

# 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

韦 诚<sup>1</sup>, 朱丽娟<sup>1</sup>, 谢月英<sup>1</sup>, 袁 敏<sup>1</sup>, 周才琼<sup>1,2,\*</sup>

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2.重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

**摘 要:** 不同的加工步骤可能会影响肉品的物化性质及营养价值, 甚至产生对人体健康有害的化合物。例如, 已观察到某些热处理可增加自由基含量, 降低抗氧化保护能力, 促进蛋白质氧化。鉴于某些肉类加工保藏方法可能促进蛋白质氧化进而影响肉品食用品质乃至加速肉类劣变, 本文探讨了常见肉品加工保藏方法及其相关新技术对蛋白质氧化的影响, 及蛋白质氧化对肉品品质及人体健康的不利影响, 旨在为加工保藏中有关蛋白质氧化及合理化食品加工技术提供相关参考。

**关键词:** 肉类; 蛋白质氧化; 加工和保藏技术; 人体健康

## Progress in Protein Oxidation during Meat Processing and Preservation and Its Adverse Health Effects

WEI Cheng<sup>1</sup>, ZHU Lijuan<sup>1</sup>, XIE Yueying<sup>1</sup>, YUAN Min<sup>1</sup>, ZHOU Caiqiong<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Engineering Research Center of Regional Food, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Different processing steps may influence physicochemical properties and nutritional value of meat products, and even produce some compounds that are detrimental to human health. Thermal treatment, for instance, has been observed to increase free radical contents and reduce antioxidant capacity in meat systems, both of which contribute to protein oxidation. Some meat processing and preservation methods may promote protein oxidation and then affect the sensory quality of meat products, and even accelerate the quality deterioration. Thus, this article discusses the impact of common meat processing and preservation methods and related new technologies on protein oxidation as well as the adverse effects of protein oxidation on human health, with the aim to provide a reference for further studies on protein oxidation during meat processing and preservation and the development of reasonable food processing technologies.

**Key words:** meat; protein oxidation; processing and preservation techniques; human health

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709048

中图分类号: TS251

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 09-0314-08

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709048. <http://www.spkx.net.cn>

WEI Cheng, ZHU Lijuan, XIE Yueying, et al. Progress in protein oxidation during meat processing and preservation and its adverse health effects[J]. Food Science, 2017, 38(9): 314-321. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709048. <http://www.spkx.net.cn>

肉类提供人类重要的营养物质, 特别是高质量蛋白。但新近流行病学报道过度食用腌制或加工红肉制品与心血管疾病和结肠癌存在一定联系<sup>[1-2]</sup>, 这可能与摄入的肉类食品在加工保藏和随后消化过程中蛋白质氧化程度提高有关<sup>[3]</sup>。蛋白质氧化是指蛋白质直接被活性物质

诱导或间接与氧化应激的副产物反应引起的共价修饰。目前普遍认为这种氧化修饰是由活性氧(reactive oxygen species, ROS)、活性氮(reactive nitrogen species, RNS)、脂质氧化产物引发<sup>[4-5]</sup>。这些修饰可能会对肉的感官品质或加工特性甚至消费者的健康产生消极影响<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2016-05-17

基金项目: 重庆市特色食品工程技术研究中心能力提升项目(cstc2014pt-gc8001)

作者简介: 韦诚(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品化学与营养学。E-mail: 648950178@qq.com

\*通信作者: 周才琼(1964—), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品营养化学。E-mail: zhouchaiqiong@swu.edu.cn

考虑到工业或家庭加工贮藏过程中一些处理能引发肉类蛋白质氧化<sup>[4]</sup>,从食物与营养科学角度出发,目前的研究焦点集中在食品加工保藏中蛋白质氧化对食品品质的影响及摄食蛋白氧化产物后可能引起的氧化应激和某些疾病方面。尽管这方面的研究近几年有一定发展,但进一步了解蛋白质氧化机制以及蛋白质氧化对营养和健康的影响仍需要更深入的研究。因此,本文综述了常用食品加工保藏方法及其相关新技术对肉类蛋白质氧化的影响及氧化对肉品、人体健康的消极作用,旨在促进这一领域的深入研究。

## 1 蛋白质氧化及氧化机理

### 1.1 蛋白质氧化的引发

无论体内外,蛋白质氧化多由活性自由基及相关氧化产物引发。活性自由基包括ROS(如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 等)、RNS( $\text{NO}$ 、 $\cdot\text{NO}_2$ 等)和脂质氧化产生的活性醛、酮等<sup>[5]</sup>。在正常新陈代谢、辐照及化学因素如杀虫剂、金属催化剂等诱导下,这些物质都有可能产生。Xiong Youling L.<sup>[6]</sup>报道,肌肉体系中形成ROS的前体物质或催化剂的不饱和脂肪、亚铁血红素、过渡金属和氧化酶在蛋白质氧化引发过程中也起着重要作用。

### 1.2 蛋白质氧化的可能机制

关于肌肉组织中蛋白质暴露在氧化应激时的变化尚不清楚,但作用机制类似于脂肪的氧化,包括起始、传递、终止3个阶段<sup>[4,7]</sup>,其易被内源血红素化合物、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 及加工保藏中生成的氧化物质如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{ROO}\cdot$ 、 $\text{RO}\cdot$ 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 氧化。如肌肉中血红素铁转变成非血红素铁时,其与过渡金属离子(如铜离子)在 $\text{H}_2\text{O}_2$ 等存在下发生Fenton反应产生高活性的 $\text{OH}\cdot$ , $\text{OH}\cdot$ 与其他组分反应会引发蛋白质、脂质和核酸氧化性损伤<sup>[5]</sup>。目前关于蛋白质氧化的机制主要有金属离子催化的氧化体系中蛋白发生氧化以及由于脂质过氧化产物如丙二醛、羟基壬烯酸和丙烯醛的醛基通过共价结合蛋白质残基诱发的蛋白质氧化<sup>[8-9]</sup>。蛋白质发生氧化的可能机制见表1。

表1 蛋白质发生氧化的可能机制<sup>[4-5]</sup>  
Table 1 Possible mechanisms of protein oxidation in meat<sup>[4-5]</sup>

