

## 脂质和蛋白质氧化对肉品质的影响

李泽坤, 肖 宇, 焦 阳, 刘永峰\*

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院 西安 710062)

**摘要** 氧化反应是影响肉品质与加工属性的重要因素,主要来源于脂质氧化和蛋白质氧化,发生在宰后鲜肉成熟和肉类贮藏加工过程中。本文概述近年来脂质氧化和蛋白质氧化对肉品质影响的研究成果,分析肉中脂质和蛋白质发生氧化的内在机理,阐述引起两者氧化的多种因素,剖析脂质氧化对肉色泽、风味、营养价值等品质的影响和蛋白氧化对肉色泽、质构、持水性、风味、营养价值、可消化性等品质的影响,提出降低肉类氧化的控制措施,以期改善肉品质提供理论参考。

**关键词** 肉; 脂质氧化; 蛋白质氧化; 品质

**文章编号** 1009-7848(2024)07-0438-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.07.042

肉和肉制品是人类饮食的基本组成部分,富含蛋白质以及不同数量和比例的贮藏脂类(甘油三酯)和结构脂类(磷脂),由于其中脂质和蛋白质本身的结构属性,因此常被活性氧(Reactive oxygen species, ROS)侵袭,使其自身结构发生变化而被氧化<sup>[1-3]</sup>。

肉中的脂质氧化是由 ROS 攻击多不饱和脂肪酸,引起一系列次级反应的过程,导致脂质降解和氧化酸败,进而影响肉品质<sup>[3]</sup>。虽然已经对肉的颜色和质地进行了广泛研究,但是忽略了蛋白质氧化对肉品质的影响<sup>[4-5]</sup>。在肉和肉制品贮藏或加工过程中(切碎、烹饪、腌制和辐照),游离氧自由基的产生会破坏抗氧化防御系统,导致蛋白质氧化<sup>[6]</sup>。有研究表明蛋白质氧化同脂质氧化反应一样也会发生自由基链式反应,即 ROS 攻击肌肉蛋白,氨基酸残基被破坏并生成羰基化合物。肽主链断裂、脂质氧化、还原糖生成的氨基酸侧链、羰基衍生物的直接氧化是该羰基化过程的主要途径<sup>[1,5]</sup>。适度的氧化降解可以提高肉的营养价值,改善风味。Fallavena 等<sup>[7]</sup>考察了温度和超声强度对牛肉嫩度的影响,发现超声促进了脂质氧化,而脂质氧化促进了风味物质的形成;反之,过度氧化则有损肉

的质构、保水性和风味等。Feng 等<sup>[8]</sup>研究了氧化体系处理的肌浆蛋白对猪肉肌原纤维蛋白凝胶性能的影响,结果发现肌浆蛋白氧化使猪肉肌原纤维持水性下降。质量是影响肉品选择的重要因素,而外观、颜色、质地、味道和香气是影响肉类接受度的关键质量属性<sup>[3]</sup>。在肉类贮藏、加工过程中,控制或使氧化过程最小化的意义重大。本文概述脂肪氧化和蛋白质氧化对肉品质影响的研究成果,为改善氧化作用对肉品质的负面影响提供可行性措施。

### 1 肉类氧化机理

#### 1.1 肉中脂质氧化机理

脂肪氧化是一种非常复杂的、自发的、不可避免的过程。其氧化化合物在成熟或腌制阶段的肉制品的典型香气形成中扮演着重要的角色<sup>[9]</sup>。在屠宰后生化系统中,脂肪氧化主要有 3 个途径:自动氧化、酶促氧化和光氧化,见表 1。

#### 1.2 肉中蛋白质氧化机理

蛋白质氧化是由蛋白质与 ROS 的直接反应或与氧化应激的二级副产物的间接反应诱导的蛋白质修饰<sup>[13]</sup>,相关机理见表 2。肌红蛋白、脂质氧化或金属催化剂主要攻击位于氨基酸侧链上的官能团,会导致不同的蛋白质自由基和羟基衍生物形成,进而引起蛋白质羰基化。肽的主链断裂、脂质氧化、氨基酸侧链直接氧化以及还原糖产生羰基衍生物是该羰基化过程的主要途径<sup>[14]</sup>。氧化产物可以是 Strecker 醛的来源,特别是在没有氧化脂质的情况下<sup>[1]</sup>。蛋白质氧化可以改变包括蛋白质的结构、构象、溶解度、蛋白水解的敏感性和酶活性

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 陕西省科技计划项目 (2022ZDLNY04-09, 2022KXJ-010); 陕西省咸阳市科技项目 (2021ZDZX-NY-0014); 西安市科技计划项目 (22NYGG0012)

第一作者: 李泽坤,女,硕士生

通信作者: 刘永峰 E-mail: yongfeng200@126.com

表 1 脂肪氧化的途径

Table 1 The way of lipid oxidation

途径	内容	地位	产物	参考文献
自动氧化	包括诱导期、传递期和终止期;自由基与脂肪酸烃链发生反应生成过氧化物,过氧化物再与其它脂肪酸烃链反应形成氢过氧化物,被夺取氢原子的碳链作为新的过氧化物,参与新的循环	最主要的氧化方式	醛、酮等小分子化合物	[10]
酶促氧化	动物体内的脂肪氧合酶(Lipoxygenase,LOX)加速氧气与不饱和脂肪酸反应,生成氢过氧化物,进一步反应生成低级脂肪酸、醛、酮等;或是底物自由基与分子氧反应形成过氧化自由基,过氧化自由基被 LOX 中的铁还原为氢过氧化物,而 LOX 中的铁重新转变为活性态 Fe <sup>3+</sup>	脂质氧化过程中不占主导地位	一系列自由基和过氧化氢	[11]
光氧化	不饱和双键与单线态氧直接发生的氧化反应,光敏剂是肌肉中的铁卟啉、肌红蛋白和核黄素	—	—	[12]

注:—. 文献中未发现相关报道。

表 2 诱导蛋白质氧化的作用机制

Table 2 Possible mechanism of action to induce protein oxidation

引发	阶段	反应	参考文献
自由基	起始阶段	$PH(ROS) \rightarrow P \cdot + H \cdot$	[16],[17]
		$P \cdot + O_2 \rightarrow POO \cdot$	
	链传递阶段	$POO \cdot + PH \rightarrow POOH + P \cdot$	
		$POOH + HO_2 \cdot \rightarrow PO \cdot + O_2 + H_2O$	[16]
	终止阶段	$P \cdot + P \cdot \rightarrow P-P$	
脂质氧化	引发	$PO \cdot + HO_2 \cdot \rightarrow POH + O_2$	
	传递	$L \rightarrow L \cdot$	
	抽氢	$L \cdot + O_2 \rightarrow LOO \cdot$	
	延伸	$LOO \cdot + P \rightarrow \cdot LOOH + P(-H)$	
	复合	$LOO \cdot + P \rightarrow \cdot LOOP$	
	聚合	$\cdot LOOP + P + O_2 \rightarrow \cdot POOLLOOP$	
		$P-P \cdot + P \cdot + P \rightarrow P-P-P \cdot + P-P-P$	

