了肉的颜色呈现<sup>[2]</sup>。刚被屠宰的肌肉中, 肌红蛋白为还原态的 DeoMb, 显示为紫红色, 而后在贮藏初期氧气(O<sub>2</sub>)充

收稿日期: 2019-09-20; 修回日期: 2020-01-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(31601533); 国家现代农业(特色淡水鱼)产业技术体系建设专项(CARS-46); “扬帆计划”引进创新创业团队专项资助(2015YT02H109); 广东省重点领域研发计划项目(2019B020225001)

作者简介: 黄卉(1980—), 女, 博士, 副研究员, 从事水产品加工与质量安全研究。E-mail: huanghuigd@aliyun.com

足,肌红蛋白转化为 OxyMb,肉品表现为受消费者喜爱的鲜红色<sup>[3]</sup>,随着贮藏时间的延长,肌红蛋白被氧化为褐色的 MetMb,肉品发生褐变,会被消费者认为肉质已经腐败<sup>[4]</sup>。肌红蛋白的变化受到诸多因素的影响,如 pH、温度、贮藏时间、致死方式、脂质的过氧化程度、氧分压、离子与化学物质等,这些因素主要通过改变 MetMb 还原酶活性和肌红蛋白结合氧能力等方式,影响肌红蛋白在不同形态间的转化<sup>[5]</sup>。线粒体的氧化还原作用是导致肉色变化的内在因素<sup>[6]</sup>。线粒体内的脯氨酸羟化酶和低氧诱导因子对肌红蛋白的表达具有正向调控作用,线粒体呼吸中间产物对 MetMb 的还原具有促进作用<sup>[7]</sup>。贮藏时间的延长会导致线粒体数量减少、结构受损及膜电位降低,从而使 OxyMb 含量减少而导致肉色的改变<sup>[8]</sup>。高压处理、气调包装、添加剂等可以提高肉色稳定性。本文阐述了肌红蛋白的性质、呈色机理及影响因素,并对线粒体对肉色的调控作用进行讨论,旨在为贮藏过程中的肉色保鲜技术提供理论基础。

## 1 肌红蛋白与肉色变化的关系

肌肉能够呈现红色的原因主要是色素,色素主要以肌红蛋白、血红蛋白和细胞色素的形式存在。在宰后完全放血的条件下,血红蛋白大量损失,肌红蛋白成为肉品显红色的主要原因,肌红蛋白含量越高,肉色红度值越大<sup>[9]</sup>。肌红蛋白的化学状态影响着宰后肉类颜色,宰后贮藏期间肌红蛋白部分定位于线粒体外膜上,形成肌红蛋白-线粒体复合物为线粒体输氧,并且能够结合一氧化氮(NO)形成亚硝基肌红蛋白,保护细胞色素<sup>[10]</sup>。研究发现贮藏期间肉色的稳定性与肌红蛋白的氧化状态与氧化速率相关<sup>[11]</sup>。贮藏时间肌红蛋白与肉色变化关系见表1,贮藏前期肌红蛋白的形态以 DeoMb 和 OxyMb 为主,随着贮藏时间的延长,OxyMb 被氧化为 MetMb,由于 MetMb 积累而产生褐色是肉色变化的根本原因,肌肉中可以发生色素还原反应将 MetMb 还原生成 OxyMb,从而抑制肉色的劣变<sup>[12]</sup>。研究表明这一还原反应主要是高铁肌红蛋白还原酶作用,该酶是烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)依赖型 MetMb 还原酶,通过线粒体电子呼吸链向 MetMb 提供电子促

使其还原,起到促进肉色稳定的作用<sup>[13]</sup>。

## 2 影响肌红蛋白对肉色作用的因素

### 2.1 温度

冷藏条件下肉产品中的酶活性降低,抑制了 MetMb 含量的增加速率,提高了肉色稳定性并延长货架期<sup>[14]</sup>。Wang 等<sup>[15]</sup>研究低温和超低温贮藏对肉色的影响时,发现两种温度相比较,超低温贮藏可以降低 MetMb 的生成速率,从而提高贮藏期间的肉色稳定性。另外 Harnkarnsujarit 等<sup>[16]</sup>研究了低温冷冻过程中金枪鱼肌红蛋白的变化,在 -20 ℃ 时鱼肉中 OxyMb 含量较高,肉色呈嫩红色,而在 -90 ℃ 时,由于玻璃转化状态下,金枪鱼会形成较薄但较完整的蛋白质纤维结构,加速了氧化作用和肌红蛋白的转化,其显示出褐变后的微黄色。