反应阶段	金属离子催化的蛋白氧化	脂质过氧化诱发的蛋白质氧化
1	$\text{PH}+\text{OH}\rightarrow\text{P}\cdot+\text{H}_2\text{O}$	引发: $\text{L}\rightarrow\text{L}\cdot$
2	$\text{P}\cdot+\text{O}_2\rightarrow\text{POO}\cdot$	传递: $\text{L}\cdot+\text{O}_2\rightarrow\text{LOO}\cdot$
3	$\text{POO}\cdot+\text{PH}\rightarrow\text{POOH}+\text{P}\cdot$	抽氢: $\text{LOO}\cdot+\text{P}\rightarrow\text{LOOH}+\text{P}\cdot(-\text{H})$
4	$\text{POOH}+\text{HO}_2\cdot\rightarrow\text{PO}\cdot+\text{O}_2+\text{H}_2\text{O}$	延伸: $\text{LOO}\cdot+\text{P}\rightarrow\cdot\text{LOOP}$
5	$\text{POOH}+\text{M}^{n+}\rightarrow\text{PO}\cdot+\text{HO}^-+\text{M}^{(n+1)+}$	复合: $\cdot\text{LOOP}+\text{P}+\text{O}_2\rightarrow\cdot\text{POOL}\text{LOOP}$
6	$\text{PO}\cdot+\text{HO}_2\cdot\rightarrow\text{POH}+\text{O}_2$	聚合: $\text{P}-\text{P}\cdot+\text{P}\cdot+\text{P}\rightarrow\text{P}-\text{P}-\text{P}\cdot+\text{P}-\text{P}-\text{P}\cdot$
7	$\text{PO}\cdot+\text{H}^++\text{M}^{n+}\rightarrow\text{POH}+\text{M}^{(n+1)+}$	

注: M 为过渡金属; L 为脂质; P 为蛋白质。

### 1.3 蛋白质氧化标志

自由基攻击会导致蛋白质发生交联、分裂和氨基酸侧链的修饰<sup>[10]</sup>,每种反应会产生特定氧化衍生物。但由于自由基种类和蛋白质靶点及氧化产物繁多,选择唯一能代表食品体系蛋白质氧化程度的标志比较困难。组成蛋白的氨基酸中,含硫氨基酸、半胱氨酸和甲硫氨酸是最容易发生氧化的氨基酸;芳香族和脂肪族氨基酸侧链易被羟基化;精氨酸、赖氨酸和脯氨酸等氨基酸侧链易被氧化形成羰基残基;半胱氨酸、蛋氨酸被氧化后形成二硫键交联或含硫衍生物<sup>[11]</sup>。因此,常用蛋白质羰基生成、硫醇基损失、蛋白质分裂和聚合等来分析蛋白质氧化程度<sup>[10]</sup>。

蛋白氧化的标志取决于蛋白质的性质、氧化产物的形成途径、氧化体系类型和氧化强度。如羰基化合物 $\alpha$ -氨基己二醛( $\alpha$ -amino adipic semialdehyde, AAS)、 $\gamma$ -谷氨酸半醛( $\gamma$ -glutamyl semialdehyde, GGS)可作为发酵香肠蛋白氧化标志<sup>[12]</sup>,3-硝基酪氨酸可作为火腿中蛋白质氧化的潜在标志<sup>[13]</sup>。所以,为保证研究中获得更具体有效的结论,还需致力于对不同肉类蛋白质氨基酸组成特性及肉蛋白在不同的加工保藏过程中的氧化特性及氧化性损伤机理进行更深入的研究。

## 2 加工保藏技术对肉类蛋白质氧化的影响

肉类加工通常是为了增强或改变肉的感官特性(成熟、烹饪)或满足加工要求(如腌制、烟熏)或便于贮藏(如冻藏,辐照和封装)。然而,由于肉类富含蛋白和促氧化因子,这些加工处理很可能会引发蛋白质发生不同程度的氧化,导致蛋白质质量和加工品质下降。如禽肉蛋白的氧化应激会导致一定程度的羰基化,这种程度在不同肌肉类型和成熟期而不同<sup>[10,14]</sup>。一些肉类在不同加工保藏处理中蛋白质氧化产物见表2。

表2 不同加工和保藏技术制备肉制品中的氧化产物

Table 2 Protein oxidation products in some processed meat products

加工肉制品	加工保藏技术	氧化产物	参考文献
南京咸水鸭	加热	羰基、过氧化氢物	[15]
牛肉	辐照	总羰基	[16]
干腌火腿、里脊	干腌	总羰基、AAS、GGS	[17]
牛肉	功率超声	羰基、游离巯基、蛋白聚集体	[18]
宣威火腿	盐渍	总羰基	[19]
鸡腿、鸡胸	冷藏	羰基、蛋白质聚集体	[20]
猪肌肉	煮熟;粉碎;老化	总羰基、席夫碱、蛋白质聚集体	[21]
干腌里脊	冻融;腌制	羰基、蛋白交联	[22]
干腌火腿	高静水压	总羰基、AAS、GGS	[23]
广东香肠	加工	色氨酸损失、蛋白质聚集体	[24]

### 2.1 常用加工处理对肉类蛋白质氧化的影响

#### 2.1.1 成熟

蛋白质在畜禽等肉类产品中含量很高,且肌肉中含

亚铁血红素、过渡态金属离子和各种氧化酶等促氧化因子,因此在肉的宰后自然成熟中,肌肉组织极易氧化<sup>[25]</sup>。如屠宰后的肌肉颜色发生变化是由于脂肪氧化促进肌红蛋白氧化还原所致。另一方面,肉的成熟还可分为低温成熟和干燥成熟。肉类在低温成熟期间,蛋白羰基含量可能会增加<sup>[26]</sup>。Eymard等<sup>[27]</sup>观察到竹荚鱼在冷冻期间,硫醇基减少而羰基相应增多;兔肉在低温贮藏(4℃)成熟期间,硫醇基流失、肌球蛋白重链和丙二醛增加<sup>[28]</sup>。Santé-Lhoutellier等<sup>[29]</sup>报道肉类成熟时间越长,蛋白羰基含量越多而硫醇基含量越少,但这种修饰效果受氧化体系、贮藏条件、包装体系和肉的种类的影响。干燥成熟则是不带包装并控制温度和湿度来提高肉的品质并达到保藏的方法,在这种条件下,除时间影响蛋白水解外,还受水分活度降低的影响。章建浩等<sup>[30]</sup>报道采用“强化高温成熟”工艺能够促进金华火腿蛋白质脂质分解氧化、加快风味形成,但采用风干高温成熟工艺需适当缩短工艺时间和把握成熟温度才能提高产品的综合感官品质;Jiang Nanqi等<sup>[31]</sup>报道高温短时干燥处理能加快干腌鸡肉的脂质氧化、蛋白质氧化和水解,可能是高温促进铁的释放、氢过氧化物的生成或裂解,导致肉体氧化稳定性下降。

