



肌红蛋白理化性质及肉色劣变影响因素研究进展

朱宏星¹, 孙冲², 王道营², 徐为民^{1,2,*}, 葛庆丰¹

(1.扬州大学食品科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 在放血充分的肌肉中, 肌红蛋白是红色素的主要成分, 其含量与肉色深浅呈正相关。肌红蛋白主要有3种氧化还原态, 即紫红色的脱氧肌红蛋白、鲜红色的氧合肌红蛋白和褐色的高铁肌红蛋白。在肉品贮藏和加工中, 不同氧化还原态肌红蛋白之间相互转化以及肌红蛋白与外源性化学物质形成复合物, 均会引起肉品色泽的变化。本文探讨肌红蛋白的理化性质、不同氧化还原态肌红蛋白的定性定量检测方法, 综述引起肉色劣变的影响因素(贮藏与加工温度、pH值、辐照、气调包装、蛋白质、酶、抗氧化剂和脂质), 旨在为肉品色泽调控提供理论依据。

关键词: 肌红蛋白; 检测; 肉色; 影响因素

Progress in the Physicochemical Properties of Myoglobin and Factors influencing Meat Color Stability

ZHU Hongxing¹, SUN Chong², WANG Daoying², XU Weimin^{1,2,*}, GE Qingfeng¹

(1.College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2.Institute of Agri-Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Myoglobin (Mb) is the main component of red pigment in muscle tissue, and its content has a significant positive correlation with meat color. There are three main forms of myoglobin: purple-red deoxymyoglobin, bright red oxymyoglobin and brown metmyoglobin. During the storage and processing of meat, discoloration is a common phenomenon, which is caused by the transformation of different forms of Mb into each other and the formation of complexes between Mb and exogenous chemicals. In this review, the physical and chemical properties of Mb, and the reported analytical methods for qualitative and quantitative determination of different forms of Mb are discussed, and the factors influencing meat color stability, such as storage and processing temperature, pH value, irradiation, modified atmosphere packaging, proteins, enzymes, antioxidants and lipids, are summarized. Hopefully, this review will provide a theoretical basis for the regulation of meat color.

Keywords: myoglobin; determination; meat color; influencing factors

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190415-080

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2019) 06-0055-09

引文格式:

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.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190415-080. <http://www.rlyj.net.cn>

ZHU Hongxing, SUN Chong, WANG Daoying, et al. Progress in the physicochemical properties of myoglobin and factors influencing meat color stability[J]. Meat Research, 2019, 33(6): 55-63. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190415-080. <http://www.rlyj.net.cn>

肉色直接影响消费者的购买意愿, 也是消费者判断肉品品质最简单直接的方式^[1-2]。肉色主要取决于肉品中肌红蛋白和血红蛋白的含量、氧化还原态, 另外细胞色

素等对肉色也有作用。放血充分的肌肉中, 肌红蛋白占主导地位^[3]。肉在贮藏、运输、加工和售卖过程中肌红蛋白易氧化, 导致肉品变色。Smith等^[4]调查表明, 美国每

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31601405); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20160591);

江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(18)1006); 江苏省农业科学院院级基金项目(6111681);

现代农业产业技术体系建设专项(CARS-41)

第一作者简介: 朱宏星(1994—)(ORCID: 0000-0002-6043-106X), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 2422637349@qq.com

*通信作者简介: 徐为民(1969—)(ORCID: 0000-0003-3114-3162), 男, 研究员, 博士, 研究方向为肉品加工与质量控制。

E-mail: weiminxu2002@aliyun.com

年因肉品变色而造成的损失超过10 亿美元。因此,综述肌红蛋白的理化性质及肉色劣变的影响因素对肉品贮藏和加工具有重要意义。

1 肌红蛋白的理化性质

肌红蛋白是一种复合性的色素蛋白,由血红素和珠蛋白组成,图1为肌红蛋白的结构示意图^[5]。血红素是由4个杂环吡咯化合物连接而成的1个卟啉环和1个处在卟啉环中心的铁原子组成,铁原子周围存在6个配位键,其中4个配位键与卟啉环的4个N相连,另外2个配位键分别与组氨酸和其他配位化合物(如O₂、CO、NO等)结合^[6]。珠蛋白以8个 α -螺旋节围绕血红素交结形成肌红蛋白,每个 α -螺旋区含7~20个氨基酸残基^[7]。肽链拐角处为非螺旋区(亦称螺旋间区),包括N端的2个氨基酸残基和C端的5个氨基酸残基。极性氨基酸分布在肌红蛋白分子表面,内部形成口袋形空穴,血红素位于此空穴中。

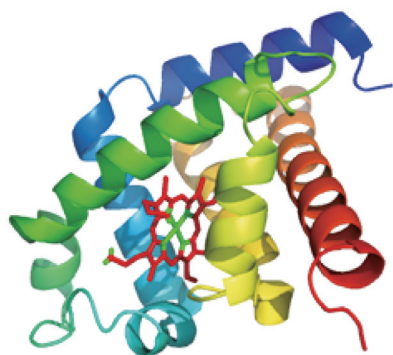


图1 肌红蛋白的结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of myoglobin

肌红蛋白主要有脱氧肌红蛋白(deoxymyoglobin, DeoMb)、氧合肌红蛋白(oxy-myoglobin, OxyMb)和高铁肌红蛋白(methemoglobin, MetMb)3种形式,这3种形式之间可以相互转化。DeoMb中心铁离子以Fe²⁺的形式存在,且第6位配位键不存在配体,肉色呈现紫红色;在空气中,DeoMb转化为OxyMb,铁离子以Fe²⁺的形式存在,第6个配位键与氧结合,肉色呈现亮红色,OxyMb第6位配位键与氧的结合是可逆的,可脱去氧气形成DeoMb;当Fe²⁺氧化为Fe³⁺形成MetMb,肉色呈现褐色,MetMb在还原剂或酶的作用下,Fe³⁺可以还原成Fe²⁺,形成DeoMb^[8]。肌红蛋白除了这3种形式,还存在羧基肌红蛋白(carboxymyoglobin, CO-Mb),由中心Fe的第6个配位键与CO结合形成,肉色呈亮红色,且该配位键与CO的结合能力比与O₂更强^[9],因此CO常被用于气调包装中。含CO的低氧鲜肉包装提高了肉色稳定性且肉品风味得到改善^[10]。亚硝基肌红蛋白

(nitrosomyoglobin, NO-Mb)是肌红蛋白的另一种形式,存在于腌制肉及发酵肉制品中。由于硝酸盐经过复杂反应产生NO,与肌红蛋白结合形成NO-Mb,肉色呈粉红色^[11]。熟肉中的肌红蛋白主要以珠蛋白血色原、亚硝基血色原形式存在,其中珠蛋白已经变性。在硫化物或其他还原剂存在时,肌红蛋白形态发生变化,可能形成硫代肌绿蛋白、胆绿蛋白、高铁胆绿素或胆色素,肉品出现异色。肌红蛋白不同形成方式、血红素、珠蛋白状态及肉色等如表1所示。