### 2.2 光照

光照会促进肌红蛋白向 MetMb 转变,使肉色稳定性发生改变<sup>[17]</sup>。史智佳等<sup>[18]</sup>使用红、黄、蓝、绿4种单色LED灯光照射大目金枪鱼(*Thunnus obesus*)背部红色肉,发现肌红蛋白中的具有卟啉结构的血红素在光照条件下被激发并使基态氧生成单线态氧,促进了大目金枪鱼的脂质氧化和肌红蛋白氧化,使肉色稳定性降低。Cierach 等<sup>[19]</sup>研究不同光照强度白色荧光灯对牛肉颜色变化的影响,光照强度为 1 500 lx 时,肉色亮度变化最大,光照温度为 3 000 K、光照强度为 500 lx 的白色荧光灯更有利于牛肉保持理想的色泽。任可<sup>[20]</sup>研究发现光照强度越高,红度值(a\*)下降程度越大。当贮藏时间超过 3 h,800 lx 以上的光照强度都会加速肉色劣变,500 lx 光照强度的 LED 灯对肉色影响最小。

### 2.3 脂质氧化

红色肉内的脂质氧化与肌红蛋白氧化相互作用。脂质氧化可以产生自由的氧,而肌红蛋白作为肌肉内的活性氧清除剂,能够吸收自由基将 OxyMb 氧化成 MetMb,被氧化成的正三价铁离子又能够促进脂质的氧化<sup>[21]</sup>。吴成帆<sup>[22]</sup>研究发现 OxyMb 生成 MetMb 的同时,会产生超氧阴离子,再与氢离子结合生成过氧化氢,会促进 OxyMb 和不饱和脂肪酸的氧化,促进脂质氧化。脂质氧化产生的醛酮类物质会与肌红蛋白反应,破坏 OxyMb 的结构,导致 OxyMb

表1 贮藏期间肌红蛋白变化与肉色变化关系

Table 1 Relationship between changes in myoglobin and meat color during storage

贮藏时期 Storage period	贮藏初期 Early-storage	贮藏中期 Mid-storage	贮藏后期 Late-storage
肌红蛋白形态 Myoglobin morphology	DeoMb、OxyMb	OxyMb、MetMb	MetMb
线粒体还原高铁肌红蛋白能力 Mitochondrial ability to reduce methemoglobin	强	弱	无
肉色 Meat color	紫红色或鲜红色	鲜红色伴随褐变	褐色

血红素基团被氧化为 MetMb。赵巧灵等<sup>[23]</sup>结合脂肪氧化和鱼肉色泽指标, 观察蓝鳍金枪鱼 (*T. thynnus*) 赤身肉、中腹肉和大腹肉在低温冻藏条件 (-18 °C) 下的变化情况, 发现随冻藏时间的延长, 肌肉脂肪氧化程度和 MetMb 含量越来越高且呈极显著正相关, 肌肉脂肪含量越高褐变越明显。陈聘<sup>[12]</sup>探究了成熟过程中肉色变化的规律, 发现宰后成熟期间牛肉的亮度、红色度显著降低, 色角值明显升高, OxyMb 相对含量降低, MetMb 含量增加, 脂质氧化程度增加, 抗氧化能力降低。说明脂质氧化与抗氧化能力均对肉色稳定性起到了关键性的影响。

### 3 线粒体对肉色变化的作用

线粒体内膜上含有与电子传递链有关的复合体和蛋白质, 包括脂溶性电子载体蛋白如辅酶 Q、细胞色素和铁硫蛋白。线粒体的功能与肌红蛋白紧密相关, 由于 NADH 的存在, MetMb 可以被还原, 这种 MetMb 还原酶大多存在于细胞色素中, 少部分存在于线粒体内, 并且线粒体对 O<sub>2</sub> 消耗也可以影响 MetMb 的还原<sup>[24]</sup>。因此线粒体与肉色变化有极大的相关性。