#### 2.1.2 原料肉处理

原料肉在斩拌、滚揉、切片等加工处理过程中,蛋白质易与O<sub>2</sub>接触并混入某些氧化催化剂<sup>[4]</sup>,导致细胞的抗氧化防御系统被破坏,蛋白质被ROS攻击。Li Peng等<sup>[32]</sup>报道用去离子水漂洗能促进鱼糜蛋白氧化;Fuentes等<sup>[33]</sup>报道脂肪含量(4%、10%、15%)和来源(猪背脂、商用猪油、葵花油)均显著影响发酵香肠蛋白羰基含量,其中以10%脂肪含量或猪背脂为原料制作的香肠中AAS和GGs水平最高。因此,为避肉类蛋白和脂肪氧化所带来的负面影响,应考虑添加至肉制品中的脂肪含量和类型,同时创造洁净的加工环境以保障产品的营养价值和感官品质。

#### 2.1.3 腌制

腌制过程中含盐量是影响蛋白质氧化的主要因素。一是盐能显著影响脂质氧化,由于二者的氧化进程存在关联,所以推断盐腌亦可促进蛋白质氧化;二是盐的亲氧化作用创造利于氧化的环境<sup>[34-35]</sup>。据报道,NaCl的亲氧化作用机理与细胞膜结构的完整性破坏有关,这种破坏能使催化剂与脂质、蛋白质成分更亲密接触,导致抗氧化酶失活<sup>[36]</sup>。同样,在高离子强度环境(如0.6 mol/L NaCl)中,由于静电排斥作用,肌原纤维发生松动或结构破坏使得个体蛋白更容易扩散,间接增强肌原纤维蛋白(myofibril protein, MP)对氧化的敏感性<sup>[37]</sup>。同时,盐腌肌肉食品在浸泡和冷冻期间肌原纤维周围具有较高的反应活性,NaCl可通过Fenton反应使氧肌球蛋白转变为高铁肌红蛋白,增加盐的助氧化可能性。

另外,肉类食品腌制中常添加亚硝酸盐以利于产品获得诱人的颜色和风味,且能抑制微生物生长和脂肪氧化<sup>[38]</sup>。尤其在抗坏血酸存在情况下,可提高肌肉食品的抗氧化保护能力,即亚硝酸盐和抗坏血酸组合具有抗蛋白氧化能力<sup>[12,35]</sup>。但腌制过程中肉类蛋白的氧化和亚硝化是同时发生的<sup>[13]</sup>。Vossen等<sup>[39]</sup>研究NaNO<sub>2</sub>对MP和猪肉馅蛋白的氧化和硝化作用时发现,其并未抑制羰基生成,反而提高样品中羰基浓度并降低硫醇基含量。在这方面,有报道硝酸盐可通过从敏感肉蛋白分子夺取1个电子引发氧化反应,生成的RNS能发动氧化和硝化反应<sup>[40-41]</sup>;Sullivan等<sup>[42]</sup>认为亚硝酸盐能与肌红蛋白反应生成亚硝基肌红蛋白,其会分解NO或直接与活性物质反应从而具有抗氧化作用。因此,肉类食品加工中常用添加剂亚硝酸盐的抗氧化和促氧作用及对食品质量、营养和健康的影响有待深究。

#### 2.1.4 发酵

肉的发酵是在野生或培养的微生物、盐、糖和其他材料存在的情况下,控制温度和湿度以获得特殊风味并具有保藏作用的传统加工方法。在此过程中,水分活度降低,酸度增加有利于风味和质地形成,同时使环境不适于腐败菌和致病菌生长。然而,随着酸度、游离脂肪酸、游离氨基酸和离子强度增加,可促进肉系统对氧化的敏感性和酶促或非酶促脂质过氧化<sup>[43]</sup>。同时,发酵肉中脂质含量和来源也会显著影响脂质和蛋白质氧化,这些物质氧化都可能导致肉制品感官品质下降<sup>[33,44]</sup>。因此,合理的发酵条件,形成发酵肉品感官品质与营养品质,适当控制蛋白质氧化程度是发酵肉品需要考虑的。

#### 2.1.5 热处理加工技术

热处理是肉类产品常用加工方法,用于改变肉类质地、持水力、色泽和风味等,以获得安全美味的产品<sup>[45]</sup>,但热处理也可能引发一些不良化学反应,造成的破坏不仅是食品级的,还包括分子水平<sup>[21]</sup>。目前报道热处理引发或促进蛋白质氧化的主要原因为:1)引发产生ROS,促进脂肪氧化的同时生成能触发蛋白质氧化的自由基如烷基、烷氧基和过氧自由基<sup>[10,46]</sup>;2)使肉中谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶活性急剧下降,导致抗氧化能力降低<sup>[47]</sup>;3)导致血红素下降,非血红素铁增加,后者通过Fenton反应或金属催化氧化反应引发蛋白质氧化<sup>[4]</sup>;4)加热温度较高时能触发卟啉环的氧化裂解,释放血红素铁,促进脂质和蛋白质氧化。此外,蛋白质氧化程度还与加热时长有关,Gatellier等<sup>[48]</sup>研究发现,热处理温度越高、时间越长,羰基含量就越高。因此,探讨热处理加工对蛋白质的影响并合理化热处理加工是未来肉类产品加工时要特别考虑的问题。