注:L. 脂质(Lipid);P. 蛋白质(Protein)。

等理化性质,这些氧化可参与生鲜肉品质的调节并影响肉制品的加工性能<sup>[15]</sup>。

2 影响肉中氧化反应的因素

2.1 影响肉中脂质氧化的因素

很多因素都会影响脂质氧化过程,例如脂肪酸的种类和数量<sup>[18]</sup>、LOX 活性<sup>[12]</sup>、pH 值<sup>[19]</sup>、贮藏温度<sup>[20]</sup>、包装方式<sup>[3]</sup>、金属离子<sup>[3]</sup>、辐照<sup>[21]</sup>、高压<sup>[22]</sup>、超声辅助<sup>[23]</sup>等。谢东娜等<sup>[18]</sup>通过测定过氧化物与丙二醛,研究煮、烤、蒸及微波对鸡肉脂质氧化的影响,发现不同加工方式会影响脂质氧化的速度,在冷藏期内煮制鸡肉脂肪氧化变质速度最快。还有研究表明脂质氧化还与动物的物种有关,牛肌肉中由于含有较多的铁和肌红蛋白,因此生鲜牛肉比

生鲜猪肉和生鲜鸡肉更容易发生脂肪氧化<sup>[24]</sup>。Cheng 等<sup>[21]</sup>通过测定过氧化值和硫代巴比妥酸反应物(Thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)的含量,研究不同剂量(0,2,4,6,8,10 kGy)和贮藏时间(0~30 d)的 $\gamma$ -辐射对冷却猪肉脂质氧化的影响,发现辐射处理加快了脂质氧化,且随着贮藏时间的延长,脂质氧化速度加快。Zou 等<sup>[23]</sup>评估超声辅助烹饪对调味牛肉风味的化学特征的影响,采用 0,400,600,800,1 000 W(频率为 20 kHz)的超声波功率烹饪 120 min,测定了五香牛肉的脂质氧化效果,结果发现超声导致 TBARS 值显著增加,提高了脂质氧化速率。

2.2 影响肉中蛋白质氧化的因素

影响肉类中蛋白质氧化的因素主要包括原料

(高铁肌红蛋白、脂肪、金属离子)、外源物质、加工贮藏工艺3个方面<sup>[20,25-26]</sup>。谢小雷等<sup>[27]</sup>通过分析牛肉色泽的变化,研究中红外-热风组合干燥和热风干燥两种干燥工艺对牛肉色泽的影响,发现中红外-热风组合干燥更能够降低肌红蛋白的氧化。此外,在食用之前,肉类和肉制品要经过一系列的工序,这些工序会损害最终产品的质量,其中包括屠宰、成熟等<sup>[1]</sup>。不同的加工方式都可能导致蛋白质氧化<sup>[28]</sup>。例如:高强度的机械作用,氧化诱导因子的侵入,蛋白质与氧接触面积的增大等情况,都可能加速蛋白质氧化速率<sup>[29]</sup>。瞿丞等<sup>[2]</sup>以鸡肉为原料,测定不同食盐添加量对腌制鸡肉的影响。结果表明,增加食盐的添加量会加快蛋白质的氧化速度。贮藏条件和包装方式也影响蛋白质的氧化变性。对于冷鲜肉来说,包装方式影响蛋白质品质,进而影响肉的营养风味和货架期。Gatellier等<sup>[30]</sup>对牛肉进行65℃恒温加热、96℃恒温加热和持续升温至207℃共3种热处理,通过测定羰基、芳香族氨基酸和游离硫醇含量来评估其蛋白质氧化,发现烹饪的极端条件(207℃/300s)会促进蛋白质氧化。Lund等<sup>[31]</sup>研究猪肉在4℃下贮藏14d期间,改良空气包装(70%O<sub>2</sub>/30%CO<sub>2</sub>)和无氧包装对肉中蛋白质氧化的影响,结果表明,在含氧量高的改良气氛中,包装会导致蛋白质氧化,降低肉的嫩度和多汁性。

### 2.3 脂质和蛋白质的交互氧化

脂质氧化与蛋白质氧化密切相关,各反应的某些标记物相关性较高<sup>[1]</sup>。脂质和蛋白质氧化是自由基链式反应,脂质氧化产生的过氧化氢自由基和次级产物(醛类化合物)会促进蛋白质的氧化<sup>[2,5]</sup>。Wang等<sup>[32]</sup>研究了脂质氧化的副产物丙二醛对兔肉品质的影响,结果发现丙二醛能够使高价肌红蛋白和非血红素铁的数量增大,进而影响ROS生成系统,促进兔肉中蛋白质氧化。Soyer等<sup>[33]</sup>研究了冷冻温度和冷藏时间对鸡腿肉和鸡胸肉的脂质和蛋白质氧化的影响,结果发现,在冷冻贮藏过程中,鸡肉中脂质和蛋白质的氧化同时发生,且鸡腿肉比鸡胸肉更强烈。因此,关于脂质和蛋白质的交互氧化及其对肉品质影响仍有待深入研究,同时还需考虑肉类自身特性,如畜禽的种类、肌肉形态等对氧化的影响。

### 2.4 自身抗氧化系统对肉中氧化反应的影响

肉中自身抗氧化系统由抗氧化酶系统与非酶系统组成:抗氧化酶系统主要以超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase,SOD)、过氧化氢酶(Catalase,CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidases,GPx)为主,SOD可催化超氧阴离子自由基,生成有害的活性氧自由基H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,继而被CAT和GSH-Px清除,这三者具有协同抗氧化作用<sup>[34]</sup>;非酶系统指的是宰后肌肉中的抗氧化物质,如肌肽、生育酚、类胡萝卜素、酚类化合物等<sup>[35]</sup>。根据化合物的不同,其抗氧化机理也不尽相同,可归纳为下列类型<sup>[36]</sup>:一是抑制脂质氧化的链式反应;二是螯合金属离子消除其对脂质氧化的促进作用;三是分解或破坏脂质氧化产生的过氧化物;四是自身无抗氧化能力,然而能增强其它抗氧化剂的抗氧化能力。抗氧化系统和氧化系统之间存在动态平衡,当平衡被破坏后,会加速肉类氧化并影响食用品质和营养品质。

影响肉中抗氧化系统的因素包括动物种类、性别和年龄、饲料成分、饲养条件等。Warren等<sup>[37]</sup>研究了饲料和品种对牛肉食用品质、肌肉颜色和脂质稳定性的影响,结果发现品种对牛肉肌肉脂质稳定性影响较小,而饲喂牧草产生了更高的血浆和肌肉维生素E水平,可降低肉中的脂质氧化水平。Gatellier等<sup>[38]</sup>研究了性别和年龄对牛的背最长肌抗氧化状态的影响,发现饲料精加工方式对牛的抗氧化性能有重要影响,性别和年龄的影响不显著。