表1 新鲜肉、腌制肉和熟肉中肌红蛋白的形成方式、血红素、珠蛋白状态及肉色^[12]

Table 1 Formation pathways of myoglobin, heme, globin state and meat color in fresh meat, preserved meat and cooked meat^[12]

色素	形成方式	铁的价态	血红素状态	珠蛋白状态	颜色
肌红蛋白	高铁肌红蛋白还原,氧合肌红蛋白脱氧	Fe ²⁺	完整	天然	浅紫色
氧合肌红蛋白	肌红蛋白的氧合	Fe ²⁺	完整	天然	亮红色
高铁肌红蛋白	肌红蛋白、氧合肌红蛋白的氧化	Fe ³⁺	完整	天然	棕色
亚硝基肌红蛋白	肌红蛋白与NO结合	Fe ²⁺	完整	天然	亮红/粉红色
亚硝基高铁肌红蛋白	高铁肌红蛋白与过量的亚硝酸盐结合	Fe ³⁺	完整	天然	红色
珠蛋白血色原	肌红蛋白、氧合肌红蛋白固加热和变性试剂作用,血色原受辐照	Fe ²⁺	完整	变性	暗红色
珠蛋白血色原	肌红蛋白、氧合肌红蛋白、高铁肌红蛋白、血色原受热和变性试剂的作用	Fe ³⁺	完整	变性	棕色
亚硝基血色原	亚硝基肌红蛋白受热与盐作用	Fe ²⁺	完整	变性	亮红/粉红色
硫代肌绿蛋白	肌红蛋白与H ₂ S、O ₂ 作用	Fe ³⁺	完整但还原	变性	绿色
胆绿蛋白	过氧化氢对肌红蛋白或氧合肌红蛋白的作用,抗坏血酸盐或其他还原剂对氧合肌红蛋白的作用	Fe ²⁺ 或Fe ³⁺	完整但还原	变性	绿色
高铁胆绿素	肌红蛋白与过量的H ₂ S、O ₂ 作用	Fe ³⁺	卟啉环打开	变性	绿色
胆色素	肌红蛋白与过量的H ₂ S、O ₂ 作用	无铁	卟啉环破裂	/	黄色/无色

注: / 不含珠蛋白。

2 肌红蛋白的测定方法

常见的肌红蛋白检测方法有紫外-可见分光光度(ultraviolet-visible spectrophotometry, UV-Vis)法、近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIR)法、拉曼光谱法、高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)法、质谱(mass spectrometry, MS)法及电化学传感器法等。UV-Vis是传统的肉色评定方法,该仪器设备简单、操作简便、成本低,但样品处理时间较长。Krzywicki^[13]运用UV-Vis在572、565、545、525 nm处测定吸光度,建立了计算肌红蛋白氧化还原态含量相对比例的方程。这一方法被广泛采用,但该方程在计算时可能会出现负值,这与波长范围的选取有关。Mancini等^[14]研究贮藏时间与牛肉肉色的关系时,在Krzywicki方程的基础上,采用UV-Vis在400~700 nm波长估算出肌红蛋白氧化还原形式的含量。Tang等^[15]在Krzywicki方程的基础上选取适合DeoMb、OxyMb和MetMb的波长建立计算方程,减小了负值出现的可能性。将Krzywicki和Tang的方程运用到



金枪鱼中估算肌红蛋白氧化还原态的含量时结果偏低,因此Viriyarattanasak等^[16]利用紫外-可见分光光度计选取500、540、550 nm波长测定大眼金枪鱼中3种氧化还原态肌红蛋白(DeoMb、OxyMb、MetMb)的含量,最后确定了金枪鱼肌红蛋白的适用方程。

NIR是波长为780~2 526 nm的电磁波,属于快速无损检测技术,含氢基团的有机物能够被近红外光吸收,因此可用于肌红蛋白氧化还原态的检测^[17]。NIR方法检测快速、高效、实时,但灵敏度较低,因此不适合痕量检测^[18]。Bjelanovic等^[19]利用NIR建立模型,预测碎牛肉中肌红蛋白的状态,确定OxyMb、MetMb和DeoMb的相关系数(R_c)。Mohan等^[20]分别利用NIR组织血氧测定法和反射分光光度法测定气调包装中牛肉的肌红蛋白氧化还原态含量,结果表明,NIR组织血氧测定法可以量化OxyMb和DeoMb含量。Mohan等^[21]使用基于频域多距(frequency-domain multidistance, FDMD)的NIR组织血氧测定法和分光光度法测定4种不同部位包装牛肉的OxyMb和DeoMb含量,并估算MetMb的含量,将结果与反射分光光度法做对比,表明NIR组织血氧仪检测的结果准确可靠。

拉曼光谱法是一种不受水分干扰的无损检测技术,可以用来检测肉品品质^[22]。该方法准确率高、无需样品前处理、高效快速、谱峰尖锐、很少发生重叠,利于后续分析,可实现在线检测,但测得的数据量大且复杂,需提取有效信息^[23]。应用拉曼光谱检测肉中肌红蛋白及其氧化还原态含量的研究较少。张同刚等^[24]采用拉曼光谱技术对检测的数据进行二维分析,建立计算冷鲜牛肉中3种形式肌红蛋白含量的公式,将实验结果与Krzywicki方法对比发现,用该公式计算出的3种氧化还原态肌红蛋白含量相对误差较小,相对误差大小顺序为MetMb>DeoMb>OxyMb。

HPLC和MS均可用于肌红蛋白的定性、定量测定,准确度高,但仪器昂贵、成本高、分析时间长。Oellingrath等^[25]优化HPLC检测条件,成功分离牛肉提取物中的肌红蛋白和血红蛋白,并定量检测肌红蛋白的含量。Yancey等^[26]采用HPLC分析肌红蛋白含量,发现肌红蛋白对牛排发酵风味的影响较小。Kryvi等^[27]采用HPLC研究不同种类鲨鱼的红肌纤维、中间纤维和白肌纤维中肌红蛋白的含量,发现不同类型鲨鱼和同种类型鲨鱼不同纤维间的肌红蛋白含量差异较大。Kranen等^[28]建立尺寸排除色谱法结合分光光度法,测定鸡肌肉提取物中肌红蛋白的含量。Mayr等^[29]利用二维液相色谱法结合电喷雾质谱法分析血清中的肌红蛋白含量。Watson等^[30]通过MS利用标记肽对牛肉、猪肉、马肉和羊肉4种肉类进行区分,并对肌红蛋白进行定量检测,将该方法应用到实际样品中鉴定掺杂肉。