### 2.2 常用贮藏技术对肉类蛋白质氧化的影响

#### 2.2.1 冷冻贮藏

冻藏能引起肉系统中蛋白羰基和席夫碱生成、色氨



酸和硫醇基流失等氧化现象,该氧化程度和本质(色氨酸损失、羰基化、蛋白交联等)受斩拌程度、包装、冻结速率、贮藏温度及时间、动物种类及脂肪含量等因素影响<sup>[20]</sup>。Utrera等<sup>[49-51]</sup>报道牛肉冻藏过程中有蛋白交联及席夫碱生成、质地变差,推测可能是细胞膜受损和冻肉中未被冷冻部分的蛋白质分子周围的亲氧化溶质发生低温浓缩并释放催化铁引发氧化的缘故,随后用不同冻藏温度(-8、-18、-80℃)处理牛肉饼,发现冻藏可导致牛肉饼在随后烹调或冷藏过程中发生进一步的氧化反应,包括色氨酸荧光损失、赖氨酸衍生物生成。另一方面,肉类在运输、贮藏、零售前修整及消费者购买后再次进行冻藏等过程中,由于温度波动易发生反复冷冻-解冻(冻融)现象,同样会引起羰基增加巯基减少等氧化修饰<sup>[52]</sup>,可能是反复冻融过程中肌肉中冰晶反复形成与融解对肌肉结构造成机械损伤,导致肌肉的亚显微结构破坏并伴随线粒体、溶酶体酶、血红素铁以及其他促氧化物质释放<sup>[26]</sup>,进而促进蛋白质氧化。因此,冷冻未必能充分预防蛋白质氧化,甚至还会影响以冻肉为原料的终端食品的感官品质<sup>[53]</sup>。基于此,肉在加工前应尽量低温贮藏且缩短贮藏时间。

## 2.2.2 解冻方式

解冻方式对蛋白氧化也有一定影响。李银等<sup>[54]</sup>研究发现,黄牛后腿肉经空气自然解冻的氧化程度较低温高湿变温解冻更加显著,且解冻过程中蛋白质氧化引起了肉色褐变、蛋白质的交联降解及变性、肌纤维结构的破坏;侯晓荣等<sup>[55]</sup>研究发现,虾经冷藏解冻后,羰基含量没有显著变化,但是经微波解冻、超声波解冻等方式解冻后羰基含量显著增加,尤其微波解冻后增加最快,可能与解冻过程中温度较高有关。

## 2.2.3 气调贮藏

肉即使在添加有抗氧化剂的富氧气调包装中,也会发生硫醇基降低,肌球蛋白交联增多,羰基化增强等氧化修饰<sup>[56]</sup>,但是受包装方式、包装材料和包装内食品成分的影响。Delles等<sup>[57]</sup>比较了富氧包装、透光聚氯乙烯包装、真空包装中猪肉糜氧化状况,指出氧气水平较高的包装能够促进蛋白质氧化和肌肉脱水;Jongberg等<sup>[58]</sup>将鸡胸和鸡腿置于高氧气调包装(high-oxygen atmosphere packaging, MAP-O<sub>2</sub>)中5℃条件下贮藏9 d后,鸡腿中硫醇基流失和蛋白交联的形成较鸡胸更明显,但对感官品质影响较小,而鸡胸嫩度下降和腐败较明显,说明MAP-O<sub>2</sub>对肉品中不同肌肉组织的氧化稳定性和感官品质的影响不同。

## 2.3 新食品加工保藏技术对蛋白氧化的影响

### 2.3.1 辐照

尽管已确定10 kGy食品辐照总剂量对消费者没有呈现毒性或营养破坏,但在此剂量范围内的辐照引起了一

些生化改变,包括蛋白质有序结构的破坏并伴随蛋白质的分裂、交联和多肽链聚合,可能是电离辐照造成肉系统中的水辐解,产生能加快肉类蛋白氧化的自由基,特别是含硫氨基酸和芳香族氨基酸易被辐照损伤后生成羰基、游离氨基酸、过氧化氢和有机过氧化物<sup>[16,59]</sup>。其他因素如体系温度、包装、氧气含量、脂肪浓度、辐照剂量和速率等都会影响蛋白质的氧化及氧化程度。为控制辐照对肉类蛋白氧化的影响,可采用排氧或改用惰性气体的包装以及添加抗氧化剂(VE)等方法<sup>[59]</sup>。

### 2.3.2 超高压技术

食品超高压(ultra-high pressure, UHP)技术具有杀菌、改善肉类嫩度及延长货架期等优点,但UHP处理能促进肉中脂肪氧化,且高压超过300 MPa时也观察到蛋白质氧化,因而限制了其在肉制品中的应用。Jung等<sup>[60]</sup>报道在600 MPa高压条件处理下,牛肉脂肪及蛋白质氧化显著增加。Fuentes等<sup>[61]</sup>认为高压处理对氧化稳定性的作用效果取决于肌内脂肪含量(intramuscular fat content, IMF),样品中IMF越高,脂肪氧化稳定性越差,而IMF较低的样品中蛋白羰基化更明显。目前,我国高压技术在肉类加工中的应用正朝着与热处理结合方向发展,以改善僵直后肌肉的嫩度,然而已观察到该技术也能造成MP巯基含量显著下降,二硫键含量、疏水性和羰基值显著上升,可能是高压处理过程中蛋白质结构发生变化,细胞膜结构被破坏,造成铁及其他过渡金属离子释放,一些亚铁血红素、过渡态的金属离子和各种氧化酶可能会作为产生ROS和非氧自由基的催化剂或作为前体物质,蛋白质受这些自由基攻击后,氧化程度加深<sup>[23,62]</sup>。因此,在采用UHP对肉类进行处理时,应充分考虑高压强度和肥瘦比,同时可结合气调包装<sup>[63]</sup>等手段,以缓解UHP促进肉品氧化等不利影响。

### 2.3.3 其他

腌制过程中的功率超声引起肉系统产生羟基,蛋白表面疏水性增强,进而加大氧化敏感性<sup>[18]</sup>;等离子体杀菌技术中大量的等离子体成分也会诱导ROS生成<sup>[61]</sup>;罗非鱼片经臭氧减菌化处理后,在冰温贮藏过程中MP氧化加深<sup>[64]</sup>。此外,食用涂膜、亚硝酸盐嵌入式膜(nitrite-embedded film, NEF)、活性包装等新型肉类冷冻藏新技术对肉类氧化稳定性的影响鲜见报道,有待进一步研究。