#### 3.1 线粒体与肌红蛋白的关系

线粒体和肌红蛋白在肉色变化中起到了重要的作用, 并且两者有很强的相关性, 研究表明肌红蛋白可以促进线粒体吸收氧的能力<sup>[25]</sup>。宰后肉品中, 线粒体耗氧量下降, OxyMb 含量减少, 而当线粒体密度越大时, 其对于氧气的竞争力大于肌红蛋白, 对 MetMb 还原活性越高, 肉色稳定性越好<sup>[26]</sup>。

Belskie 等<sup>[27]</sup>研究表明, 线粒体可以通过电子转运介导和高铁肌红蛋白还原酶 2 种途径还原 MetMb。MetMb 还原需要 NADH 和电子载体, 而向线粒体中添加琥珀酸等物质, 通过在复合物 II 进入电子传递链后向辅酶 Q 提供电子增加氧消耗, MetMb 还原酶利用反向电子流产生的 NADH 将 MetMb 还原, 从而使肉色保持新鲜状态。线粒体可以通过逆向电子传递在死后产生 NADH, 这种 NADH 可以通过电子传递介导的途径和酶的途径被用来降低 MetMb。Lanari 和 Cassens<sup>[28]</sup>研究线粒体浓度、耗氧量和肌红蛋白活性时, 发现在颜色较差的肌肉中, 线粒体浓度较高, 而肌红蛋白含量较少。由此可知, 肌肉中线粒体与肌红蛋白紧密相关, 在肌肉中形成氧竞争关系, 两者相互作用共同影响肉色变化的稳定性。

#### 3.2 线粒体与肉色的关系

线粒体和肌红蛋白对 O<sub>2</sub> 的竞争是影响肌肉形成亮红色的一个关键因素。宰后的肌肉中线粒体依然能够进行呼吸作用, 线粒体 O<sub>2</sub> 消耗量大于肌红蛋白 O<sub>2</sub> 消耗量时, 肌肉

中的肌红蛋白由于无法得到足够的 O<sub>2</sub>, 大部分转化为 DeoMb, 而使肉品显示深红色<sup>[29]</sup>。McKeith 等<sup>[30]</sup>将不同颜色深度的暗色牛肉胴体与对照胴体进行比较, 发现肉品颜色深度与线粒体浓度有关, 线粒体浓度越高, 线粒体呼吸速率越大, 肌红蛋白中 DeoMb 含量越高, 肉色保持深红色且稳定性越好。另外, 有研究表明线粒体能够影响牛肉肉色的稳定性, 线粒体电子传递链过程中电子丢失会形成活性氧, 活性氧被细胞还原时, NADH 会被消耗, 肉色的稳定性提高<sup>[31]</sup>。线粒体代谢是肉色变化的内在机制之一。

目前已经通过蛋白质组学对肉色变进行了研究, 发现了线粒体蛋白质变化机理与肉色之间的相互关系。杨啸吟等<sup>[32]</sup>利用蛋白质组学研究高氧气调包装对牛排肉色稳定性的影响, 发现在储藏期间共有 20 个明显差异蛋白, 其中 15 个与肉色变化有关, 它们主要是糖酵解途径和能量代谢过程中的相关酶, 这些酶类随贮藏时间的延长表达量降低, 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸和还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸减少, 从而使肉色稳定性降低。刘维<sup>[33]</sup>利用线粒体蛋白质组学发现线粒体代谢和牛肉肉色变化之间有着不可分割的关系, 牛肉贮藏期间显著性差异蛋白有 16 个, 其中热休克蛋白能够保护细胞, 控制线粒体内的脂质氧化, 降低肌红蛋白的氧化程度。王磊<sup>[34]</sup>同样发现在肉色变化中的热休克蛋白变化, 也发现了抗氧化蛋白和其他酶类, 这些差异蛋白可能参与了调节宰后肉品细胞中的氧化过程, 使肉色发生变化。Gao 等<sup>[35]</sup>在贮藏 1~5 d 的羊肉中共鉴定出 11 个差异蛋白, 包括代谢酶类、结合前蛋白、伴侣蛋白和抗氧化蛋白。这些蛋白质与 a 值、线粒体呼吸速率、MetMb 减少和组织耗氧速率表现出正相关, 推测蛋白质组可能会影响死后的新陈代谢, 从而保护肌肉不变色。郭威<sup>[36]</sup>通过双向电泳结合串联质谱的蛋白质组学技术, 同样发现了 11 种蛋白与肉色变化相关。通过上述实验内容, 随着贮藏时间的延长, 分析线粒体蛋白质组学差异, 在宰后的肌肉中发现了多种与线粒体能量代谢相关的酶类和抗氧化酶, 主要参与糖酵解过程和三羧酸循环代谢途径, 这些酶类通过催化与之对应的有机化合物来影响糖酵解代谢速率和三羧酸循环代谢, 能够调控 NADH 的产生, 增加 MetMb 的还原, 提高肉色的稳定性。