电化学传感器发展至今,已经成为具有较高专一性

和灵敏度的检测方法,被广泛运用于各类在线检测和分析中。电化学方法具有快速、灵敏、准确的特点,可用于微量和痕量检测。Chen Jishun等^[31]利用肌红蛋白适配体与肌红蛋白和碳量子之间的竞争反应,导致荧光从猝灭到产生的原理,并引入脱氧核糖核酸酶I放大信号,定量检测肌红蛋白。Ma Xiaoling等^[32]将季胺化处理的纳米金刚石粒子(ND-CO-NH-CH₂-CH₂-N(CH₃)₃⁺, QAS-ND)修饰在玻碳电极(glassy carbon electrode, GCE),构建QAS-ND/Mb/GCE,使肌红蛋白活性中心向电极表面进行电子转移,从而对肌红蛋白进行定量检测。Sun Chong等^[33]合成聚吡咯-F127-Au纳米粒子,构建可用于肌红蛋白定量检测的电化学传感器。El-Said等^[34]开发基于银纳米松树状薄膜修饰氧化铟锡(Ag nano-pinetree film modified indium tin oxide, Ag NPT/ITO)的无标记肌红蛋白传感器,Ag NPT/ITO底物可增强拉曼效应,构建的肌红蛋白含量检测传感器具有高选择性和高灵敏度。相关检测方法的优缺点对比如表2所示。

表2 肌红蛋白测定方法及优缺点

Table 2 Reported analytical methods for the determination of myoglobin and their advantages and disadvantages

检测方法	优点	缺点	参考文献
UV-Vis	仪器设备简单、操作简便、成本低	样品前处理时间较长	[13-16]
NIR	快速、高效、实时	灵敏度低,不适合痕量检测	[19-21]
拉曼光谱	准确率高、高效快速、实时、谱峰尖锐,很少发生重叠,利于后续分析	测得的数据大量且复杂,需提取有效信息	[24]
HPLC、MS	精确度和准确度高	仪器昂贵,成本高,分析时间长	[26-29]
电化学传感器	快速、灵敏、准确、特异性强	电极的稳定性和重复性易受材料及固定技术影响	[31-34]

3 影响肉色稳定性的因素

3.1 贮藏与加工温度

肌红蛋白受热后,珠蛋白发生变性,不再缠绕在血红素周围,使血红素暴露于空气中,导致血红素铁的氧化,肉品变色^[35]。肌红蛋白变性程度与加热温度和加热时长有关。目前的研究表明,温度对肉色影响很大,这是由于温度变化导致可溶性肌红蛋白含量降低,红度值(a^*)降低,亮度值(L^*)和黄度值(b^*)升高^[36]。Christensen等^[37]利用低温长时间(low temperature long time, LTLT, 48~63 °C)处理母猪背最长肌(Longissimus dorsi, LD),发现随着温度的升高,肉品 a^* 降低,可能是由于温度升高后,肉中其他蛋白质变性量增加,从而降低了肌红蛋白的溶解度。Becker等^[38]利用LTLT(53、58 °C下处理10、20、30 h)处理猪肉,结果表明,猪肉 L^* 基本没有变化,而 a^* 在58 °C条件下更低, b^* 在58 °C条件下较高,且在2种温度下,猪肉 b^* 随着时间的延长升高。Sen等^[39]评估不同终点温

度(51、65、71、79 °C)对羊排肌红蛋白稳定性的影响,发现随着温度升高,肌红蛋白变性程度增加。García-Segovia等^[40]测定60、70、80 °C条件下加热牛排的可见光谱时发现,随着温度的升高,DeoMb和OxyMb含量降低,MetMb含量增加。

除加工温度外,贮藏温度对肉色影响也很大。Li Xin等^[41]在评估贮藏温度对羊羔肉肉色稳定性影响的研究中发现,与4 °C贮藏的羊肉相比,在受控冰点(−0.8 °C)贮藏的羊肉表现出更好的颜色稳定性,能有效抑制MetMb的积累。Rosenfold等^[42]的研究也表明,−1.5 °C贮藏1周的羊肉比2 °C条件下贮藏时 a^* 更高,颜色更稳定,这是由于较高的温度会提高MetMb的形成速率。尚坤等^[43]研究不同冻藏温度(−20、−40、−80 °C)对鸡肉品质的影响,发现冻藏温度越高, L^* 越大, a^* 下降越快,表明低温有利于抑制肌红蛋白的氧化。

3.2 pH值

pH值对肌红蛋白的氧化有重要影响,动物肌肉在屠宰后由于糖酵解的作用,导致乳酸在肉中积累,pH值下降为5.6左右,此时肉色正常。低pH值($\text{pH} < 5.4$)肉中的肌红蛋白易受热变性,这是由于低pH值可减弱肌红蛋白中血红素与珠蛋白的结合力,从而加快肌红蛋白氧化^[44]。Joseph等^[45]发现,火鸡肌红蛋白热稳定性比牛肉肌红蛋白更强,这可能与火鸡肉的高pH值有关。Mancini等^[46]的研究也证明,在较高的pH值条件下烹饪猪排,其肉色稳定性更高。Nerimetla等^[47]运用电化学动力学了解不同pH值条件下肉中肌红蛋白的还原速率和氧亲和力,发现较高pH值下的MetMb还原速率和OxyMb合成常数较高。Fletcher等^[48]研究生鸡胸肉和熟鸡胸肉之间的相关性发现,生肉pH值与生肉 a^* 呈显著正相关(相关系数 $r=0.352$, $P<0.05$),与 b^* ($r=-0.221$)和 L^* ($r=-0.771$, $P<0.05$)呈负相关,对熟肉的研究结果相同,且熟肉的pH值与肉色变化程度比生肉小。

3.3 辐照

为了延长肉品的贮藏时间,辐照是一种可用的非热处理方法^[49]。已有研究表明,当肉中主要为OxyMb时,辐照会促使 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 转变, a^* 降低;当肉中主要为MetMb时, a^* 增加^[50]。Nam等^[51]发现,经过辐照后火鸡鸡胸肉的 a^* 比未经辐照时更稳定,真空条件下辐照的鸡胸肉 a^* 比有氧条件下高,这是由于辐照产生CO,可与肌红蛋白形成粉红色的CO-Mb。同样Du等^[52]也证明有氧条件下 a^* 降低的原因可能是辐照产生CO。Nam等^[53]通过辐射法处理碎牛肉后,发现 a^* 下降, L^* 上升,牛肉的颜色从鲜红色转变成褐色,而辐照处理猪肉和禽肉则产生粉色,造成颜色不同的原因可能是牛肉中肌红蛋白含量较猪肉和禽肉高,肉色更深,因此产生的

CO与血红素复合物生成的粉色对深肉色的影响较浅肉色小。Li Chengliang等^[54]使用不同辐射剂量照射贮藏期间的猪肉,研究表明,较高辐射剂量(5 kGy)下的肉 a^* 较高, b^* 和 L^* 未发生显著变化,较低辐射剂量(3 kGy)下 a^* 变化较小。