## 3 蛋白质氧化的消极影响

### 3.1 蛋白质氧化对肉类感官和风味品质的影响

肌肉蛋白主要由MP、肌浆蛋白和基质蛋白组成,这些蛋白的氧化与肉制品品质密切相关。研究发现,肌球蛋白和肌动蛋白作为肌纤维的主要成分对肌肉的收缩功能相当关键,因此纤维蛋白氧化所引起的蛋白降解程度

变低会造成嫩度下降及组织变硬。同时,MP经氧化交联会对持水力产生负面影响进而可能影响肉的品质包括滋味、多汁性等,甚至产生PSE (pale soft exudative) 肉,造成经济损失<sup>[65]</sup>。肉的色泽也因为肌红蛋白的氧化而褪色,甚至产生酸败。在肉制品风味方面,蛋白质氧化释放出羰基化合物时,可能会发生Strecker降解,对风味形成起到积极作用。另外,来自脂肪过氧化反应的特定氧化产物可促进氨基酸的氧化降解。降解产物中的游离氨基酸及游离氧化氨基酸是肉体系中醛的主要来源,对风味具有贡献。然而,蛋白过度氧化可显著影响其乳化性、凝胶性、表面疏水性等,对加工特性和食用品质产生消极作用<sup>[66]</sup> (图1)。

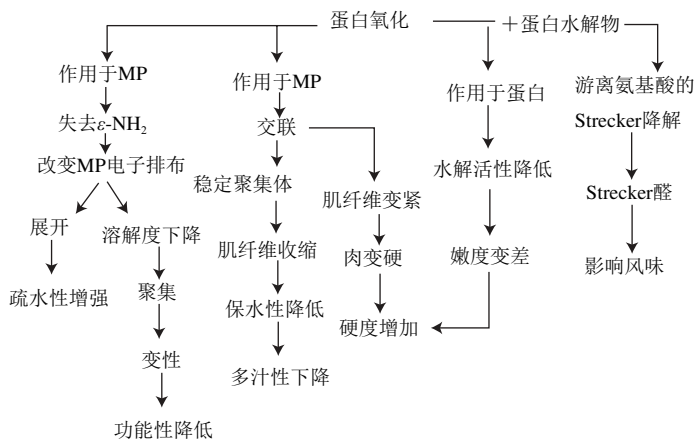


图1 肉蛋白氧化对感官和风味品质的影响<sup>[66]</sup>

Fig. 1 Effect of protein oxidation on sensory traits and flavor quality of meat<sup>[66]</sup>

### 3.2 蛋白质氧化对消化的影响

氧化蛋白质在人体内的生物学作用,包括其在体内的消化、吸收及其对体内代谢的影响。温和的氧化可诱导蛋白质轻微修饰和结构局部折叠,增加对蛋白酶敏感性;而高氧化环境可使蛋白质交联,甚至大量聚集和蛋白酶活性部位被修饰<sup>[4]</sup>,导致蛋白质水解率及其对肠道蛋白酶的敏感性降低。所以,对蛋白质具有特异性的蛋白酶中的某些氨基酸被活性物质修饰,由于酶识别位点发生改变,蛋白质消化率将会受到影响。Rutherford等<sup>[67]</sup>报道蛋白质氧化可通过2种机理影响消化道对蛋白质的消化,即1)蛋白质变性;2)限制多肽的生成。因此,摄食氧化的蛋白质可能会降低其在肠道的消化和吸收。

### 3.3 蛋白质氧化对人体健康的影响

体内蛋白质的氧化性损伤会降低结构和构象的稳定性,导致蛋白质间发生交联或肽链断裂或氨基酸侧链修饰,造成蛋白质功能性降低。有报道称机体内蛋白质氧化与许多疾病如阿尔兹海默氏症、II型糖尿病及癫痫密切相关<sup>[68]</sup>。但摄入氧化的蛋白质对健康的影响鲜有报道,直到近年来才报道食物中的蛋白氧化可造成必需氨基酸损失,生物效率和消化率降低甚至引起疾病<sup>[3,68]</sup> (图2)。

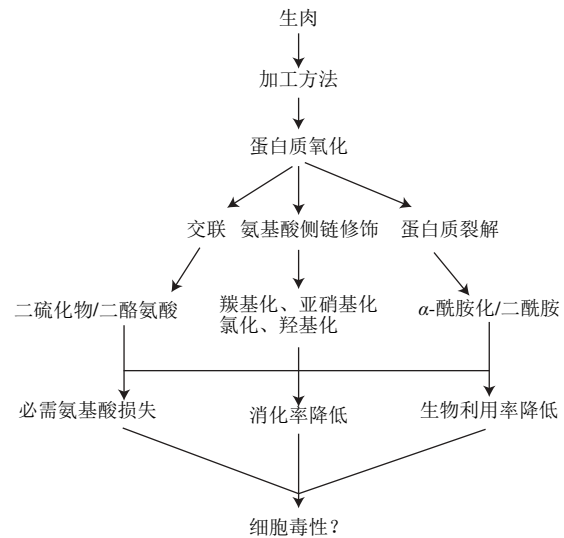


图2 加工肉类蛋白氧化对人体可能的健康影响<sup>[68]</sup>

Fig. 2 Possible implications of protein oxidation in processed meat on human health<sup>[68]</sup>

#### 3.3.1 蛋白质氧化对体内氧化还原状态的影响

蛋白质在消化酶作用下被分解为肽和氨基酸而被吸收。然而,氧化的肽可能对肠道环境产生消极作用,其自身的一些活性如抗氧化性也会丧失;氧化的氨基酸也未能被充分吸收或用于合成蛋白,造成生物效率降低,这可能由于氧化修饰的氨基酸残基在肠道吸收需要机体提供更多的还原力将其还原并影响肠道微环境<sup>[7]</sup>。另外,机体氧化还原状态失衡可诱发组织细胞物质能量代谢异常,Kittelberger等<sup>[69]</sup>给小鼠注入天然淀粉样肽聚合物后出现类似阿尔茨海默氏病的记忆丧失现象。