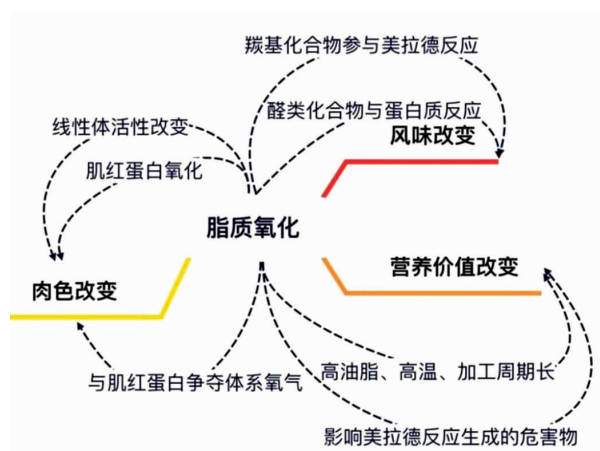
## 3 氧化对肉品质的影响

### 3.1 脂质氧化对肉品质的影响

脂质氧化是含有任意数量的碳-碳双键的脂质的氧化恶化,发生在多个阶段,包括起始、繁殖和终止阶段,并产生各种初级和次级副产品<sup>[39]</sup>。脂质氧化会给蛋白质功能特性带来不利影响,例如:溶解度和保水能力等,并降低某些营养物质的生物利用度<sup>[40]</sup>,见图1。脂肪氧化不仅可以直接生成挥发性风味化合物(如己醛、2-壬烯醛、2,4-壬二烯醛等),其氧化降解产物还能进一步参与美拉德反应,促进肉风味的形成。

#### 3.1.1 脂质氧化对肉色泽的影响 脂质氧化程度



图1 脂质氧化对肉品质的影响<sup>[10,16,44-48]</sup>Fig.1 Influence of lipid oxidation on meat quality<sup>[10,16,44-48]</sup>

会影响肉色稳定性<sup>[12]</sup>,主要通过以下3个途径:脂质氧化产生的初级或次级代谢产物通过促进氧合肌红蛋白( $\text{MbO}_2, \text{Fe}^{2+}$ )氧化,抑制高铁肌红蛋白(Ferric metmyoglobin,  $\text{MetMb}, \text{Fe}^{3+}$ )被酶还原,提升 $\text{MetMb}$ 的促氧化能力来改变肌红蛋白(Ferrous myoglobin,  $\text{Mb}, \text{Fe}^{2+}$ )的稳定性,从而促进 $\text{Mb}$ 氧化,而肉色与 $\text{Mb}$ 氧化状态密切相关<sup>[41-42]</sup>;脂质氧化产物除破坏线粒体的微观结构外,还会降低由线粒体介导的 $\text{MetMb}$ 的还原能力,从而影响肉色稳定性<sup>[43]</sup>;此外,脂质氧化与 $\text{Mb}$ 竞争体系内的氧气也会影响该过程<sup>[12]</sup>。Wang等<sup>[44]</sup>研究了不同零售展示温度(8, 3, -1 °C)对家兔的胸最长肌、腰最长肌变色的影响,结果表明, $\text{Mb}$ 自氧化、脂质氧化和蛋白质氧化共同影响兔肉的色泽变化,其线性混合模型进一步揭示了脂质氧化对色泽发黄有正向影响,对亮度和色泽发红有反向影响。Zakrys等<sup>[45]</sup>研究不同氧浓度(0%, 10%, 20%, 50%, 80%)对牛排质量的影响,并测试牛排在4 °C贮藏时的脂质和蛋白质氧化、血红素铁、颜色、氧肌红蛋白浓度、嫩度和感官可接受性,发现牛排包装系统中含氧量的增加与脂质氧化的增加和颜色稳定性下降有关。

**3.1.2 脂质氧化对肉风味的影响** 肉的风味特性是衡量肉类质量的一个重要指标。脂类是香气生成的重要前体物质,对香气的形成有很大的影响,肉类香味不同主要是脂肪氧化产物存在差异<sup>[46]</sup>。醛类是二级脂质氧化产物中的关键化合物,易与

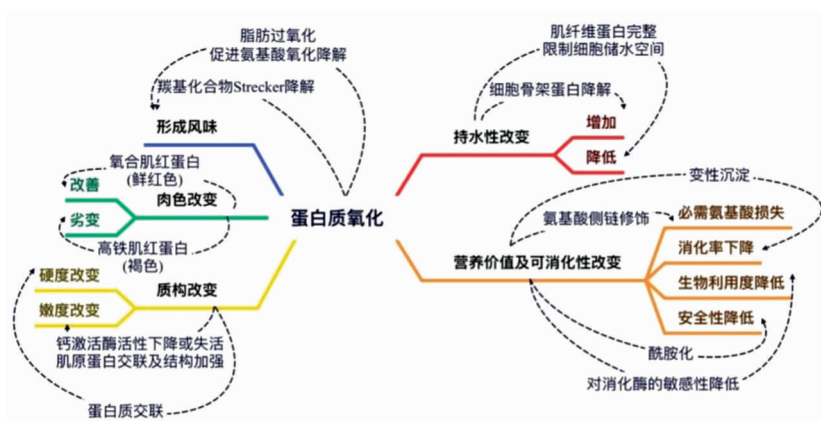
蛋白质发生反应,改变肉的感官和营养特性<sup>[1]</sup>。适度的脂质氧化能使肉风味优良,然而在大多数情况下,脂质氧化会产生酸败味、哈喇味<sup>[5]</sup>。氧化肉类产生异味主要归因于醛类物质,尤其是己醛。酮类物质(如2,3-辛二酮)也会使生鲜肉产生异味<sup>[43]</sup>。另外,脂质氧化降解生成的醛、酮、酸等小分子羰基化合物除自身贡献香味外,还与氨基化合物反应,参与构成美拉德反应体系,从而使肉挥发特有香气<sup>[47]</sup>。Song等<sup>[48]</sup>通过SPME-GC/MS分析在不同氧化条件下牛肉产生的挥发性化合物,表明牛脂的适度氧化是美拉德反应和脂质氧化过程中牛肉风味形成的重要因素。Bai等<sup>[28]</sup>和KEMP等<sup>[49]</sup>调查炒羊肉的风味变化,评估电子鼻和气相色谱-质谱在不同炒制阶段鉴别羊肉风味的可行性,研究发现醛类化合物对炒羊肉的风味贡献最大。