3.4 气调包装

肌红蛋白中的血红素铁能够与 O_2 、CO和NO等气体结合形成亚铁共价络合物,其中OxyMb、CO-Mb和NO-Mb均呈鲜艳的红色,因此这些气体应用到气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)中利于鲜肉的保藏和护色。MAP是除去或更换包装内气体组成从而延长保质期的一种包装方法^[55]。其中一种形式是真空包装(vacuum packaging, VP),它是通过隔绝空气减少微生物的生长,但同时也促进了厌氧微生物的生长,而且肌红蛋白不能与 O_2 络合形成氧合肌红蛋白,肉以DeoMb的形式呈现紫红色^[56]。因此,鲜肉很少直接进行真空包装。而高氧气调包装(high oxygen atmosphere packaging, HOAP)可以延长鲜肉的货架期,20世纪中叶,HOAP就开始应用于各个商店,肉在80% O_2 和20% CO_2 混合气体、低于2 °C条件下贮藏时货架期可长达6~10 d^[57],HOAP有利于氧合肌红蛋白的形成,因此肉能保持鲜红色。Resconi等^[58]将牛排放置在 O_2 比例分别为50%、60%、80%, CO_2 比例固定为20%的气调包装中贮藏4 d和8 d,发现50% O_2 条件下牛排 a^* 最低,60%和80% O_2 条件下 a^* 较高,且打开包装后红色基本稳定不变,该研究证明,控制肉色变化的最低氧含量为60%。Lukic等^[59]探究 O_2 比例分别为75%、70%、80%,其余以 CO_2 补充的MAP对猪排肉色的影响,结果表明,70% O_2 +30% CO_2 包装对猪排肉色的稳定效果最好。除了 O_2 和 CO_2 的组合包装外,加入CO的包装也得到广泛应用。CO-Mb能呈现出和OxyMb同样的鲜红色,而且比OxyMb更加稳定,但是由于CO具有毒性,因此CO用于包装一直备受争议^[60]。目前研究发现,低浓度CO包装对肉色稳定性有效,且不会对人体造成伤害^[10]。因此,CO-MAP包装的优化也被广泛研究。Jayasingh等^[61]将牛排和碎牛肉用5% CO-MAP处理24 h后进行VP包装,发现肉色能维持21 d,而0.5% CO+60.0% CO_2 +39.5% N_2 (0.5% CO-MAP)包装的牛排和碎牛肉具有更低的色调角(h°)(h° 是肉表面红色损失的衡量指标,其值越低肉色越红,值越高肉色越黄),且肉色能维持8周。John等^[62]比较VP、0.4% CO-MAP(30.3% CO+69.3% N_2)和80% O_2 -MAP(20% CO_2)中牛排颜色的稳定性,结果表明,贮藏在0.4% CO-MAP的牛排有较高的 a^* (17.9~19.4)、较低的 h° 值(34)及更鲜艳的红色。

3.5 抗氧化剂

抗氧化剂是一种能够防止脂质和蛋白质等氧化的物质,使用后可以降低氧化的发生,从而控制肉品质,食品级抗氧化剂可以促进肉品中DeoMb和OxyMb的合成,抑制MetMb的形成,减少肉色劣变^[63-64]。Maiorano等^[65]证明VE有良好的肉色稳定作用。Kulkarni等^[66]对比抗坏血酸(VC)、没食子酸丙酯(propyl gallate, PG)和葡萄籽提取物(grape seed extract, GSE)处理的加热牛肉香肠模型颜色的变化,发现VC和PG组中 L^* 最稳定。Ahn等^[67]证明GSE处理的煮熟牛肉比丁基羟基茴香醚/2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(butylated hydroxyanisole/butylated hydroxytoluene, BHA/BHT)、迷迭香和松树皮提取物处理的煮熟牛肉有更低的 L^* 、 b^* 及更高的 a^* ,并且GSE和松树皮提取物能在熟牛肉贮藏期间有效地保持红色。花生皮提取物(peanut skin extract, PSE)也是一种抗氧化剂,可应用在碎牛肉中,抑制蛋白质色素氧化和脂质氧化,以保持牛肉的鲜红色。Yu等^[68]使用0.02%~0.10% PSE处理后的碎牛肉发红。Neilson等^[69]使用石榴皮提取物对碎牛肉进行处理,处理后的样品分别用不同气体包装贮藏,与未处理的牛肉相比,石榴皮提取物处理的牛肉肉色更红,且氧化也受到抑制。桑叶提取物(mulberry leaf extract, MLE)也具有抗氧化活性,可提高抗氧化酶活性,Zhang Xinzhuang等^[70]发现,生牛肉在冷藏期间 a^* 下降,而添加MLE可以延缓 a^* 的降低,此外,在牛肉冷藏时间较长时,高浓度MLE处理的牛肉 a^* 较中低浓度处理牛肉高($P<0.05$)。另外,大蒜中的大蒜素具有抗氧化及抗菌作用,Horita等^[71]向法兰克福香肠中添加新鲜大蒜、大蒜粉末、商品大蒜油和大蒜提取物,发现添加新鲜大蒜的处理组 h^* 最低。橡子富含酚类物质,具有抗氧化特性,Ferreira等^[72]利用橡子提取物对汉堡中生、熟鸡肉饼进行处理,发现添加橡子提取物的生鸡肉饼比对照组有更高的 a^* 和更低的 b^* ,鸡肉饼经过烹饪后, a^* 降低, b^* 升高, h^* 较高,而添加橡子提取物的熟鸡肉饼能够促进 h^* 的降低。

3.6 脂质氧化

脂质氧化是脂质通过自由基链式反应自发与氧发生反应,导致食品的营养素、生物活性物质损失,产生异味,甚至产生有毒物质。已有研究表明,脂质氧化能与肌红蛋白氧化相互促进,脂质氧化的产物,如醛,对肌红蛋白氧化有促进作用^[73]。Lynch等^[74]的研究表明,醛类氧化产物能够与MetMb反应,并降低MetMb的还原能力。高活性醛,如4-羟基-2-壬烯醛(4-hydroxynonenal, HNE),扩散到肌浆中与肌红蛋白共价结合,改变肌红蛋白的三级结构,从而改变肉色。Naveena等^[75]分析HNE与肌红蛋白的结合情况,结果表明,当pH值为7.4时,HNE能够与肌红蛋白氨基酸残基His 64和His 93发生共价

加合,当pH值为5.8时仅与氨基酸残基His 64加合,这可能是由于pH值为5.8时,组氨酸残基具有较高的正电荷,影响加合作用。将实验组与不添加HNE的对照组相比,发现添加HNE的实验组MetMb含量更高。这些结果表明,HNE通过与组氨酸残基的共价加合,加速了OxyMb氧化。Grunwald等^[76]在探究HNE对Mb和脂质氧化诱导影响的实验中发现,与没有添加HNE的对照组相比,HNE能够与Mb中的组氨酸残基共价结合,加速MetMb的形成和脂质氧化的发生。Wang Zhaoming等^[77]研究低温贮藏期间兔肉中肌红蛋白、脂质氧化和蛋白质氧化之间的关系,发现蛋白质羰基、硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substance, TBARs)值和MetMb含量均有所增加,肌红蛋白氧化和脂质氧化具有较高的相关性。吴成帆等^[78]也得到同样的结论,研究结果表明,育肥公犊和黄牛的脂质氧化程度与OxyMb含量呈负相关,而与MetMb含量呈正相关,他们还发现育肥公犊的氧化程度显著低于黄牛,由于黄牛的不饱和脂肪酸较多,脂质对蛋白质氧化的影响较大,因此可以通过抑制脂质氧化从而有效抑制肌红蛋白氧化,避免肉色劣变。