## 4 肉色保鲜技术

### 4.1 高压处理

高压技术处理食品时, 压力也会对肉类中的酶活性产生影响, 从而导致肉制品颜色改变。冯哲等<sup>[37]</sup>研究表明, 当温度和压力上升时, 猪红色肉色亮度值 (L\*) 和色差值 ( $\Delta E$ ) 增加, a\* 值减少, 猪肉由鲜红色变成灰白色, 而无压



力存在时, 仅仅改变温度对肌红蛋白以及 DeoMb、OxyMb 和 MetMb 的含量无显著影响。高压对肉色的稳定性和肌红蛋白的氧化程度表现出了较强的作用。黄甜等<sup>[38]</sup> 研究压强对猪肉色泽稳定性的影响, 发现黄度值 ( $b^*$ )、 $L^*$  和  $\Delta E$  受压力影响最为显著, 将处理条件控制在 350 MPa、40 °C, 能够使猪肉色泽稳定性较高, 两者的结论一致。在牛肉中也有相似的研究结果。Jhinuk 等<sup>[39]</sup> 通过高压处理牛肉, 观察肌红蛋白和肉色变化, 发现与对照组相比, 高压处理组的肌红蛋白更容易处在 OxyMb 状态, 肉色的稳定性也得到提高。

## 4.2 气调贮藏

鲜肉主要有 3 层色素层, 表层的 OxyMb 在低  $O_2$  含量下会随着  $O_2$  含量的逐渐增加形成稳定的 OxyMb。气调包装常用的气体有  $O_2$ 、氮气 ( $N_2$ ) 以及二氧化碳 ( $CO_2$ )。在低  $O_2$  浓度下会促进褐色的 MetMb 形成, 随着  $O_2$  浓度增加, 红色肉表面会维持鲜红色, 提高肉色稳定性<sup>[40]</sup>。而升高含氧量会促进脂质氧化, 同样会影响肉色变化<sup>[41]</sup>。马骋等<sup>[42]</sup> 探究在不同含氧气调包装方式对牦牛肉肉色稳定性的影响, 结果表明, 与真空包装组相比, 含氧气调包装组更利于良好肉色的形成。 $O_2$  体积分数为 60% 的气调包装组中牦牛肉的肉色稳定性最好。不仅在畜类肉色变化中发现了气调对肉色变化的作用, 在水产品中也有相似的作用。刘梦等<sup>[43]</sup> 研究金枪鱼在不同气体比例条件下品质变化, 发现适当提高  $O_2$  比例可以有效抑制 MetMb 的形成, 使金枪鱼的  $a^*$  下降速度减缓; 适当提高  $CO_2$  比例可以抑制金枪鱼需氧微生物的繁殖, 延缓金枪鱼解冻时  $L^*$  下降, 提高金枪鱼红色肉在贮藏期间的色泽稳定性。高海<sup>[44]</sup> 用不同的  $CO_2$  和  $O_2$  浓度包装三文鱼, 发现三文鱼色差变小, 肉色稳定性提高, 能够很好地保持三文鱼肉的色泽。

## 4.3 化学物质

4.3.1 琥珀酸 琥珀酸能够抑制线粒体的过氧化作用, 从而减少过氧化导致的线粒体损害, 促进线粒体内 MetMb 的还原。Gao 等<sup>[45]</sup> 用线粒体培养 MetMb, 向其中加入琥珀酸和 NADH, 发现经琥珀酸处理后的样品, MetMb 含量下降了 69%, 并且添加了琥珀酸的真空包装牛肉背长肌的肉色稳定性更高。杨红菊等<sup>[46]</sup> 向牛肉糜中添加琥珀酸, 发现适量浓度的琥珀酸可以降低 MetMb 的含量, 对稳定和维持肉色具有良好的作用。