#### 3.3.2 氧化蛋白质对机体的损伤

加工保藏中食物成分的氧化及氧化产物对特定健康的影响引起了研究者的极大关注。有报道摄入被氧化的成分会增加动物肌肉和血液的氧化标记物,可能增加活体组织氧化应激<sup>[70]</sup>。Evenepoel等<sup>[71]</sup>指出,摄入的氧化蛋白在结肠菌群作用下可发酵生成某些致突变、增加结肠癌和溃疡性结肠炎风险的代谢产物(酚和对甲酚)。Hande等<sup>[72]</sup>报道·OH能把L-苯丙氨酸转变成m-酪氨酸,后者对培养细胞具有毒性,而这些通过诱变生成的氨基酸对细胞呈现毒性的同时也会削弱蛋白质功能性。所以,如果摄入并消化某些蛋白氧化产物且它们不能用于合成酶等蛋白质或作为细胞合成的结构元素,就有可能引起身体故障和疾病<sup>[3]</sup>。这方面,已发现加工肌肉食品中有赖氨酸的氧化产物AAS和α-氨基己二酸(α-aminoadipic acid, AAA)生成,其中AAA具有影响体内葡萄糖稳态的潜能,增加患糖尿病风险<sup>[73]</sup>。Li Zhuqing等<sup>[74]</sup>用氧化的酪蛋白短期灌胃小鼠,发现其体内血液和消化器官发生了氧化还原应激。进一步研究发现,食用氧化酪蛋白可通过破坏抗氧化防御系统及修饰相关纤维基因表达来诱

发鼠的肝和肾损伤,而在受伤组织中蛋白质羰基和二酪氨酸有所增加并生成新的氧化产物<sup>[75]</sup>。

#### 4 结 语

食品加工和贮藏是为了提升食品的感官性状、营养品质或使其便于食用及贮藏时间延长。但一些加工保藏方法会加速肉类蛋白质氧化,对加工品质和感官品质甚至身体健康带来不利影响。因此,合理加工和贮藏肉类食品,控制加工保藏过程中蛋白质的氧化尤为重要。平衡食品加工保藏要求和控制蛋白质的氧化程度还有待进一步深入研究,特别是各加工处理的独立效应和联合效应。此外,通过选用优质鲜肉、创造洁净加工环境、优化配方设计及添加抗氧化剂等以减少巯基损失,提高肉制品的氧化稳定性并控制肉类蛋白氧化<sup>[76-78]</sup>,对提高肉品质量和促进人体健康具有重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] CROSS A J, LEITZMANN M F, GAIL M H, et al. A prospective study of red and processed meat intake in relation to cancer risk[J]. PLoS Medicine, 2008, 4(12): 325. DOI:10.1371/journal.pmed.0040325.
- [2] KIM E, COELHO D, BLANCHIER F. Review of the association between meat consumption and risk of colorectal cancer[J]. Nutrition Research, 2013, 33(12): 983-994. DOI:10.1016/j.nutres.2013.07.018.
- [3] ESTÉVEZ M, LUNA C. Dietary protein oxidation: a silent threat to human health?[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016: 1-51. DOI:10.1080/10408398.2016.1165182.
- [4] ESTÉVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: a review[J]. Meat Science, 2011, 89(3): 259-279. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.04.025.
- [5] 孟彤, 刘源, 仇春洪, 等. 蛋白质氧化及对肉品品质影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(1): 173-181. DOI:10.16429/j.1009-7848.2015.01.026.
- [6] XIONG Youling L.. Protein oxidation and implications for muscle food quality[M]// DECKER E A, FAUSTMAN C, LOPEZ-BOTE C J. Antioxidants in muscle foods: nutritional strategies to improve quality. New York: Wiley and Sons, 2000: 85-90[2016-05-17].
- [7] 顾书媛, 余静, 莫玲, 等. 蛋白质氧化及其对机体氧化还原状态的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 382-387.
- [8] AALHUS J, DUGAN M. Spoilage, factors affecting oxidative and enzymatic[J]. Encyclopedia of Meat Sciences, 2014: 394-400. DOI:10.1016/B978-0-12-384731-7.00091-X.
- [9] FAUSTMAN C, SUN Q, MANCINI R, et al. Myoglobin and lipid oxidation interactions: mechanistic bases and control[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 86-94. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.04.025.
- [10] LUND M N, HEINONEN M, BARON C P, et al. Protein oxidation in muscle foods: a review[J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2011, 55(1): 83-95. DOI:10.1002/mnfr.201000453.
- [11] 张春江, 黄峰, 胡宏海, 等. 蛋白质氧化与腊肉品质调控[J]. 肉类研究, 2014, 28(5): 41-45.
- [12] VILLAYERDE A, MORCUENDE D, ESTÉVEZ M. Effect of curing agents on the oxidative and nitrosative damage to meat proteins during processing of fermented sausages[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(7): 1331-1342. DOI:10.1111/1750-3841.12481.
- [13] FENG X C, LI C Y, ULLAH N, et al. Potential biomarker of myofibrillar protein oxidation in raw and cooked ham: 3-nitrotyrosine formed by nitrosation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(51): 10957-10964. DOI:10.1021/acs.jafc.5b04107.
- [14] ESTÉVEZ M. Oxidative damage to poultry: from farm to fork[J]. Poultry Science, 2015, 94(6): 1368-1378. DOI:10.3382/ps/pev094.
- [15] DAI Y, LIU D Y, CHEN M, et al. The effect of various postproduction heat treatment on lipid composition and oxidation in Chinese Nanjing salted duck[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(3): 837-844. DOI:10.1111/jfpp.12038.
- [16] ROWE L J, MADDOCK K R, LONERGAN S M, et al. Influence of early postmortem protein oxidation on beef quality[J]. Journal of Animal Science, 2004, 82(3): 785-793.
- [17] ARMENTEROS M, HEINONEN M, OLLILAINEN V, et al. Analysis of protein carbonyls in meat products by using the DNPH-method, fluorescence spectroscopy and liquid chromatography-electrospray ionisation-mass spectrometry (LC-ESI-MS)[J]. Meat Science, 2009, 83(1): 104-112. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.04.007.
- [18] KANG D C, ZOU Y H, CHENG Y P, et al. Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 33: 47-53. DOI:10.1016/j.ultsonch.2016.04.024.
- [19] WANG Z Y, XU Y S, ZHANG J H, et al. Proteolysis, protein oxidation and protease activity in dry-cured Xuanwei ham during the salting stages[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(7): 1370-1377. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02626.x.
- [20] 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. DOI:10.3238/arztebl.2014.0083.
- [21] BAX M L, AUBRY L, FERREIRA C, et al. Cooking temperature is a key determinant of *in vitro* meat protein digestion rate: investigation of underlying mechanisms[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(10): 2569-2576. DOI:10.1021/jf205280y.
- [22] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.10.092.
- [23] FUENTES V, VENTANAS J, MORCUENDE D, et al. Lipid and protein oxidation and sensory properties of vacuum-packaged dry-cured ham subjected to high hydrostatic pressure[J]. Meat Science, 2010, 85(3): 506-514. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.02.024.
- [24] SUN W Z, CUI C, ZHAO M M, et al. Effects of composition and oxidation of proteins on their solubility, aggregation and proteolytic susceptibility during processing of Cantonese sausage[J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 336-341. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.06.042.
- [25] 陈茜茜, 王俊, 黄峰, 等. 蛋白质氧化对肉类成熟的影响研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(3): 285-289.
- [26] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 93-98. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.01.013.
- [27] EYMARD S, BARON C P, JACOBSEN C. Oxidation of lipid and protein in horse mackerel (*Trachurus trachurus*) mince and washed minces during processing and storage[J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 57-65. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.09.030.
- [28] 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.05.029.



