

# 脂质氧化产物-蛋白质相互作用研究进展

郭亚晶, 刘昆仑\*

(河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001)

**摘要:** 富含不饱和脂质的食品及其原料在加工和储存过程中易受多种因素影响而发生氧化。在此过程中生成的过氧化自由基和其他次级氧化产物能使蛋白质发生复杂变化。脂质氧化产物与蛋白质相互作用可以诱发蛋白质的交联、聚合, 导致蛋白质共价结构变化、功能特性下降、风味恶化及营养损失, 甚至产生有毒有害物质。脂质氧化产物诱导的蛋白质氧化会造成色氨酸、精氨酸、酪氨酸等氨基酸含量减少; 巯基含量增加、可溶性蛋白质的表面疏水性降低;  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠增加; 蛋白质聚集形成粒径较大的高分子聚集体。本文综述了脂质氧化产物-蛋白质相互作用及其对蛋白质结构和功能特性的影响, 以期对揭示脂质氧化产物与蛋白质的互作机制具有指导意义。

**关键词:** 脂质氧化; 蛋白质; 相互作用; 交联/聚合; 自由基

## Research progress of interaction between lipid oxidation product and protein

GUO Ya-Jing, LIU Kun-Lun\*

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT:** Food rich in unsaturated lipids and their raw materials are susceptible to oxidation due to various factors during processing and storage. The generated peroxide free radicals and other secondary oxidation products in this process can cause complex changes in proteins. The interaction between lipid oxidation products and proteins can induce cross-linking and polymerization of proteins, leading to changes in protein covalent structure, declining in functional properties, deterioration of flavor and nutritional loss, and even the production of toxic and harmful substances. Protein oxidation induced by lipid oxidation products reduce the content of tryptophan, arginine, tyrosine and other amino acids, increase the content of sulfhydryl groups, decrease the surface hydrophobicity of soluble proteins, and increase  $\alpha$ -helix,  $\beta$ -sheet, and the fluorescence intensity, and the protein aggregates to form polymer aggregates with a larger particle size. This article reviewed the interaction between lipid oxidation product and protein and its influence on the structure and functional properties of the protein, in order to reveal the interaction mechanism between lipid oxidation products and protein has guiding significance.

**KEY WORDS:** lipid oxidation; protein; interaction; cross-linking/polymerization; free radicals

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(U1904110)、河南省高等学校重点科研项目计划基础研究专项(19zx013)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1904110), and the Basic Research Project of Key Scientific Research Projects of Higher Education in Henan Province (19zx013)

\*通信作者: 刘昆仑, 博士, 教授, 主要研究方向为食品蛋白质资源开发与利用。E-mail: knlnliu@126.com

\*Corresponding author: LIU Kun-Lun, Ph.D, Professor, Henan University of Engineering & College of Food Science and Technology, No.100, Lianhua Street, High-tech Zone, Zhengzhou 450001, China. E-mail: knlnliu@126.com

## 0 引言

食品体系在加工和储存过程中的脂质氧化反应导致食品品质劣变、营养物质发生不同程度变化,安全性降低<sup>[1-2]</sup>;脂质和其他非脂分子的相互作用与食品品质密切相关。由于脂质引起的蛋白质氧化,特别是必需氨基酸的损失,溶解度的降低和蛋白脂质复合体的形成,降低了食品质量<sup>[3]</sup>。花生、大豆、核桃、肉类等食品原料及制品均存在上述问题,这与不饱和脂肪酸的存在及含量有关。REFSGAARD 等<sup>[4]</sup>研究表明,脂肪酸诱导的蛋白质修饰依赖于脂肪酸的不饱和程度,脂质氧化过程中形成的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )可以直接氧化蛋白质;可能导致蛋白质自由基的形成并进一步形成交联产物。这种相互作用会引起食品蛋白质功能性质的改变,也会降低蛋白质的消化率,损失营养价值,导致产品的消费水平降低<sup>[5]</sup>。充分认识脂质氧化产物-蛋白质下相互作用给食品带来的不利影响,继而采取一些可靠有效的措施来抑制或调控蛋白氧化,对于保持食品品质稳定具有重要意义。