### 3.1.3 脂质氧化对肉类营养价值及消化率的影响

肉类和肉制品的安全性与脂质氧化有一定关系。高油、高温或周期长的加工工艺会导致肉及肉制品中含有更多的有害脂质氧化产物(如羟基十八碳二烯酸、4-羟基壬烯酸、多环芳烃、白细胞毒素和白细胞毒素二醇等)。脂质氧化会影响美拉德反应产物(如丙烯酰胺、5-羟甲基糠醇、杂环胺、*N*-亚硝基化合物、晚期糖基化终末产物等),这类有害氧化产物会通过饮食进入人体内或被输送到组织中,有损于人体健康<sup>[11,31]</sup>。脂质氧化产物会影响氨基酸或者肽链结构,导致必需氨基酸损失,以及蛋白质消化率降低<sup>[50]</sup>。人体内的必需氨基酸大多来源于肉类中的蛋白质。一般人群体内的氨基酸可以通过饮食得到基本满足,而老年人和儿童往往会出现必需氨基酸缺乏。蛋白质必须在消化道内被蛋白酶分解成氨基酸或小肽,才能进入血液并通过小肠壁。消化过程的效率会影响肉类的营养价值,反之,如果蛋白质的消化率降低,大肠中积累的非水解或部分水解蛋白质,可能导致结肠癌<sup>[6]</sup>。Sante-Lhoutellier等<sup>[6]</sup>探讨了氧化条件对猪肉肌原纤维蛋白体外消化率的影响,结果发现在高水平自由基的条件下(如脂质氧化),肌原纤维蛋白氧化会对蛋白质消化率产生负面影响。

## 3.2 蛋白质氧化对肉品质的影响

蛋白质的氧化对肉制品的质量有很大影响,其本质是一种共价修饰作用,通过破坏蛋白质的

图2 蛋白质氧化对肉品质的影响<sup>[25,49,52,67]</sup>Fig.2 Influence of protein oxidation on meat quality<sup>[25,49,52,67]</sup>

分子结构,使蛋白质的氨基酸侧链发生变化,使蛋白质的多肽链断裂,蛋白质分子间发生交联聚合等,从而改变蛋白质的凝胶特性、保水性、消化和营养等特性,进而影响肉的品质<sup>[25]</sup>,如颜色、质地特征、持水性和生物功能等<sup>[5,47]</sup>,见图2。

**3.2.1 蛋白质氧化对肉色泽的影响** 肉的色泽主要由 Mb、MbO<sub>2</sub>、MetMb 的含量决定<sup>[51]</sup>。宰后的肉中 Mb 呈紫色;Mb 与氧结合形成的 MbO<sub>2</sub> 为鲜红色;Mb 或 MbO<sub>2</sub> 被氧化时,生成 MetMb 呈褐色<sup>[6]</sup>。低氧时,脱氧肌红蛋白和 MbO<sub>2</sub> 易被氧化为褐色的 MetMb,而高铁肌红蛋白还原酶可以持续地将 MetMb 还原,使肉色保持稳定。高氧气调包装(含氧量 70%~80%),能够使肉表面的 Mb 氧化为 MbO<sub>2</sub> 而呈鲜红色,提高消费者接受度,从而广泛应用于鲜肉包装<sup>[52]</sup>。Mancini 等<sup>[53]</sup>研究影响肌红蛋白的化学性质、肉色、色素氧化还原稳定性的因素以及用于评估这些因素时,发现牛肉饼变色通常归因于肌红蛋白的积累,可能是肌红蛋白或氧肌红蛋白氧化所致。Utrera 等<sup>[54]</sup>考察了蛋白质和脂质氧化对冷冻储存(-18℃/20周)牛肉的保水能力、颜色和质地受损的影响,发现肉饼在烹饪和冷藏过程中因蛋白质氧化而形成的交联和蛋白质聚合体可能会影响光线的反射,因此会导致颜色的变化。类似的结果也在猪肉饼的冷冻研究中也报道过<sup>[55]</sup>。

**3.2.2 蛋白质氧化对肉质构的影响** 蛋白质氧化会导致肌原纤维蛋白的降解和交联聚集,对肉质构不利<sup>[51]</sup>,主要是影响肉的硬度和嫩度<sup>[5]</sup>。蛋白质

氧化形成席夫碱和二硫键等蛋白质交联化合物,使肉的硬度增大<sup>[56]</sup>。Lorido 等<sup>[57]</sup>比较冷冻(-20℃/20周)后解冻的猪肉与新鲜(未冷冻)猪肉中蛋白质氧化程度(羰基化和席夫碱形成)及其感官特征的差异,发现肉中蛋白质交联的形成与质地恶化有关,因为这些结构可以加强肌肉组织中的蛋白质结构,促进肉制品变硬。肉制品的嫩度也是衡量肉品质的重要指标之一<sup>[58]</sup>。蛋白质氧化会引起肉的嫩度降低,表现在以下2个方面:一是氧化抑制了钙激活酶的活性,甚至使酶失活;二是肌原纤维蛋白交联及其结构的加强<sup>[59]</sup>。Moczowska 等<sup>[60]</sup>调查了包装系统对牛肉蛋白质降解和氧化的影响,包括真空贴体包装、高氧浓度气调保鲜包装及这两种方法的组合中贮藏牛肉的嫩度,发现衰老过程中一些负责维持肌节结构的蛋白质降解和各种多型多肽群的出现与肉嫩度的改善有关。此外,在包装系统中,高浓度的氧气,会影响特定蛋白质降解率的降低,从而影响牛肉的嫩度。Rowe 等<sup>[61]</sup>验证宰后牛肉组织中的氧化条件对蛋白水解的影响,发现死后组织早期通过氧化使  $\mu$ -钙蛋白酶失活,降低了肌原纤维蛋白水解量,从而降低了牛排的嫩化程度。

**3.2.3 蛋白质氧化对肉持水性的影响** 蛋白质氧化交联影响肉的持水性与肌原纤维蛋白和肌浆蛋白中羰基的含量。氧化肌肉的肌纤维细胞间的间隙增大,使持水性下降。Delles 等<sup>[62]</sup>研究了在富氧气氛(HiOx;80%O<sub>2</sub>/20%CO<sub>2</sub>)、可透气聚氯乙烯外包装(Polyvinyl chloride,PVC)或部分真空(Vacu-

um pack, VP)包装的无骨猪腰排中肌原纤维蛋白在2℃下的原位氧化过程,分别长达7,14,21 d,发现贮藏在HiOx中的样品易受蛋白质(羰基、巯基和聚集)氧化的影响,而在PVC和VP中的样品显示出较小的氧化变化,且当贮藏在HiOx中时,原始肌肉的保水能力降低,而在PVC和VP中则没有。Pearce等<sup>[63]</sup>使用台式低场核磁共振的NMR横向弛豫测定,表征了肉中直接影响保水性的肌水分布和流动性以及结构特征,讨论了肉中所含水分的内在特性如何影响肉质的多汁性和嫩度,发现氧化产物与滴水损失显著相关,表明热处理期间氧化蛋白保留水分的能力降低,即蛋白质氧化可能会使持水性下降。