- [29] SANTÉ-LHOUTELLIER V, ENGEL E, AUBRY L, et al. Effect of animal (lamb) diet and meat storage on myofibrillar protein oxidation and *in vitro* digestibility[J]. Meat Science, 2008, 79(4): 777-783. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.11.011.
- [30] 章建浩, 靳国锋, 王永丽, 等. 强化高温成熟缩短工艺时间对干腌火腿蛋白质水解的影响[J]. 农业工程学报, 2009(增刊1): 97-101.
- [31] JIANG Nanqi, XU Baocai, ZHAO Liang, et al. Effects of high-temperature-short time (HTST) drying process on proteolysis, lipid oxidation and sensory attributes of Chinese dry-cured chicken[J]. CyTA-Journal of Food, 2016, 14(3): 440-448. DOI:10.1080/19476337.2015.1124291.
- [32] LI Peng, YANG Hua, ZHU Yingchun, et al. Influence of washing and cold storage on lipid and protein oxidation in catfish (*Clarias lazera*) surimi[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2016, 25(6): 790-801. DOI:10.1080/10498850.2014.931898.
- [33] FUENTES V, ESTÉVEZ M, VENTANAS J, et al. Impact of lipid content and composition on lipid oxidation and protein carbonylation in experimental fermented sausages[J]. Food Chemistry, 2014, 147: 70-77. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.09.100.
- [34] WANG J M, JIN G F, ZHANG W G, et al. Effect of curing salt content on lipid oxidation and volatile flavour compounds of dry-cured turkey ham[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48(1): 102-106. DOI:10.1016/j.lwt.2012.02.020.
- [35] SOUZA M A A, VISENTAINER J V, CARVALHO R H, et al. Lipid and protein oxidation in charqui meat and jerked beef[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2013, 56(1): 107-112. DOI:10.1590/S1516-89132013000100014.
- [36] RHEE K S, ZIPPRIN Y A. Pro-oxidative effects of NaCl in microbial growth-controlled and uncontrolled beef and chicken[J]. Meat Science, 2001, 57(1): 105-112. DOI:10.1016/S0309-1740(00)00083-8.
- [37] LI C Q, XIONG Youling L., CHEN J. Protein oxidation at different salt concentrations affects the cross-linking and gelation of pork myofibrillar protein catalyzed by microbial transglutaminase[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(6): 823-831. DOI:10.1111/1750-3841.12138.
- [38] SINDELAR J J, MILKOWSKI A L. Sodium nitrite in processed meat and poultry meats: a review of curing and examining the risk/benefit of its use[J]. American Meat Science Association White Paper Series, 2011, 3: 1-14.
- [39] VOSSEN E, de SMET S. Protein oxidation and protein nitration influenced by sodium nitrite in two different meat model systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(9): 2550-2556. DOI:10.1021/jf505775u.
- [40] HONIKEL K O. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products[J]. Meat Science, 2008, 78(1/2): 68-76. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.05.030.
- [41] SKIBSTED L H. Nitric oxide and quality and safety of muscle based foods[J]. Nitric Oxide, 2011, 24(4): 176-183. DOI:10.1016/j.niox.2011.03.307.
- [42] SULLIVAN G A, SEBRANEK J G. Nitrosylation of myoglobin and nitrosation of cysteine by nitrite in a model system simulating meat curing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(7): 1748-1754. DOI:10.1021/jf204717v.
- [43] WÓJCIAK K M, DOLATOWSKI Z J. Oxidative stability of fermented meat products[J]. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria, 2012, 11(2): 99-109.
- [44] BERARDO A, CLAEYS E, VOSSEN E, et al. Protein oxidation affects proteolysis in a meat model system[J]. Meat Science, 2015, 106: 78-84. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.04.002.
- [45] DEB-CHOUDHURY S, HAINES S, HARLAND D, et al. Effect of cooking on meat proteins: mapping hydrothermal protein modification as a potential indicator of bioavailability[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(32): 8187-8196. DOI:10.1021/jf502668w.
- [46] 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.11.037.
- [47] HOAC T, DAUN C, TRAFIKOWSKA U, et al. Influence of heat treatment on lipid oxidation and glutathione peroxidase activity in chicken and duck meat[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2006, 7(1): 88-93. DOI:10.1016/j.ifset.2005.10.001.
- [48] 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.03.018.
- [49] UTRERA M, ESTÉVEZ M. Oxidative damage to poultry, pork, and beef during frozen storage through the analysis of novel protein oxidation markers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(33): 7987-7993. DOI:10.1021/jf402220q.
- [50] UTRERA M, PARRA V, ESTÉVEZ M. Protein oxidation during frozen storage and subsequent processing of different beef muscles[J]. Meat Science, 2014, 96(2): 812-820. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.09.006.
- [51] UTRERA M, MORCUENDE D, ESTÉVEZ M. Temperature of frozen storage affects the nature and consequences of protein oxidation in beef patties[J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1250-1257. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.10.032.
- [52] 陈茜茜, 黄明, 邹玉峰, 等. 辐照和反复冻融对牛肉蛋白质氧化及食用品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 1-5. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201419001.
- [53] PÉREZ-PALACIOS T, RUIZ J, MARTÍN D, et al. Pre-cure freezing effect on physicochemical, texture and sensory characteristics of Iberian ham[J]. Food Science and Technology International, 2011, 17(2): 127-133. DOI:10.1177/1082013210381435.
- [54] 李银, 孙红梅, 张春晖, 等. 牛肉解冻过程中蛋白质氧化效应分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1426-1433. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2013.07.013.
- [55] 侯晓荣, 米红波, 茅林春. 解冻方式对中国对虾物理性质和化学性质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 243-247. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201404049.
- [56] NIETO G, JONGBERG S, ANDERSEN M L, et al. Thiol oxidation and protein cross-link formation during chill storage of pork patties added essential oil of oregano, rosemary, or garlic[J]. Meat Science, 2013, 95(2): 177-184. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.05.016.
- [57] DELLES R M, XIONG Youling L., TRUE A D. Mild protein oxidation enhanced hydration and myofibril swelling capacity of fresh ground pork muscle packaged in high oxygen atmosphere[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(5): C760-C767. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02195.x.
- [58] JONGBERG S, WEN J, TØRNGREN M A, et al. Effect of high-oxygen atmosphere packaging on oxidative stability and sensory quality of two chicken muscles during chill storage[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2014, 1(1): 38-48. DOI:10.1016/j.fpsl.2013.10.004.
- [59] XIAO S, ZHANG W G, LEE E J, et al. Effects of diet, packaging, and irradiation on protein oxidation, lipid oxidation, and color of raw broiler thigh meat during refrigerated storage[J]. Poultry Science, 2011, 90(6): 1348-1357. DOI:10.3382/ps.2010-01244.
- [60] JUNG S, NAM K C, DONG U A, et al. Effect of phosphatidylcholine on lipid and protein oxidation in ground beef treated with high hydrostatic