本文总结了国内外关于脂质氧化产物-蛋白质相互作用的机制、途径和可能的关系,以期加深对这一领域的认识,对指导脂类食品贮存产生重要意义。

## 1 脂质过氧化与氨基酸和蛋白质的相互作用

脂质过氧化(peroxidation)一般定义为多不饱和脂肪酸或脂质的氧化变质<sup>[6]</sup>。目前,脂质氧化的研究较深入,而国内外学者对于蛋白质氧化的研究尚处于起步阶段。油脂氧化过程中产生的自由基、过氧化产物及其初级/次级降解产物是诱发蛋白质结构变化的重要因素;蛋白质也可通过自身的氧化抑制脂质氧化。脂质氧化产物和蛋白质氧化产物相互影响,生成油脂-蛋白质大分子物质,进而影响食品品质。

在食品体系中,大多数自由基具有很强的反应活性,会攻击其他食物成分,如多糖、脂质、蛋白质<sup>[7]</sup>。黄友如等<sup>[6]</sup>在报告中指出,自由基从氧化亚油酸转移到大豆蛋白中,导致大量蛋白质自由基的形成,进而导致蛋白质交联聚集。黄星雨等<sup>[7]</sup>研究羟自由基氧化对鹰嘴豆蛋白质的影响发现,该过程促使蛋白结构和功能性质发生变化;蛋白可能通过硫醇氧化产生2个二硫键<sup>[8]</sup>,最终使其起泡能力和泡沫稳定性发生变化。总的来说,引起脂质氧化的因素同样也会引起蛋白质氧化。脂质氧化和蛋白质氧化虽然可以同时或独立地发生,但它们之间通常存在相互作用。脂质氧化生成氢过氧化物和蛋白质氧化生成羰基,两者的反应动力学是非常相似的;正是由于氧化反应的相似性,食物中蛋白质和脂类之间的相互作用促进了两

者初始氧化反应的进程。有研究者报道了核桃<sup>[9]</sup>、牛肉<sup>[10]</sup>、米糠<sup>[11]</sup>中脂质和蛋白质氧化产物之间的相关性,这表明蛋白质和脂质氧化可能同时开始并发生相互作用。但是由于在蛋白质中有更多的活性靶点,蛋白质氧化产物具有多样性,比脂质氧化产物更复杂,因此对于蛋白质氧化的认识仍不够深入。

目前,国内外学者对脂质氧化产物-蛋白质相互作用方面的研究方向包括脂质自由基的形成和转移<sup>[6-7]</sup>、脂质氧化与蛋白质的相互作用<sup>[12-15]</sup>、脂质氧化产物诱导的蛋白质分子的聚集、脂质与蛋白质相互作用引起的蛋白质在结构和功能性质方面的改变<sup>[6-9]</sup>等。而在上述研究中,相关报道主要集中于脂质氧化及其诱导的蛋白质在结构和功能性质的改变,而对于蛋白质氧化动力学、脂质氧化和蛋白质之间互作机制的研究仍鲜有报道。