**3.2.4 蛋白质氧化对肉风味的影响** 肉类风味是评定肉品质的主要指标之一,对消费者购买意愿有直接影响<sup>[64]</sup>,而蛋白质氧化主要是在肉发酵、成熟形成风味时产生影响<sup>[65]</sup>。蛋白质氧化生成羰基化合物时发生的Strecker降解,或脂肪过氧化生成特定的氧化产物<sup>[66]</sup>(如丙二醛)促进氨基酸的氧化降解,生成游离氨基酸及游离氧化氨基酸(醛的主要来源),都会影响肉风味的形成<sup>[67]</sup>。Lorenzo等<sup>[68]</sup>研究了干腌马驹腰肉生产过程中发生的理化性质、质地、脂肪分解和挥发性化合物的变化,发现从调味期到干燥成熟的前30 d,挥发性化合物总量增加,在最后阶段下降,在最终产品中醛成为主要的挥发性化合物,而且直链醛(如己醛和庚醛)呈现较高水平。Guo等<sup>[69]</sup>研究了干腌羊肉火腿在0,30,60,90,120,150,180 d贮藏过程中蛋白质水解、蛋白质氧化、风味、颜色和质地的变化,结果显示醛类挥发性化合物对干腌羊肉火腿的风味物质有贡献。综上研究结果,干腌肉中蛋白质在内源酶的作用下降解为小肽和游离氨基酸,或脂质过氧化促使氨基酸氧化降解为游离氨基酸,调节了干腌火腿的风味,因游离氨基酸是构成风味的许多物质的前体,最终促进了腌肉风味的形成。

**3.2.5 蛋白质氧化对肉类营养价值及消化率的影响** 蛋白质氧化对肉类蛋白质营养价值的影响主要包括以下几个方面<sup>[52]</sup>:蛋白质氧化修饰氨基酸侧链,导致必需氨基酸的损失;蛋白质间的交联聚合降低了蛋白质对消化酶的敏感度,使蛋白质消化率下降;过度氧化会引起蛋白质交联、变性和沉

淀,结构紧密,掩埋蛋白酶的酶切位点,最终导致蛋白质消化性下降,削弱蛋白质的营养价值,进而降低肉类的营养价值;而轻度氧化可舒展蛋白质结构,暴露消化酶的酶切位点,导致蛋白质消化性提高<sup>[51]</sup>。蛋白质消化率反映了食物中的蛋白质在消化道中被胃蛋白酶和胰蛋白酶水解的程度,蛋白质消化率越高,被人体吸收利用的机会就越大<sup>[70]</sup>。Li等<sup>[70]</sup>研究了超声预处理和炒制时间对鸡胗品质和蛋白质消化率的影响,发现超声处理后的鸡胗中形成氧化能力强的过氧化氢,导致脂质和蛋白质氧化,使蛋白质消化率升高。Pom  lie等<sup>[71]</sup>使用模拟消化物理化学条件的动态人工消化系统,在研究内源性添加抗坏血酸对肉消化过程中蛋白质羰基化、N-亚硝化和蛋白水解程度的影响时,发现由于人体必需氨基酸对氧化敏感,所以蛋白质氧化会导致肉类的营养价值大幅度下降。此外,羰基可以与非氧化赖氨酸的游离氨基反应,形成分子内或分子间的交联,导致构象变化和聚集,对蛋白质消化率产生负面影响。

## 4 肉类氧化反应的控制措施

随着人们对氧化作用机制和对肉品质影响的认识不断加深,人们开始关注肉类的氧化控制处理措施,包括动物饲养、肉类加工、包装和贮藏。

动物饲养是指改变饲料组成或喂养方法,以减少动物体内脂肪含量,改变含有的脂肪酸比例,减少屠宰后肉类因脂肪氧化而导致的蛋白质氧化<sup>[51]</sup>。一般来说,降低脂肪氧化对肉类影响的饮食策略包括改变饲料的脂肪成分和补充抗氧化剂<sup>[3]</sup>。在动物饮食中添加外源性抗氧化剂可以提高肉类脂质的稳定性,这些抗氧化剂可以减少某些氧化应激源(加热)的影响,从而抑制其对肌肉组织的不利影响<sup>[72]</sup>。Li等<sup>[73]</sup>将异戊烷作为有效的体内标记物,研究活体动物中的氧化应激和长链不饱和脂肪酸的氧化,发现向富含酚类化合物的饲料中补充 $\alpha$ -生育酚,可以提高脂质稳定性,进而改善肉类的氧化稳定性。

不同处理方法对肉和肉制品的氧化有一定影响,因此对加工工艺的控制是延缓肉类产品氧化的重要环节。目前,普遍认为在肉类产品中加入抗氧化剂,可以有效抑制肉类氧化,尤其是一些天然



具有抗氧化性的生物酚类常用于肉类抗氧化。例如:多酚类化合物、维生素、有机酸、亚硝酸盐及磷酸盐或者复配多种抗氧化剂等<sup>[51]</sup>。Hrynets等<sup>[74]</sup>研究不同浓度的柠檬酸和钙离子对使用酸辅助提取工艺制备的分离蛋白的蛋白质产量、颜色特征和脂质去除的影响,发现添加柠檬酸可减少火鸡肉中脂质和色素,促进蛋白质抗脂质氧化,提升其稳定性。何晓娜等<sup>[60]</sup>和 Guo等<sup>[69]</sup>研究添加红葡萄渣水提取物的羊肉肉饼在零售条件下的货架期,发现葡萄渣水提取物较抗坏血酸钠有效减缓了肉饼的变色、脂质和蛋白质氧化,而且采用腌制、干燥等方式也可以减缓氧化。烹饪方式不同对肉氧化程度的影响也不同,例如:蒸制和微波加热可以减缓肉的氧化<sup>[13]</sup>。Domínguez等<sup>[75]</sup>研究了4种烹饪方法(烘烤、烧烤、微波和油炸)对马驹肉脂肪氧化的影响,发现烧烤和油炸较其它方法对脂质氧化的影响较小。Traore等<sup>[76]</sup>测定了猪死后代谢参数和滴水损失,在100℃下进行10 min和30 min的热处理,评估蛋白质、TBARS和席夫碱的物理化学状态,发现两种热处理都增加了表面疏水性、羰基、蛋白质聚集体、席夫碱和TBARS,表明热处理可诱导蛋白质和脂质氧化且降低了肉对蛋白氧化的天然抵抗力。此外,控制加工过程中的主要工艺参数是控制蛋白氧化的常用途径,例如:采用低速、低温、低氧的处理条件<sup>[25]</sup>。对于不同肉类,控制贮藏温度和冻融次数也是贮藏技术的重要环节,最适温度可减少肉品冷冻损伤,保证肉的品质<sup>[28]</sup>。