3.7 相关酶类及蛋白

乳酸脱氢酶能够参与烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(nicotinamide adenine dinucleotide, NADH)再生,而NADH可以参与MetMb的还原,从而提高肉色的稳定性^[79]。Kim等^[80]将注射2.5%乳酸的牛排贮藏14 d后与无乳酸对照组相比,发现前者含更多的NADH且牛排颜色更稳定,乳酸被乳酸脱氢酶转化成丙酮酸和NADH,提高了肌红蛋白的稳定性。Mancini等^[81]推测,乳酸除了可以通过乳酸脱氢酶产生NADH外,还可能直接影响肌红蛋白氧化还原稳定性,并提出乳酸可以和肌红蛋白直接加合这一假设。但Mancini等^[82]研究37℃、pH值为7.4和4℃、pH值为5.6的乳酸加合OxyMb和CO-Mb时发现,乳酸并不能与肌红蛋白共价加合,但是乳酸可以通过间接机制(如乳酸脱氢酶)影响肌红蛋白的稳定性。酶类(高铁肌红蛋白还原酶)和肌浆蛋白都对肉色稳定性起重要作用。Joseph等^[83]研究牛背最长肌(Longissimus lumborum, LL)和腰大肌(Psoas major, PM)中的肌浆蛋白组对肉色稳定性的影响,结果表明,LL由于含有较多的抗氧化蛋白和分子伴侣,表现出较PM稳定的肉色。醛糖还原酶、肌酸激酶、 β -烯醇化酶和丙酮酸脱氢酶为糖酵解和能量代谢相关的酶,与 a^* 呈正相关,对肉色的保持有积极作用^[84]。过氧化物酶-2和肽甲硫氨酸亚砷还原酶可以抑制脂质和蛋白质氧化,从而稳定肉色。热休克蛋白-27 kDa和磷酸化应激诱导蛋白1作为伴侣蛋白可能因其对蛋白质的保护作用而在稳定肉色方面起作用^[85]。相关蛋白与肉色的相关性如表3所示。

表3 牛LL中肌浆蛋白与颜色属性的相关性^[83]Table 3 Correlation between sarcoplasmic protein and color stability in bovine LL^[83]

肌浆蛋白	功能分类	肉色稳定性参数	相关系数
醛糖还原酶	酶	a^*	0.64
肌酸激酶	酶	a^*	0.72
β -烯醇化酶	酶	a^*	0.64
丙酮酸脱氢酶	酶	a^*	0.65
丙酮酸脱氢酶	酶	$R_{630\text{ nm}/580\text{ nm}}$	0.67
过氧化物酶-2	抗氧化剂	$R_{630\text{ nm}/580\text{ nm}}$	0.92
热休克蛋白-27 kDa	分子伴侣	$R_{630\text{ nm}/580\text{ nm}}$	0.87
肽甲硫氨酸亚砷还原酶	酶	$R_{630\text{ nm}/580\text{ nm}}$	0.88
磷酸化应激诱导蛋白1	分子伴侣	$R_{630\text{ nm}/580\text{ nm}}$	0.75
肽甲硫氨酸亚砷还原酶	酶	高铁肌红蛋白 还原酶活性	0.63

注: $R_{630\text{ nm}/580\text{ nm}}$, 630 nm和580 nm波长处的反射率比, 值越大表示MetMb含量越低, 颜色稳定性越高。

3.8 其他

肉色变化复杂, 且容易受多种因素干扰, 除了上述因素还受其他因素的影响, 如遗传基因因素(包括动物的种类^[86]、年龄^[87]、肌红蛋白一级结构)、高压^[88-89]、饲养方式^[90]、饮食^[91]、屠宰方式^[92]、线粒体功能^[93]、糖酵解^[94]、三羧酸循环代谢中间体(乳酸、丙酮酸、琥珀酸和苹果酸等)、抗菌剂(乙酰丙酸钠、磷酸三钠、二氧化氯)及表面活性剂等。

4 结 语

肉色变化是一个复杂的过程, 动物的种类、饲养方式及贮藏加工过程等均会影响肉色。肉色主要是由肌红蛋白氧化还原状态及肌红蛋白与外源性化学物质形成复合物决定的。因此, 探究肉品中肌红蛋白的理化性质、不同氧化还原态肌红蛋白的定性定量检测方法及引起肉色劣变的影响因素在肉的贮藏与加工中均极为重要。对于影响肌红蛋白稳定性的各类因素研究较多, 但是对于重要因素的影响机制还值得深入研究。紫外分光光度法、近红外光谱法、色谱-质谱法、拉曼光谱和电化学传感器法等可检测肌红蛋白的含量, 但有各自的局限性, 应根据样品的实际情况进行选择。同时, 目前对于不同氧化还原态肌红蛋白的定性定量检测集中于提取后检测, 采用无损检测技术的研究较少, 今后的研究可关注肌红蛋白不同氧化还原态含量的无损检测。随着新技术的不断发展, 相信会有更多的新方法应用到肌红蛋白的结构和定性定量检测中, 为更好地护色、保色提供技术支撑。

参考文献:

[1] 郑浩, 季久秀, 周李生, 等. 猪肉肉色评分与色度值、大理石花纹评分及肌内脂肪含量回归模型的建立[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(1): 124-131. DOI:10.13836/j.jjau.2019016.

[2] TROY D J, KERRY J P. Consumer perception and the role of science in the meat industry[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 214-226. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.05.009.

[3] SEIDEMAN S C, CROSS H R, SMITH G C, et al. Factors associated with fresh meat color: a review[J]. Journal of Food Quality, 1984, 6(3): 211-237. DOI:10.1111/j.1745-4557.1984.tb00826.x.

[4] SMITH G C, BELK K E, SOFOS J N, et al. Antioxidants in muscle foods: nutritional strategies to improve quality[M]. New York: Wiley, 2000: 397-426. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.05.009.

[5] 吴云翔, 易军. 肌红蛋白与 H_2S 反应的结构功能学研究[J]. 生物化学与生物物理进展, 2018, 45(8): 865-874. DOI:10.16476/j.pibb.2018.0047.

[6] 胡煌, 吕飞, 丁玉庭. 肉制品的呈色机理和色泽评定研究进展[J]. 肉类研究, 2016, 30(12): 48-53. DOI:10.15922/j.cnki.rlyj.2016.12.009.