### 1.1 脂质过氧化产物-氨基酸的相互作用

氨基酸作为蛋白质的重要组成部分,其对脂质的氧化较敏感。蛋白质氧化可能直接由活性氧(reactive oxygen species, ROS)自由基引起<sup>[12]</sup>,也可能间接地由脂质氧化产物与还原糖或碳水化合物的反应引起。蛋白质是排列在三维结构中的复杂大分子,当发生氧化时,会导致蛋白质的各种变化及单个氨基酸发生变化,比如 Met、Tyr、His、Phe 和 Trp、Lys 和 Arg<sup>[13]</sup>,而且可能发生结构变化。在这些氨基酸中,芳香族氨基酸非常容易被氧化<sup>[14]</sup>,如 Tyr 氧化会形成苯氧基,并生成其代谢物二酪氨酸等产物<sup>[15]</sup>;而 Trp 残基是对过氧化脂质最敏感的氨基酸残基之一,在过氧化脂质的作用下,Trp 可以被氧化成 $\beta$ -羟基吲哚丙氨酸和 N-甲酰犬尿氨酸<sup>[16]</sup>;同时由于该相互作用使 Trp 残基暴露在蛋白质表面,从而使其氧化更加深入。对于脂肪族氨基酸,如 Arg,则通过另一种方式被氧化;在这一类氨基酸中,氧化是通过在 $\alpha$ -碳原子处抽取氢进而生成碳中心自由基进行<sup>[17]</sup>。另外,在某些蛋白质中,金属离子催化氧化系统可以很容易地氧化氨基酸残基的侧链<sup>[18]</sup>,这些氨基酸包括:Trp、Tyr、His、Met、半胱氨酸(Cys)、Lys 等<sup>[19]</sup>,这些氨基酸也是脂质诱导氧化最重要的靶点。

脂质过氧化产物诱导氨基酸水平的变化已有报道。CUCU 等<sup>[20]</sup>对脂质间接诱导大豆蛋白氧化的研究表明,His、Arg、Tyr、Met 和 Trp 残基大量损失,聚集严重。在研究光诱导氧化过程中乳清蛋白和脂质之间的相互作用时发现,His 和 Lys 损失最大;原因可能是与脂质过氧化产物形成了络合物;而当乳液中的脂质较不饱和时,这种降解更加明显,因而更容易氧化<sup>[21]</sup>。除了形成络合物外,已知单线态氧也可与 Met、His、Lys、Trp 等氨基酸直接反应;而研究也证明了脂质氧化产物比单线态氧与 Met 和 Tyr 等氨基酸直接反应有更重要的作用<sup>[21]</sup>。氨基酸被氧化修饰可能使其生物利用度降低,营养价值下降<sup>[22]</sup>。

## 1.2 脂质过氧化产物-蛋白质的相互作用

一般来说, 脂质氧化产生的自由基可以引发生成蛋白质自由基, 从而进一步诱导蛋白质聚合。食品通常不可避免地接触空气中的氧, 这不仅会导致脂质氧化, 还会导致蛋白质氧化。然而, 蛋白质氧化的机制、途径和产物是复杂的。

蛋白质是氧化体系的重要目标, 会造成蛋白质结构改变或破坏, 主要包括氨基酸侧链的修饰、蛋白质多肽骨架断裂、蛋白分子间发生聚合等, 从而导致蛋白质理化性质发生改变, 进而影响食品的加工特性、营养价值和食用风味<sup>[23]</sup>。脂质的非极性部位与蛋白质之间可以通过疏水键、范德华力等相互作用连接在一起。有研究报道了奶酪在储藏期酪蛋白逐渐膨胀, 乳清逐渐消失, 形成了含有脂肪小滴和蛋白质的连续体<sup>[24]</sup>; 这为脂质与蛋白质之间发生相互作用提供了必要条件。ZHAO 等<sup>[25]</sup>通过研究脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)催化亚油酸(linoleic acid, LA)氧化影响大豆分离蛋白(soy isolate protein, SPI)的结构发现, 亚油酸氧化诱导了羰基的形成和游离巯基的损失; 同时, 表面疏水性和 Zeta 电位的增加证实了蛋白质的展开, 从而导致粒径变小, 荧光强度降低。脂质氧化过程中形成的·OH 直接氧化蛋白质也可能导致形成蛋白质自由基, 进而使蛋白质发生交联<sup>[26]</sup>; 同时, 底物过氧化过程中产生的过氧化脂质自由基对蛋白质的交联也有重要影响<sup>[27]</sup>, 其可以破坏蛋白相邻螺圈之间形成的氢键, 导致  $\alpha$ -螺旋的展开及随后的分子相互作用, 从而产生较多的  $\beta$ -折叠结构。