4.3.2 乳酸盐 已有研究表明乳酸盐主要是通过其所在的乳酸-乳酸脱氢酶体系促进 NADH 的产生, 提高 MetMb 的还原效率, 从而提高肉色的稳定性<sup>[47]</sup>。刘金鑫<sup>[48]</sup> 向牛最长背肌中注射乳酸钙, 冷藏期间  $L^*$  和  $a^*$  值的下降速度明显降低, 证明乳酸钙能够提高肉色稳定性。张玉斌等<sup>[49]</sup> 向牦

牛肉糜中添加 3 种不同的乳酸盐 (乳酸钙、乳酸钾、乳酸钠), 发现 3 组处理样品的 MetMb 含量的上升都受到了抑制, 其中 0.3% 乳酸钙效果最好, 能够明显地稳定和保持肉色。

4.3.3 其他化学物质 其他具有护色效果的化学物质, 主要是通过清除自由基, 螯合金属离子和还原能力而起到抗氧化作用以及催化糖酵解过程生成 NADH, 还原 MetMb, 发挥稳定肉色的作用。例如苏晓琴等<sup>[50]</sup> 研究表明异抗坏血酸钠、茶多酚、迷迭香酸和鼠尾草酸可以降低肌红蛋白氧化程度, 提高肉色稳定性。辛建增等<sup>[51]</sup> 发现甘油醛-3-磷酸同样能够提高降低 MetMb 含量, 提高羊肉肉色稳定性。刘金鑫等<sup>[52]</sup> 证明草氨酸钠可以通过抑制乳酸脱氢酶的活性, 使 NADH 的浓度和 MetMb 活性降低, 从而维持肉色的稳定性。刘策<sup>[53]</sup> 通过向日料中添加苜蓿皂苷能够使羊肉呈现纯正且稳定的红色, 降低肌肉中深褐色 MetMb 的比例。步婷婷等<sup>[54]</sup> 用杨梅多酚浸泡金枪鱼肉, 能明显抑制 MetMb 的形成, 延缓色泽衰败, 提高金枪鱼肉色的稳定性。李圣艳等<sup>[55]</sup> 使用壳聚糖作为保鲜剂对三文鱼品质变化研究发现, 壳聚糖能够提高三文鱼肉色稳定性, 使三文鱼在贮藏期间色泽变化变化较小。综上, 可能还有更多的化学物质可以保持肉色的稳定性有待于发现。

## 5 展望

肉色越来越受到消费者和研究人员的关注, 通过研究肉色变化的内在机制, 有针对性地采取措施控制肉色的变化, 提高肉色的稳定性, 可改善肉制品的销售状况。此外, 在肉色变化研究领域, 酶系统的作用还有待进一步研究; 肌红蛋白在特定条件下的存在形式, 如碳氧肌红蛋白、氮氧肌红蛋白、硝基高铁肌红蛋白等, 以及对肉色的影响, 还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 王俊勋. 中国畜牧业绿色发展 [J]. 兽医导刊, 2019, 315(5): 12-13.
- [2] 梁荣蓉, 张一敏, 毛衍伟, 等. 熟制牛肉肉色问题和影响因素研究进展 [J]. 食品科学, 2019, 40(15): 285-292.
- [3] 朱宏星, 孙冲, 王道营, 等. 肌红蛋白理化性质及肉色劣变影响因素研究进展 [J]. 肉类研究, 2019, 33(6): 55-63.
- [4] 林森森, 戴志远. 鱼肉肌红蛋白的呈色机理及其在热加工中对肉色的影响 [J]. 肉类工业, 2019(1): 52-57.
- [5] 吴桂苹. 肉的颜色变化机理及肉色稳定性因素研究进展 [J]. 肉类工业, 2006(6): 32-34.
- [6] 徐玉婷, 董华发, 曾晓房, 等. 肉品品质评定方法研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 1967-1972.