[7] KENDREW J C, DICKERSON R E, STRANDBERG B E, et al. Structure of myoglobin: a three-dimensional Fourier synthesis at 2 Å resolution[J]. Nature, 1960, 185(4711): 422. DOI:10.1038/185422a0.

[8] SUMAN S P, JOSEPH P. Myoglobin chemistry and meat color[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2013, 4: 79-99. DOI:10.1146/annurev-food-030212-182623.

[9] CHURCH N. Developments in modified-atmosphere packaging and related technologies[J]. Trends in Food Science and Technology, 1994, 5(11): 345-352. DOI:10.1016/0924-2244(94)90211-9.

[10] ZHANG Yimin, QIN Libo, MAO Yanwei, et al. Carbon monoxide packaging shows the same color improvement for dark cutting beef as high oxygen packaging[J]. Meat Science, 2018, 137: 153-159. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.11.016.

[11] 黄韬睿, 王鑫, 童光森, 等. 天然色素替代亚硝酸盐在腊肉着色和护色中的应用研究[J]. 食品科技, 2019, 44(2): 134-137. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2019.02.023.

[12] LAURIE R A. Meat science[M]. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1974. DOI:10.1533/9781845691615.

[13] KRZYWICKI K. The determination of haem pigments in meat[J]. Meat Science, 1982, 7(1): 29-36. DOI:10.1016/0309-1740(82)90095-X.

[14] MANCINI R A, RAMANATHAN R. Effects of postmortem storage time on color and mitochondria in beef[J]. Meat Science, 2014, 98(1): 65-70. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.04.007.

[15] TANG J, FAUSTMAN C, HOAGLAND T A. Krzywicki revisited: equations for spectrophotometric determination of myoglobin redox forms in aqueous meat extracts[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(9): C717-C720. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.tb09922.x.

[16] VIRIYARATTANASAK C, HAMADA-SATO N, WATANABE M, et al. Equations for spectrophotometric determination of relative concentrations of myoglobin derivatives in aqueous tuna meat extracts[J]. Food Chemistry, 2011, 127(2): 656-661. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.01.001.

[17] 黄伟, 杨秀娟, 张燕鸣, 等. 近红外光谱技术在肉类定性鉴别中的研究进展[J]. 肉类研究, 2014, 28(1): 31-34.

[18] 王彩萍, 刘应荣. 近红外光谱技术在肉品检测行业中的应用及前景[J]. 现代食品, 2017(2): 25-26. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2017.02.010.

[19] BIJELANOVIC M, SØRHEIM O, SLINDE E, et al. Determination of the myoglobin states in ground beef using non-invasive reflectance spectrometry and multivariate regression analysis[J]. Meat Science, 2013, 95(3): 451-457. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.05.021.

[20] MOHAN A, HUNT M C, BARSTOW T J, et al. Effects of fibre orientation, myoglobin redox form, and postmortem storage on NIR tissue oximeter measurements of beef *Longissimus* muscle[J]. Meat Science, 2010, 84(1): 79-85. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.08.024.



- [21] MOHAN A, HUNT M C, BARSTOW T J, et al. Near-infrared oximetry of three post-rigor skeletal muscles for following myoglobin redox forms[J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 456-464. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.04.068.
- [22] WANG Q, LONERGAN S M, YU C. Rapid determination of pork sensory quality using Raman spectroscopy[J]. Meat Science, 2012, 91(3): 232-239. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.01.017.
- [23] 刘畅, 孟庆翔, 周振明. 拉曼光谱技术在肉品质评价中的应用[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(2): 10-14. DOI:10.19556/j.0258-7033.2017-02-010.
- [24] 张同刚, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 基于拉曼光谱法测定冷鲜牛肉中肌红蛋白相对含量[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 210-214. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201802033.
- [25] OELLINGRATH I M, IVERSEN A, SKREDE G. Quantitative determination of myoglobin and haemoglobin in beef by high-performance liquid chromatography[J]. Meat Science, 1990, 28(4): 313-320. DOI:10.1016/0309-1740(90)90045-8.
- [26] YANCEY E J, GROBBEL J P, DIKEMAN M E, et al. Effects of total iron, myoglobin, hemoglobin, and lipid oxidation of uncooked muscles on livery flavor development and volatiles of cooked beef steaks[J]. Meat Science, 2006, 73(4): 680-686. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.03.013.
- [27] KRYVI H, FLATMARK T, FLATMARK T, et al. The myoglobin content in red, intermediate and white fibres of the swimming muscle sin three species of shark-a comparative study using high performance liquid chromatography[J]. Journal of Fish Biology, 1981, 18(3): 331-338. DOI:10.1111/j.1095-8649.1981.tb03774.x.
- [28] KRANEN R W, VAN KUPPEVELT T H, GOEDHART H A, et al. Hemoglobin and myoglobin content in muscles of broiler chickens[J]. Poultry Science, 1999, 78(3): 467-476. DOI:10.1093/ps/78.3.467.
- [29] MAYR B M, KOHLBACHER O, REINERT K, et al. Absolute myoglobin quantitation in serum by combining two-dimensional liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry and novel data analysis algorithms[J]. Journal of Proteome Research, 2006, 5(2): 414-421. DOI:10.1021/pr050344u.
- [30] WATSON A D, GUNNING Y, RIGBY N M, et al. Meat authentication via multiple reaction monitoring mass spectrometry of myoglobin peptides[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(20): 10315-10322. DOI:10.1021/acs.analchem.5b02318.
- [31] CHEN Jishun, RAN Fengying, CHEN Qinhua, et al. A fluorescent biosensor for cardiac biomarker myoglobin detection based on carbon dots and deoxyribonuclease I-aided target recycling signal amplification[J]. RSC Advances, 2019, 9(8): 4463-4468. DOI:10.1039/C8RA09459D.
- [32] MA Xiaoling, DING Chengjun, ZHANG Pu, et al. Electrochemical characterizations of quaternarized nanodiamond-myoglobin modified electrode[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014, 42(9): 1332-1337. DOI:10.1016/s1872-2040(14)60769-6.
- [33] SUN Chong, WANG Daoying, ZHANG Muhan, et al. Novel L-lactic acid biosensors based on conducting polypyrrole-block copolymer nanoparticles[J]. Analyst, 2015, 140(3): 797-802. DOI:10.1039/C4AN01602E.
- [34] EL-SAID W A, FOUAD D M, EL-SAFY S A. Ultrasensitive label-free detection of cardiac biomarker myoglobin based on surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 228: 401-409. DOI:10.1016/j.snb.2016.01.041.
- [35] KING N J, WHYTE R. Does it look cooked? A review of factors that influence cooked meat color[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(4): R31-R40. DOI:10.1111/j.1750-3841.2006.00029.x.
- [36] CHRISTENSEN L, GUNVIG A, TØRNGREN M A, et al. Sensory characteristics of meat cooked for prolonged times at low temperature[J]. Meat Science, 2012, 90(2): 485-489. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.09.012.
- [37] CHRISTENSEN L, ERTBJERG P, AASLYNG M D, et al. Effect of prolonged heat treatment from 48 °C to 63 °C on toughness, cooking loss and color of pork[J]. Meat Science, 2011, 88(2): 280-285. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.12.035.
- [38] BECKER A, BOULAABA A, PINGEN S, et al. Low temperature, long time treatment of porcine *M. longissimus thoracis et lumborum* in a combi steamer under commercial conditions[J]. Meat Science, 2015, 110: 230-235. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.07.024.
- [39] SEN A R, NAVEENA B M, MUTHUKUMAR M, et al. Colour, myoglobin denaturation and storage stability of raw and cooked mutton chops at different end point cooking temperature[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(5): 970-975. DOI:10.1007/s13197-011-0557-z.
- [40] GARCÍA-SEGOVIA P, ANDRÉS-BELLO A, MARTÍNEZ-MONZÓ J. Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle (*M. pectoralis*)[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 813-821. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2006.07.010.
- [41] LI Xin, ZHANG Yan, LI Zheng, et al. The effect of temperature in the range of -0.8 to 4 °C on lamb meat color stability[J]. Meat Science, 2017, 134: 28-33. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.07.010.
- [42] ROSENVOLD K, WIKLUND E. Retail colour display life of chilled lamb as affected by processing conditions and storage temperature[J]. Meat Science, 2011, 88(3): 354-360. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.01.006.
- [43] 尚坤, 陈金玉, 张坤生, 等. 鸡胸肉冻藏温度下的理化和感官特性变化研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2019.01.001.
- [44] YLÄ-AJOS M, PUOLANNE E. Temperature shows greater impact on bovine *Longissimus dorsi* muscle glycogen debranching enzyme activity than does salt concentration[J]. Meat Science, 2007, 77(4): 587-592. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.05.009.
- [45] JOSEPH P, SUMAN S P, LI S, et al. Mass spectrometric characterization and thermostability of turkey myoglobin[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(2): 273-278. DOI:10.1016/j.lwt.2009.08.019.
- [46] MANCINI R A, KROPF D H, HUNT M C, et al. Effects of endpoint temperature, pH, and storage time on cooked internal color reversion of pork *Longissimus* chops[J]. Journal of Muscle Foods, 2005, 16(1): 16-26. DOI:10.1111/j.1745-4573.2004.07103.x.
- [47] NERIMETLA R, WALGAMA C, RAMANATHAN R, et al. Correlating the electrochemical kinetics of myoglobin-films to pH dependent meat color[J]. Electroanalysis, 2014, 26(4): 675-678. DOI:10.1002/elan.201300630.
- [48] FLETCHER D L, QIAO M, SMITH D P. The relationship of raw broiler breast meat color and pH to cooked meat color and pH[J]. Poultry Science, 2000, 79(5): 784-788. DOI:10.1093/ps/79.5.784.
- [49] 程述震, 刘伟, 冯晓琳, 等. 电子束辐照对冷鲜猪里脊肉品质及蛋白特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(3): 151-156. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201703027.
- [50] 李成梁, 靳国锋, 马素敏, 等. 辐照对肉品品质影响及控制研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 271-278. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201621046.
- [51] NAM K C, AHN D U. Carbon monoxide-heme pigment is responsible for the pink color in irradiated raw turkey breast meat[J]. Meat Science, 2002, 60(1): 25-33. DOI:10.1016/s0309-1740(01)00101-2.