而对于蛋白质氧化的活性位点, 其容易受到其他因素的影响引发链式反应。当一个氢原子(H)从蛋白质中分离并生成一个以碳为中心的自由基(C·), 在氧或脂质过氧化物的作用下转化为过氧自由基(COO·)时, 蛋白质氧化就开始了; COO·与另一个分子上的 H 反应导致了过氧化烷基(COOH)的形成; 随后的反应导致烷氧基(CO·)和羟基化合物(COH)的形成<sup>[28]</sup>; COO·和 CO·作用于肽主链和氨基酸侧链基团; 活性羰基化合物与蛋白质侧链基团作用形成共价交联物; 氢过氧化物与蛋白质通过  $\epsilon$ -氨基途径形成酰胺加合物, 而 2 种以碳为中心的自由基还可以在无氧的情况下相互反应, 生成碳-碳交联衍生物<sup>[29-30]</sup>。这些 ROS, 通过引发氧化反应而损害蛋白质质量, 并降低营养价值<sup>[31]</sup>; 蛋白质碳链骨架中的大部分修饰都是由羟基自由基(·OH)引起的<sup>[32]</sup>。COO·和丙二酰氧化米糠蛋白使得其表面疏水性下降, 内源荧光峰值下降且最大荧光峰位发生蓝移, 表明米糠蛋白 Trp 残基被氧化修饰形成聚集体<sup>[33]</sup>。研究确实表明, 在存在不饱和脂质的情况下, 蛋白质聚集增强<sup>[4]</sup>。脂质氧化产物-蛋白质相互作用极为复杂, 对这种作用调控蛋白质聚集进行研究对改善食品品质具有积极意义。

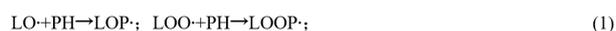
另一方面, 在某些情况下, 除了作为氧化的靶点外, 蛋白质也可以作为抗氧化剂发挥作用。存在于蛋白质和氨

基酸中的巯基可以灭活自由基; 在某些情况下, 这些蛋白质可能充当 ROS 和脂质之间的反应屏障。肌肽可以通过自由基清除或金属离子螯合来防止各种模型系统中的脂质氧化, 其中 Pro-His-His 序列在亚油酸体系中表现出较高的抗氧化能力<sup>[34]</sup>。His 残基和肌肽可以通过从其他大分子生态系统表面去除金属离子来推迟氧化, His 的咪唑基发生降解时, 能有效淬灭·OH 自由基<sup>[35]</sup>; 鸡肉蛋白在一定条件下可以实现清除超氧阴离子自由基活性的能力<sup>[36]</sup>; 此外, BECK 等<sup>[37]</sup>发现 Glu-Leu 序列在·O<sup>2-</sup>淬灭能力中具有重要贡献。因此, 由于某些蛋白质和氨基酸的存在, 含脂食品中的脂质氧化可能被延缓。

## 2 脂质氧化产物-蛋白质互作机制

目前, 由脂质氧化导致的蛋白质的交联聚合的机制主要包括以下几个方面。

首先, 脂质氧化过程中产生的初级氧化产物会发生裂解生成自由基, 自由基作为潜在的引发因子通过抽取氢使蛋白质反应体系生成自由基, 从而引发链式聚合反应, 导致蛋白质聚合。图 1 表示可能存在的过氧化脂质自由基诱导的蛋白质交联聚合机制。这种相互作用发生在芳香族氨基酸侧链, 如蛋白质酪氨酸残基的芳香环经单电子氧化后形成蛋白质酪氨酸自由基, 两分子不同蛋白质酪氨酸自由基发生化合, 导致蛋白质的分子间交联。



注: (1)脂类自由基与蛋白质分子作用生成脂类-蛋白质自由基; (2)脂类自由基引发的蛋白质交联聚合反应; (3)脂类自由基引发生成蛋白质自由基; (4)蛋白质分子间自由基作用生成蛋白质聚合物。PH—蛋白质分子; LO·、LOO·—脂类自由基; P·—蛋白质自由基; LOP·—脂类-蛋白质自由基聚合物; P·P、P·P·P—蛋白质聚合物。