肉类的氧化状况也与其包装和贮存方法有关,一般采用真空包装以降低氧自由基的生成来控制氧化<sup>[77]</sup>,或采用气调包装控制氧气浓度以减少肉品与氧的接触<sup>[51]</sup>,或通过物理保鲜技术、生物化学保鲜技术与包装技术相结合延缓肉品氧化<sup>[78]</sup>。Bağdatlı等<sup>[79]</sup>研究不同包装方法(常压空气、真空、气调包装和含氮气调包装)和贮藏时间[(4±1)℃下贮藏35 d]对牛排质量和保质期的影响,经物理、化学和感官颜色分析,发现就脂质氧化水平而言,真空包装肉品的保质期最长。Duun等<sup>[80]</sup>研究了超冷冻真空包装的无骨猪肉烤肉在贮藏16周期间的感官、物理、生化和微生物参数,发现与3.5℃的传统冷藏贮藏相比,真空包装猪肉在-2.0℃下冷冻显著提高了货架期。

## 5 总结

脂肪和蛋白质氧化都会影响肉的品质:脂肪的氧化会对肉的颜色、风味和营养价值等产生影响;蛋白质的氧化会影响肉的色泽、质地、持水性和营养价值及可消化性等。适度的氧化对肉品质有益,而过度的氧化会使肉劣变,对人体健康产生不利影响。肉品质变化不仅是单一的脂质和蛋白质氧化造成的,更多的是两者交互氧化的结果。然而,前期研究多以脂肪氧化与肌红蛋白氧化之间的关系为重点,鲜有其它方面的研究,且缺乏系统的理论依据。肉的氧化具有特异性,针对不同肉类的交互氧化仍需进一步探索,对提高肉类品质,延长肉类保质期,节约食用资源具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] GUYON C, MEYNIER A, DE LAMBALLERIE M. Protein and lipid oxidation in meat: A review with emphasis on high-pressure treatments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 50: 131-143.
- [2] 瞿丞, 贺稚非, 王兆明, 等. 不同食盐添加量腌制对鸡肉脂质氧化、蛋白质氧化及食用品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 77-85.
- [3] QU C, HE Z F, WANG Z M, et al. Effects of different salt concentrations on lipid oxidation, protein oxidation and eating quality of cured chicken meat[J]. Food Science, 2020, 41(16): 77-85.
- [4] AMARAL A B, SILVA M V, LANNES S C S. Lipid oxidation in meat: Mechanisms and protective factors—a review[J]. Food Science and Technology, 2018, 38: 1-15.
- [5] NAKYINSIGE K, SAZILI A Q, AGHWAN Z A, et al. Development of microbial spoilage and lipid and protein oxidation in rabbit meat[J]. Meat Science, 2015, 108: 125-131.
- [6] 王兆明, 贺稚非, 李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品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.
- [7] WANG Z M, HE Z F, LI H J. A review of the effect of lipid and protein oxidation on meat quality and their interrelationship[J]. Food Science, 2018, 39(11): 295-301.
- [8] SANTE-LHOUTELLIER V, AUBRY L, GATELLIER P. Effect of oxidation on *in vitro* digestibility of

- skeletal muscle myofibrillar proteins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(13): 5343–5348.
- [7] FALLAVENA L P, MARCZAK L D F, MERCALI G D. Ultrasound application for quality improvement of beef biceps femoris physicochemical characteristics [J]. *LWT*, 2020, 118: 108817.
- [8] FENG X L, WU D, YANG K, et al. Effect of sarcoplasmic proteins oxidation on the gel properties of myofibrillar proteins from pork muscles[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(5): 1835–1844.
- [9] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products[J]. *Antioxidants*, 2019, 8(10): 429.
- [10] 黄莉, 孔保华, 李菁, 等. 氧化引起肉及肉制品品质劣变的机理及影响因素[J]. *食品科学*, 2011, 32(9): 319–323.
- HUANG L, KONG B H, LI J, et al. Advances in studies of quality deterioration mechanism of meat and meat products caused by oxidation and influencing factors[J]. *Food Science*, 2011, 32(9): 319–323.
- [11] 李颖, 李保玲, 范鑫, 等. 脂肪氧合酶催化亚油酸氧化对猪肌原纤维蛋白乳化性能的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 85–91.
- LI Y, LI B L, FAN X, et al. Effect of lipoxygenase-catalyzed linoleic acid oxidation on the emulsifying properties of porcine myofibrillar protein [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(13): 85–91.
- [12] 刘文轩, 罗欣, 杨啸吟, 等. 脂质氧化对肉色影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 238–247.
- LIU W X, LUO X, YANG X Y, et al. Recent progress in research on the effect of lipid oxidation on meat color[J]. *Food Science*, 2020, 41(21): 238–247.
- [13] ZHANG W G, XIAO S, AHN D U. Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(11): 1191–1201.
- [14] FU Q Q, LIU R, ZHANG W G, et al. Effects of different packaging systems on beef tenderness through protein modifications[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(3): 580–588.
- [15] 胡春林, 谢晶. 蛋白质氧化对肉食用品质影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 275–281.
- HU C L, XIE J. Progress in understanding the effect of protein oxidation on the eating quality of meat[J]. *Food Science*, 2021, 42(17): 275–281.
- [16] 孟彤, 刘源, 仇春泱, 等. 蛋白质氧化及对肉品质影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(1): 173–181.
- MENG T, LIU Y, QIU C Y, et al. Research progress on protein oxidation mechanisms and its effects on meat quality[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(1): 173–181.
- [17] 杜宇凡, 姜晴晴, 施文正, 等. 冷冻水产品脂肪和蛋白质氧化及其控制措施研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(6): 429–435.
- DU Y F, JIANG Q Q, SHI W Z, et al. Research progress on oxidation of lipid and protein in frozen aquatic products and its control measures[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(6): 429–435.
- [18] 谢东娜, 王道营, 闫征, 等. 加热方式对鸡肉制品不同部位脂质氧化的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 29–36.
- XIE D N, WANG D Y, YAN Z, et al. Effect of heating methods on lipid oxidation in different parts of chicken products[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(6): 29–36.
- [19] AMARAL A B, SILVA M V D, LANNES S C D S. Lipid oxidation in meat: Mechanisms and protective factors: A review[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 38(Suppl 1): 1–15.
- [20] RASINSKA E, RUTKOWSKA J, CZARNIECKA-SKUBINA E, et al. Effects of cooking methods on changes in fatty acids contents, lipid oxidation and volatile compounds of rabbit meat [J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2019, 110: 64–70.
- [21] CHENG A W, WAN F C, XU T C, et al. Effect of irradiation and storage time on lipid oxidation of chilled pork [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2011, 80(3): 475–480.
- [22] BOLUMAR T, ORLIEN V, SIKES A, et al. High-pressure processing of meat: Molecular impacts and industrial applications[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(1): 332–368.
- [23] ZOU Y H, KANG D C, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles



- of taste and flavor of spiced beef[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 46: 36–45.
- [24] MIN B, NAM K C, CORDRAY J, et al. Endogenous factors affecting oxidative stability of beef loin, pork loin, and chicken breast and thigh meats[J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(6): C439–C446.
- [25] 袁凯, 张龙, 谷东陈, 等. 肉品中的蛋白质氧化机制及其影响因素[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 329–335.
- YUAN K, ZHANG L, GU D C, et al. A review of mechanisms and factors affecting protein oxidation in meat[J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 329–335.
- [26] 黄莉, 孔保华, 夏秀芳, 等. 脂肪添加量和冻藏时间对冷冻水饺肉馅肌原纤维蛋白氧化和凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 261–266.
- HUANG L, KONG B H, XIA X F, et al. Influence of fat addition and frozen storage time on oxidation and gelation of myofibrils from frozen dumplings fillers[J]. *Food Science*, 2013, 34(4): 261–266.
- [27] 谢小雷, 李侠, 张春晖, 等. 不同干燥方式对牛肉干物性特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 346–354.
- XIE X L, LI X, ZHANG C H, et al. Effects of different drying methods on physical characteristics of beef jerky[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(S1): 346–354.
- [28] BAI S, WANG Y R, LUO R M, et al. Formation of flavor volatile compounds at different processing stages of household stir-frying mutton sao zi in the northwest of China[J]. *LWT*, 2021, 139: 110735.
- [29] VIEIRA S A, ZHANG G D, DECKER E A. Biological implications of lipid oxidation products[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2017, 94(3): 339–351.
- [30] GATELLIER P, KONDOYAN A, PORTANGUEN S, et al. Effect of cooking on protein oxidation in n-3 polyunsaturated fatty acids enriched beef. Implication on nutritional quality[J]. *Meat Science*, 2010, 85(4): 645–650.
- [31] LUND M N, LAMETSCH R, HVIID M S, et al. High-oxygen packaging atmosphere influences protein oxidation and tenderness of porcine longissimus dorsi during chill storage[J]. *Meat Science*, 2007, 77(3): 295–303.
- [32] WANG Z M, HE Z F, EMARA A M, et al. Effects of malondialdehyde as a byproduct of lipid oxidation on protein oxidation in rabbit meat[J]. *Food Chemistry*, 2019, 288: 405–412.
- [33] SOYER A, ÖZALP B, DALMIŞ Ü, et al. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(4): 1025–1030.
- [34] 刘畅, 罗玉龙, 张亚琨, 等. 苏尼特羊不同部位肌肉抗氧化系统的差异[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(3): 291–297.
- LIU C, LUO Y L, ZHANG Y K, et al. Differences of muscle antioxidant system in different positions of sunit sheep[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(3): 291–297.
- [35] 罗玉龙, 刘畅, 李文博, 等. 两种饲养方式下苏尼特羊肉的氧化稳定性[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 30–35.
- LUO Y L, LIU C, LI W B, et al. Effects of two feeding patterns on oxidation stability of Sunit sheep meat[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 30–35.
- [36] 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.
- CHEN P. Effects of lipid oxidation and antioxidant factors on color stability and metmyoglobin reducing ability of yak muscle[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.
- [37] WARREN H E, SCOLLAN N D, NUTE G R, et al. Effects of breed and a concentrate or grass silage diet on beef quality in cattle of 3 ages. II: Meat stability and flavor[J]. *Meat Science*, 2008, 78(3): 270–278.
- [38] GATELLIER P, MERCIER Y, RENNERRE M. Effect of diet finishing mode (pasture or mixed diet) on antioxidant status of Charolais bovine meat[J]. *Meat Science*, 2004, 67(3): 385–394.
- [39] HUANG X, UK AHN D. Lipid oxidation and its implications to meat quality and human health[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(5): 1275–1285.
- [40] FALOWO A B, FAYEMI P O, MUCHENJE V. Natural antioxidants against lipid-protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review[J]. *Food Research International*, 2014, 64: 171–181.

- [41] 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.
- [42] NAVEENA B M, FAUSTMAN C, TATIYABOR-WORNTAM 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.
- [43] CHEN C, YU Q L, HAN L, et al. Effects of aldehyde products of lipid oxidation on the color stability and metmyoglobin reducing ability of bovine longissimus muscle[J]. *Animal Science Journal*, 2018, 89(5): 810-816.
- [44] WANG Z M, TU J C, ZHOU H, et al. A comprehensive insight into the effects of microbial spoilage, myoglobin autoxidation, lipid oxidation, and protein oxidation on the discoloration of rabbit meat during retail display[J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108359.
- [45] ZAKRYS P I, HOGAN S A, O'SULLIVAN M G, et al. Effects of oxygen concentration on the sensory evaluation and quality indicators of beef muscle packed under modified atmosphere[J]. *Meat Science*, 2008, 79(4): 648-655.
- [46] 罗玉龙, 靳志敏, 刘夏炜, 等. 肉制品中香味物质形成原因研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41 (2): 254-258.
- LUO Y L, JIN Z M, LIU X W, et al. Development of research on aroma of mechanism in meat products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(2): 254-258.
- [47] 于亚辉, 杨亚平, 方婷. 肉香味物质研究进展[J]. *中国调味品*, 2019, 44(10): 173-177.
- YU Y H, YANG Y P, FANG T. Research progress of meat aroma substances [J]. *China Condiment*, 2019, 44(10): 173-177.
- [48] SONG S Q, ZHANG X M, HAYAT K, et al. Formation of the beef flavour precursors and their correlation with chemical parameters during the controlled thermal oxidation of tallow[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(1): 203-209.
- [49] KEMP C M, SENSKY P L, BARDSLEY R G, et al. Tenderness—An enzymatic view[J]. *Meat Science*, 2010, 84(2): 248-256.
- [50] 朱士臣, 俞杰航, 相兴伟, 等. 鱼糜冷冻稳定剂的种类及作用机理[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 401-412.
- ZHU S C, YU J H, XIANG X W, et al. Classification and the corresponding mechanisms of frozen stabilizers for cryopreservation surimi[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(1): 401-412.
- [51] 叶凤凌, 周敏之, 池玉闽, 等. 蛋白氧化对肉品质影响及其控制方法研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(15): 315-322.
- YE F L, ZHOU M Z, CHI Y M, et al. Progress in effects of protein oxidation on meat quality and its control methods[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(15): 315-322.
- [52] 黄琳琳, 张一敏, 朱立贤, 等. 蛋白质氧化和翻译后修饰对肉品质的影响及机制研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 241-247.
- HUANG L L, ZHANG Y M, ZHU L X, et al. Advances in research of the effects and mechanisms of protein oxidation and post-translational modification on meat quality[J]. *Food Science*, 2021, 42 (9): 241-247.
- [53] MANCINI R A, HUNT M C. Current research in meat color[J]. *Meat science*, 2005, 71(1): 100-121.
- [54] UTRERA M, MORCUENDE D, ESTÉVEZ M. Fat content has a significant impact on protein oxidation occurred during frozen storage of beef patties[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2014, 56(1): 62-68.
- [55] GANHÃO R, MORCUENDE D, ESTÉVEZ M. Protein oxidation in emulsified cooked burger patties with added fruit extracts: Influence on colour and texture deterioration during chill storage[J]. *Meat Science*, 2010, 85(3): 402-409.
- [56] SOLADOYE O P, JUÁREZ M L, AALHUS J L, et al. Protein oxidation in processed meat: Mechanisms and potential implications on human health[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(2): 106-122.
- [57] LORIDO L, VENTANAS S, AKCAN T, et al. Effect of protein oxidation on the impaired quality of dry-cured loins produced from frozen pork meat[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 1310-1314.
- [58] ZAKRYS P I, HOGAN S A, O'SULLIVAN M G, et al. Effects of oxygen concentration on the sensory evaluation and quality indicators of beef muscle