- [52] DU M, HUR S J, AHN D U. Raw-meat packaging and storage affect the color and odor of irradiated broiler breast fillets after cooking[J]. Meat Science, 2002, 61(1): 49-54. DOI:10.1016/s0309-1740(01)00161-9.
- [53] NAM K C, AHN D U. Effects of ascorbic acid and antioxidants on the color of irradiated ground beef[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(5): 1686-1690. DOI:10.1111/j.1365-2621.2003.tb12314.x.
- [54] LI Chengliang, HE Lichao, JIN Guofeng, et al. Effect of different irradiation dose treatment on the lipid oxidation, instrumental color and volatiles of fresh pork and their changes during storage[J]. Meat Science, 2017, 128: 68-76. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.02.009.
- [55] 赵鹏. 新鲜红肉气调包装研究及其在销售环境中的应用[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(1): 221-224. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2018.01.043.
- [56] 陈东杰, 李向阳, 张玉华, 等. 不同包装条件下冷却肉品质变化及腐败菌相研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 281-285; 291. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.13.052.
- [57] MCMILLIN K W. Where is MAP going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat[J]. Meat Science, 2008, 80(1): 43-65. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.05.028.
- [58] RESCONI V C, ESCUDERO A, BELTRÁN J A, et al. Color, lipid oxidation, sensory quality, and aroma compounds of beef steaks displayed under different levels of oxygen in a modified atmosphere package[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(1): S10-S18. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02506.x.
- [59] LUKIC M, PETRONIJEVIC R, PETROVIC Z, et al. Effects of different gas compositions on the color estimations of MAP packaged pork chops[J]. Procedia Food Science, 2015, 5: 168-171. DOI:10.1016/j.profoo.2015.09.048.
- [60] VAN ROOYEN L A, ALLEN P, O'CONNOR D I. The application of carbon monoxide in meat packaging needs to be re-evaluated within the EU: an overview[J]. Meat Science, 2017, 132: 179-188. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.03.016.
- [61] JAYASINGH P, CORNFORTH D P, CARPENTER C E, et al. Evaluation of carbon monoxide treatment in modified atmosphere packaging or vacuum packaging to increase color stability of fresh beef[J]. Meat Science, 2001, 59(3): 317-324. DOI:10.1016/s0309-1740(01)00086-9.
- [62] JOHN L, CORNFORTH D, CARPENTER C E, et al. Color and thiobarbituric acid values of cooked top sirloin steaks packaged in modified atmospheres of 80% oxygen, or 0.4% carbon monoxide, or vacuum[J]. Meat Science, 2005, 69(3): 441-449. DOI:10.1016/j.meatsci.2004.08.013.
- [63] 黄晨, 龙淼. 天然抗氧化剂对动物肉品的作用[J]. 肉类研究, 2015, 29(3): 30-32. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201503008.
- [64] PAPUC C, GORAN G V, PREDESCU C N, et al. Plant polyphenols as antioxidant and antibacterial agents for shelflife extension of meat and meat products: classification, structures, sources, and action mechanisms[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(6): 1243-1268. DOI:10.1111/1541-4337.12298.
- [65] MAIORANO G, ANGWECH H, DI MEMMO D, et al. Effects of intramuscular vitamin E multiple injection on quality, oxidative stability and consumer acceptability of meat from Laticauda lambs fed under natural rearing conditions[J]. Small Ruminant Research, 2016, 139: 52-59. DOI:10.1016/j.smallrumres.2016.05.004.
- [66] KULKARNI S, DESANTOS F A, KATTAMURI S, et al. Effect of grape seed extract on oxidative, color and sensory stability of a pre-cooked, frozen, re-heated beef sausage model system[J]. Meat Science, 2011, 88(1): 139-144. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.12.014.
- [67] AHN J, GRÜN I U, MUSTAPHA A. Effects of plant extracts on microbial growth, color change, and lipid oxidation in cooked beef[J]. Food Microbiology, 2007, 24(1): 7-14. DOI:10.1016/j.fm.2006.04.006.
- [68] YU J, AHMEDNA M, GOKTEPE I. Potential of peanut skin phenolic extract as antioxidative and antibacterial agent in cooked and raw ground beef[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(7): 1337-1344. DOI:10.1111/j.1365-2621.2010.02241.x.
- [69] NEILSON T M, PFEIFFER M M, MAFI G, et al. Pomegranate rind extract limits ground beef color discoloration and lipid oxidation[J]. Meat and Muscle Biology, 2019, 2(2): 185.
- [70] ZHANG Xinzhuang, LI Deyong, MENG Qingxiang, et al. Effect of mulberry leaf extracts on color, lipid oxidation, antioxidant enzyme activities and oxidative breakdown products of raw ground beef during refrigerated storage[J]. Journal of Food Quality, 2016, 39(3): 159-170. DOI:10.1111/jfq.12187.
- [71] HORITA C N, FARÍAS-CAMPOMANES A M, BARBOSA T S, et al. The antimicrobial, antioxidant and sensory properties of garlic and its derivatives in Brazilian low-sodium frankfurters along shelf-life[J]. Food Research International, 2016, 84: 1-8. DOI:10.1016/j.foodres.2016.02.006.
- [72] FERREIRA V C S, MORCUENDE D, HÉRNANDEZ-LÓPEZ S H, et al. Antioxidant extracts from acorns (*Quercus ilex* L.) effectively protect ready-to-eat (RTE) chicken patties irrespective of packaging atmosphere[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(3): 622-631. DOI:10.1111/1750-3841.13640.
- [73] 张建友, 赵瑜亮, 丁玉庭, 等. 脂质和蛋白质氧化与肉制品风味特征相关性研究进展[J]. 核农学报, 2018, 32(7): 1417-1424. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2018.07.1417.
- [74] LYNCH M P, FAUSTMAN C. Effect of aldehyde lipid oxidation products on myoglobin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(3): 600-604. DOI:10.1021/jf990732e.
- [75] NAVEENA B M, FAUSTMAN C, TATIYABORWORNTHAM N, et al. Detection of 4-hydroxy-2-nonenal adducts of turkey and chicken myoglobins using mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 836-840. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.02.062.
- [76] GRUNWALD E W, TATIYABORWORNTHAM N, FAUSTMAN C, et al. Effect of 4-hydroxy-2-nonenal on myoglobin-mediated lipid oxidation when varying histidine content and hemin affinity[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 289-297. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.01.035.
- [77] WANG Zhaoming, HE Zhifei, GAN Xiao, et al. Interrelationship among ferrous myoglobin, lipid and protein oxidations in rabbit meat during refrigerated and superchilled storage[J]. Meat Science, 2018, 146: 131-139. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.08.006.
- [78] 吴成帆, 韩玲, 陈骋, 等. 中国荷斯坦育肥公犊肉贮藏过程中脂肪氧化对肌红蛋白稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 323-327. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.07.059.
- [79] DJIMSA B A, ABRAHAM A, MAFI G G, et al. Effects of metmyoglobin reducing activity and thermal stability of NADH-dependent reductase and lactate dehydrogenase on premature browning in ground beef[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(2): 304-313. DOI:10.1111/1750-3841.13606.
- [80] KIM Y H, HUNT M C, MANCINI R A, et al. Mechanism for lactate-color stabilization in injection-enhanced beef[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(20): 7856-7862. DOI:10.1021/jf061225h.