- [7] DJENANE D, RONCALÉS P. Carbon monoxide in meat and fish packaging: advantages and limits[J]. *Foods*, 2018, 7(2): 12.
- [8] 张同刚, 李亚蕾, 罗瑞明, 等. 冷鲜牛肉贮藏过程中线粒体变化与肌红蛋白氧化状态的相关性[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 35-40.
- [9] 姚国佳, 杨建平, 李梦云, 等. 不同日龄猪背最长肌中肌红蛋白及其肉色变化规律研究[J]. *郑州牧业工程高等专科学校学报*, 2015, 35(2): 4-7.
- [10] 罗培, 赵伟杰, 王丽娜, 等. 肌红蛋白和线粒体互作研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2020, 56(5): 8-11.
- [11] JOSEPH P, SUMAN S P, LI S, et al. Characterization of bison (*Bison bison*) myoglobin[J]. *Meat Sci*, 2010, 84(1): 71-78.
- [12] 陈骋. 脂质氧化和抗氧化因子对牦牛肉肌红蛋白稳定性及高铁肌红蛋白还原能力的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016: 24-25.
- [13] 陈骋, 余群力, 韩玲, 等. 丙二醛对牛肉线粒体高铁肌红蛋白还原能力的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 253-259.
- [14] 张艳. 冰温技术调控羊肉肉色稳定性及蛋白质磷酸化水平的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016: 26-28.
- [15] WANG Z, HE Z, GAN X, et al. Interrelationship among ferrous myoglobin, lipid and protein oxidations in rabbit meat during refrigerated and superchilled storage[J]. *Meat Sci*, 2018: 131-139.
- [16] HARNKARNSUJARIT N, KAWAI K, SUZUKI T. Effects of freezing temperature and water activity on microstructure, color, and protein conformation of freeze-dried bluefin tuna (*Thunnus orientalis*)[J]. *Food Bioprocess Tech*, 2015, 8(4): 916-925.
- [17] 曹洪玉, 高凌星, 唐乾, 等. 紫外光诱导氧合型肌红蛋白氧化反应及机理[J]. *物理化学学报*, 2016, 32(4): 872-878.
- [18] 史智佳, 张睿梅, 杨震, 等. 单色光照金枪鱼脂质和肌红蛋白氧化动力学研究[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 237-242.
- [19] CIERACH M, NIEDŹWIEDŹ J. Effects of three lighting intensities during display on discolouration of beef semitendinosus muscle[J]. *Eur Food Res Technol*, 2014, 239(3): 377-383.
- [20] 任可. 包装和光照对冷却肉颜色稳定性的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017: 26-30.
- [21] 王兆明, 贺稚非, 李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品质影响及交互氧化机制研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 295-301.
- [22] 吴成帆. 牛肉肌红蛋白分离纯化及脂质氧化对其稳定性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016: 39-40.
- [23] 赵巧灵, 廖明涛, 刘书臣, 等. 蓝鳍金枪鱼脂肪氧化和鱼肉色泽的变化研究[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(7): 79-86.
- [24] TANG J, FAUSTMAN C, MANCINI R A, et al. Mitochondrial reduction of metmyoglobin: dependence on the electron transport Chain[J]. *J Agricult Food Chem*, 2005, 53(13): 5449-5455.
- [25] YAMADA I T, TAKAKURA H, JUE T, et al. Myoglobin and the regulation of mitochondrial respiratory chain complex IV[J]. *J Physiol*, 2016, 594(2): 483-495.
- [26] MANCINI R A, BELSKIE K, SUMAN S P, et al. Muscle-specific mitochondrial functionality and its influence on fresh beef color stability[J]. *J Food Sci*, 2018, 83(8): 2077-2082.
- [27] BELSKIE K M, BUITENA C B V, RAMANATHAN R, et al. Reverse electron transport effects on NADH formation and metmyoglobin reduction[J]. *Meat Sci*, 2015, 105: 89-92.
- [28] LANARI M, CASSENS R. Mitochondrial activity and beef muscle color stability[J]. *J Food Sci*, 2010, 56(6): 1476-1479.
- [29] RAMANATHAN R, MANCINI R A, KONDA M R. Effects of lactate on beef heart mitochondrial oxygen consumption and muscle darkening[J]. *J Agricult Food Chem*, 2009, 57(4): 1550-1555.
- [30] MCKEITH R O, KING D A, GRAYSON A L, et al. Mitochondrial abundance and efficiency contribute to lean color of dark cutting beef[J]. *Meat Sci*, 2016, 116: 165-173.
- [31] 吴爽, 罗欣, 毛衍伟, 等. 线粒体对肉色及其稳定性影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(15): 247-253.
- [32] 杨啸吟, 张一敏, 朱立贤, 等. 高氧气调包装贮藏牛排肉色稳定性的蛋白质组学[J]. *食品科学*, 2019, 40(3): 231-237.
- [33] 刘维. 基于线粒体蛋白质组学研究牛肉贮藏变色机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017: 22-32.
- [34] 王磊. 基于肌浆蛋白质组学研究宰后初期不同极限 pH 值牛肉颜色的差异机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017: 14-25.
- [35] GAO X, WU W, MA C, et al. Postmortem changes in sarcoplasmic proteins associated with color stability in lamb muscle analyzed by proteomics[J]. *Eur Food Res Technol*, 2016, 242(4): 527-535.
- [36] 邬威. 牛肉冷却贮藏期间肉色褐变相关生物标志物的定量蛋白质组学方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 35-40.
- [37] 冯哲, 陈辉, 郭丽萍, 等. 高压结合热处理对猪肉肌红蛋白的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(2): 160-164, 175.
- [38] 黄甜, 严成, 黄业传, 等. 高压结合热处理对猪肉色泽的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(2): 85-89.
- [39] JHINUK G, CHAD G, GEORGE A, et al. Sullivan. Effectiveness of different myoglobin states to minimize high pressure induced discoloration in raw ground beef[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 93: 32-35.
- [40] 杨啸吟. 高氧与一氧化碳气调包装对冷却牛排肉色稳定性影响的机理探究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018: 27-29.
- [41] 汤元睿, 谢晶. 金枪鱼气调保鲜技术的研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(9): 296-300.
- [42] 马骋, 梁琪, 文鹏程, 等. 含氧气调包装对牦牛肉肉色稳定性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(9): 130-136.
- [43] 刘梦, 曲超, 史智佳, 等. 不同气体比例对金枪鱼气调解冻及贮藏期间保鲜效果的影响[J]. *肉类研究*, 2017, 31(3): 12-17.
- [44] 高海. 红肉鱼与白肉鱼鱼肉的气调包装冷藏保鲜的比较研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 30-39.
- [45] GAO X G, WANG Z Y, TANG M T, et al. Comparison of the effects of succinate and NADH on postmortem metmyoglobin reductase activity and beef colour stability[J]. *J Integr Agricult*, 2014, 13(8): 1817-1826.
- [46] 杨红菊, 朱金媛, 戴瑞彤. 琥珀酸钠对牛肉糜色泽及高铁肌红蛋白含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(15): 270-272, 314.