- packed under modified atmosphere[J]. *Meat Science*, 2008, 79(4): 648–655.
- [59] LUND M N, HEINONEN M, BARON C P, et al. Protein oxidation in muscle foods: A review [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2011, 55(1): 83–95.
- [60] MOCZKOWSKA M, PÓŁTORAK A, MONTOWSKA M, et al. The effect of the packaging system and storage time on myofibrillar protein degradation and oxidation process in relation to beef tenderness[J]. *Meat Science*, 2017, 130: 7–15.
- [61] ROWE L J, MADDOCK K R, LONERGAN S M, et al. Oxidative environments decrease tenderization of beef steaks through inactivation of  $\mu$ -calpain[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(11): 3254–3266.
- [62] DELLES R M, XIONG Y L. The effect of protein oxidation on hydration and water-binding in pork packaged in an oxygen-enriched atmosphere[J]. *Meat Science*, 2014, 97(2): 181–188.
- [63] PEARCE K L, ROSENVOLD K, ANDERSEN H J, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—A review[J]. *Meat Science*, 2011, 89(2): 111–124.
- [64] 李少颀. 肉类风味影响因素研究进展[J]. *中国调味品*, 2020, 45(2): 188–191.
- LI S J. Research progress of meat flavor influencing factors[J]. *China Condiment*, 2020, 45(2): 188–191.
- [65] VILLALOBOS-DELGADO L H, CARO I, BLANCO C, et al. Quality characteristics of a dry-cured lamb leg as affected by tumbling after dry-salting and processing time [J]. *Meat Science*, 2014, 97(1): 115–122.
- [66] 何晓娜, 杨晓玲, 王宏博, 等. 羊肉冷藏期间蛋白与脂质氧化及风味变化分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 36–42.
- HE X N, YANG X L, WANG H B, et al. Analysis of change of protein and lipid oxidation and flavor in mutton during refrigeration storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 36–42.
- [67] 韦诚, 朱丽娟, 谢月英, 等. 蛋白质在肉类加工保藏中的氧化及其不利影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 314–321.
- WEI C, ZHU L J, XIE Y Y, et al. Progress in protein oxidation during meat processing and preservation and its adverse health effects[J]. *Food Science*, 2017, 38(9): 314–321.
- [68] LORENZO J M, CARBALLO J. Changes in physico-chemical properties and volatile compounds throughout the manufacturing process of dry-cured foal loin[J]. *Meat Science*, 2015, 99: 44–51.
- [69] GUO X, WANG Y Q, LU S L, et al. Changes in proteolysis, protein oxidation, flavor, color and texture of dry-cured mutton ham during storage [J]. *LWT*, 2021, 149: 111860.
- [70] LI H J, KONG B H, LIU Q, et al. Ultrasound pretreatment for improving the quality and protein digestibility of stir-frying chicken gizzards[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111782.
- [71] DE LA POMÉLIE D, SANTÉ-LHOUTELLIER V, SAYD T, et al. Oxidation and nitrosation of meat proteins under gastro-intestinal conditions: Consequences in terms of nutritional and health values of meat[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 295–304.
- [72] ISMAIL I B, AL-BUSADAH K A, EL-BAHR S M. Oxidative stress biomarkers and biochemical profile in broilers chicken fed zinc bacitracin and ascorbic acid under hot climate[J]. *American Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2013, 3(2): 202–214.
- [73] LI Y F, LIU S. Reducing lipid peroxidation for improving colour stability of beef and lamb: On-farm considerations[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(4): 719–729.
- [74] HRYNETS Y, OMANA D A, XU Y, et al. Impact of citric acid and calcium ions on acid solubilization of mechanically separated turkey meat: Effect on lipid and pigment content[J]. *Poultry Science*, 2011, 90(2): 458–466.
- [75] DOMÍNGUEZ R, GÓMEZ M, FONSECA S, et al. Effect of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat[J]. *Meat Science*, 2014, 97(2): 223–230.
- [76] TRAORE S, AUBRY L, GATELLIER P, et al. Effect of heat treatment on protein oxidation in pig meat[J]. *Meat Science*, 2012, 91(1): 14–21.
- [77] 姚倩儒, 陈历水, 李慧, 等. 冷鲜肉保鲜包装技术



- 现状和发展趋势[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 194–200.
- YAO Q R, CHEN L S, LI H, et al. Current situation and development trend of packaging technology for chilled fresh meat [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 194–200.
- [78] 杨辉. 植物精油-EVOH 活性包装薄膜的研制及其保鲜效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- YANG H. The preparation and preservation performance of essential oils-EVOH active packaging films [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [79] BAĞDATLI A, KAYAARDI S. Influence of storage period and packaging methods on quality attributes of fresh beef steaks [J]. CyTA –Journal of Food, 2015, 13(1): 124–133.
- [80] DUUN A S, HEMMINGSEN A K T, HAUGLAND A, et al. Quality changes during superchilled storage of pork roast[J]. LWT–Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2136–2143.

### Effects of Lipid and Protein Oxidation on Meat Quality

Li Zekun, Xiao Yu, Jiao Yang, Liu Yongfeng\*

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062)

**Abstract** Oxidation is a key factor influencing the quality of meat and its processing performance. It mainly comes from lipid oxidation and protein oxidation, which occurs in the ripening of fresh meat after slaughter and during meat processing and storage. The effects of lipid oxidation and protein oxidation on meat quality in recent years were reviewed in this paper. This paper not only analyzes the internal mechanism of the oxidation of lipid and protein in meat, but also expounds the various factors that cause the oxidation of lipid and protein. The effects of lipid oxidation on meat color, flavor, nutritional value and other qualities and the effects of protein oxidation on meat color, texture, water holding capacity, flavor, nutritional value, digestibility, and other qualities are also analyzed in detail. In addition, the control measures to reduce meat oxidation were put forward. These are hoped to provide theoretical reference for improving meat quality.

**Keywords** meat; lipid oxidation; protein oxidation; quality