- [81] MANCINI R A, RAMANATHAN R. Sodium lactate influences myoglobin redox stability *in vitro*[J]. Meat Science, 2008, 78(4): 529-532. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.07.010.
- [82] MANCINI R A, SUMAN S P, KONDA M K R, et al. Mass spectrometric investigations on lactate adduction to equine myoglobin[J]. Meat Science, 2010, 85(2): 363-367. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.02.006.
- [83] JOSEPH P, SUMAN S P, RENTFROW G, et al. Proteomics of muscle-specific beef color stability[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(12): 3196-3203. DOI:10.1021/jf204188v.
- [84] GAO Xiaoguang, WU Wei, MA Changwei, et al. Postmortem changes in sarcoplasmic proteins associated with color stability in lamb muscle analyzed by proteomics[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(4): 527-535. DOI:10.1007/s00217-015-2563-2.
- [85] WU Wei, YU Qianqian, FU Yu, et al. Towards muscle-specific meat color stability of Chinese Luxi yellow cattle: a proteomic insight into post-mortem storage[J]. Journal of Proteomics, 2016, 147: 108-118. DOI:10.1016/j.jprot.2015.10.027.
- [86] ELROY N N, ROGERS J, MAFI G G, et al. Species-specific effects on non-enzymatic metmyoglobin reduction *in vitro*[J]. Meat Science, 2015, 105: 108-113. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.03.010.
- [87] DELLA MALVA A, ALBENZIO M, ANNICCHIARICO G, et al. Relationship between slaughtering age, nutritional and organoleptic properties of Altamurana lamb meat[J]. Small Ruminant Research, 2016, 135: 39-45. DOI:10.1016/j.smallrumres.2015.12.020.
- [88] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.02.024.
- [89] BAK K H, BOLUMAR T, KARLSSON A H, et al. Effect of high pressure treatment on the color of fresh and processed meats: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(2): 228-252. DOI:10.1080/10408398.2017.1363712.
- [90] 杨蓉, 林鹏飞, 吴光松, 等. 不同养殖模式对柯乐猪肌红蛋白含量和肉色的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019(8): 48-50. DOI:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2018.08.0068.
- [91] SALWANI M S, ADEYEMI K D, SARAH S A, et al. Skeletal muscle proteome and meat quality of broiler chickens subjected to gas stunning prior slaughter or slaughtered without stunning[J]. CyTA-Journal of Food, 2016, 14(3): 375-381. DOI:10.1080/19476337.2015.1112838.
- [92] YAGOUBI Y, JOY M, RIPOLL G, et al. Rosemary distillation residues reduce lipid oxidation, increase alpha-tocopherol content and improve fatty acid profile of lamb meat[J]. Meat Science, 2018, 136: 23-29. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.10.007.
- [93] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815036.
- [94] NAIR M N, SUMAN S P, CHATLI M K, et al. Proteome basis for intramuscular variation in color stability of beef semimembranosus[J]. Meat Science, 2016, 113: 9-16. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.11.003.