- pressure[J]. Meat Science, 2013, 95(1): 8-13. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.04.005.
- [61] FUENTES V, UTRERA M, ESTÉVEZ M, et al. Impact of high pressure treatment and intramuscular fat content on colour changes and protein and lipid oxidation in sliced and vacuum-packaged Iberian dry-cured ham[J]. Meat Science, 2014, 97(4): 468-474. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.12.018.
- [62] 郭丽萍, 熊双丽, 黄业传. 超高压结合热处理对猪肉蛋白质相互作用力及结构的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(2): 196-204. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.2.030.
- [63] 谢晶, 杨茜, 张新林, 等. 超高压技术结合气调包装保持冷藏带鱼品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 246-252. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.033.
- [64] 张红杰, 赵永强, 李来好, 等. 臭氧减菌化处理罗非鱼片冰温贮藏过程中蛋白质生化特性的变化[J]. 水产学报, 2015, 39(10): 1569-1576. DOI:10.11964/jfc.20150309790.
- [65] TRAORE S, AUBRY L, GATELLIER P, et al. Higher drip loss is associated with protein oxidation[J]. Meat Science, 2012, 90(4): 917-924. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.11.033.
- [66] 陈洪生, 孔保华, 刁静静, 等. 氧化引起的肌肉蛋白质功能性变化及其控制技术的研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 215-220. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201511041.
- [67] RUTHERFURD S M, MONTTOYA C A, MOUGHAN P J. Effect of oxidation of dietary proteins with performic acid on true ileal amino acid digestibility as determined in the growing rat[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(3): 699-707. DOI:10.1021/jf403146u.
- [68] 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. DOI:10.1111/1541-4337.12127.
- [69] KITTELBERGER K A, PIAZZA F, TESCO G, et al. Natural amyloid- $\beta$  oligomers acutely impair the formation of a contextual fear memory in mice[J]. PLoS ONE, 2012, 7(1): 29940. DOI:10.1371/journal.pone.0029940.
- [70] ZHANG W, XIAO S, LEE E J, et al. Effects of dietary oxidation on the quality of broiler breast meat[J]. Animal Industry Report, 2011, 657(1): 48.
- [71] EVENEPOEL P, CLAUS D, GEYPENS B, et al. Evidence for impaired assimilation and increased colonic fermentation of protein, related to gastric acid suppression therapy[J]. Alimentary Pharmacology and Therapeutics, 1998, 12(10): 1011-1019.
- [72] HANDE G O, NURAN E, SUNEETHA M, et al. Misincorporation of free *m*-tyrosine into cellular proteins: a potential cytotoxic mechanism for oxidized amino acids[J]. Biochemical Journal, 2006, 395(2): 277-284. DOI:10.1042/BJ20051964.
- [73] GERSZTEN R, WANG T, CLISH C. 2-AAA as a biomarker and therapeutic agent for diabetes: US2014/022344[P]. 2014-10-09 [2016-03-28].
- [74] LI Zhuqing, WU Lingyan, LE Guowei, et al. Effect of oxidized casein on the oxidative damage of blood and digestive organs in mice[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2013, 35(1): 39-43.
- [75] LI Z L, MO L, LE G, et al. Oxidized casein impairs antioxidant defense system and induces hepatic and renal injury in mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 64: 86-93. DOI:10.1016/j.fct.2013.10.039.
- [76] ESTÉVEZ M, HEINONEN M. Effect of phenolic compounds on the formation of alpha-amino adipic and gamma-glutamic semialdehydes from myofibrillar proteins oxidized by copper, iron, and myoglobin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(7): 4448-4455. DOI:10.1021/jf903757h.
- [77] FARVIN K H S, GREJSEN H D, JACOBSEN C. Potato peel extract as a natural antioxidant in chilled storage of minced horse mackerel (*Trachurus trachurus*): effect on lipid and protein oxidation[J]. Food Chemistry, 2012, 131(3): 843-851. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.09.056.
- [78] MORÁN L, ANDRÉS S, BODAS R, et al. Meat texture and antioxidant status are improved when carnosis acid is included in the diet of fattening lambs[J]. Meat Science, 2012, 91(4): 430-434. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.02.027.