- [47] 邵晶晶, 张玉斌, 吴仕达, 等. 乳酸盐对冷却肉护色机理的研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(12): 279-284.
- [48] 刘金鑫. 不同包装体系中乳酸钙对冷却牛肉肉色稳定性的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 16-17.
- [49] 张玉斌, 张巨会, 余群力, 等. 乳酸盐对冷却牦牛肉色泽稳定性及高铁肌红蛋白还原的影响 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 281-286.
- [50] 苏晓琴, 李兆亭, 申基雪, 等. 异抗坏血酸钠、茶多酚、迷迭香酸和鼠尾草酸对冷鲜肉肉色稳定性的影响 [J]. 食品科技, 2017, 42(9): 112-118.
- [51] 辛建增, 李铮, 李欣, 等. 甘油醛-3-磷酸对羊肉色泽稳定性和高铁肌红蛋白还原的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(16): 112-117.
- [52] 刘金鑫, 张玉斌, 罗亚兰, 等. 草氨酸钠抑制乳酸脱氢酶对冷却牛肉肉色稳定性的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(6): 134-140.
- [53] 刘策. 苜蓿皂苷对绵羊肌肉色泽的影响及其机理 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 27-29.
- [54] 步婷婷, 金洋, 徐大伦, 等. 杨梅多酚对生食金枪鱼冷藏过程中品质的影响 [J]. 食品科学, 2017, 38(9): 225-231.
- [55] 李圣艳, 李学英, 靳春秋, 等. 保鲜剂对冰藏三文鱼品质变化的影响 [J]. 河南农业科学, 2017, 46(4): 128-133.