图 1 脂类自由基与蛋白质分子作用

Fig.1 Lipid free radicals interact with protein molecules

其次, 脂质氧化过程中产生的次级氧化产物可以与蛋白质分子的氨基等侧链基团发生反应(Michael 加成反应), 从而导致多肽链的链内交联和链间交联。这种相互作用主要作用于亲核氨基酸残基, 比如 Cys 的巯基和 His 的咪唑基; 巯基和 Tyr 残基的氧化也可以导致二硫键和双酪氨酸键的生成, 从而导致蛋白质交联。

除此之外, 在脂质氧化体系下的蛋白质受到氧化产物的攻击, 进一步通过氢键、疏水相互作用和静电相互作用等的作用形成蛋白质聚集体。氧化蛋白质疏水性的脂肪酸与芳香族氨基酸侧链基团暴露, 使疏水相互作用增加;

脂质过氧化反应产生的自由基中间体攻击蛋白亚基,使亚基间及亚基和脂质间均发生共价交联。

蛋白质氧化的研究是脂质氧化产物-蛋白质相互作用机制探讨的重点。然而,蛋白质氧化体系极其复杂,其反应产物的数量巨大;评估蛋白质氧化的方法有限,这给研究带来了较大的困难。检测羰基、双氧基的形成和巯基的变化是检测和定量蛋白质氧化最常用的方法<sup>[38]</sup>;但是这远不足以研究蛋白质氧化机制。另外,利用荧光光谱、电子自旋共振、免疫自旋捕获与质谱相结合等方式研究 Trp 残基是否发生氧化、追踪反应过程中自由基的形成及转移、区别中心自由基并判断其浓度和种类有助于深入研究蛋白质氧化机制<sup>[39]</sup>,并揭示脂质氧化产物-蛋白质相互作用机制。

### 3 脂质氧化产物-蛋白质相互作用对蛋白质结构和功能特性的影响

蛋白质是食品的重要组成部分,在食品质量和稳定性方面发挥着多种作用。然而,脂质氧化产物-蛋白质相互作用会引起蛋白质结构改变,进而影响其功能性质<sup>[40]</sup>。蛋白质的功能性质包括水合作用、溶解度、界面性质、风味结合、黏度、凝胶化作用等。在含脂食品及其蛋白质制备过程中,蛋白质始终会受到氧化应激环境的影响而发生氧化,导致蛋白质性质发生改变。需要明确的是,鉴于脂质氧化产物及诱导体系的复杂,且丙二醛是食品中脂质过氧化反应中产生最多的活性醛类,因此其仍然是对蛋白质功能特性产生影响研究最多的脂质氧化产物,这一点在上文也提到过。由于蛋白质的功能是多样化的,氧化修饰可以引起许多功能性质的变化,并导致食品质地、持水性、乳化性和分散性等的变化<sup>[41-42]</sup>。由脂质氧化产物诱导的蛋白质结构和功能性质的变化已经成为一大研究热点。

蛋白聚集体的形成与其结构变化有密切联系。蛋白质的二级结构主要是通过骨架上的羰基和酰胺基团形成的氢键维持的;当氧化发生时,随氧化程度的加深, $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和 $\beta$ -转角呈下降趋势,无规卷曲呈上升趋势<sup>[43]</sup>。蛋白质氧化的发生影响了蛋白有序结构的氢键和静电相互作用,同时氧化过程中产生的二硫键和非共价键为蛋白质的聚合提供了作用力;因此在此过程中必然导致蛋白粒径增大,溶解度下降。WU 等<sup>[44]</sup>通过研究脂质过氧化产物丙烯醛对大豆蛋白结构的修饰发现,丙烯醛使大豆蛋白的 $\alpha$ -螺旋结构含量减少, $\beta$ -转角结构含量增加;此外,丙烯醛作为脂质氧化的次级副产物,与大豆蛋白反应活性高,并能改变其结构。有研究证明蛋白质的氧化交联使鱼肉的 G-肌动蛋白结构发生变化,同时产生不良风味<sup>[45]</sup>。

蛋白质的功能是多样化的,而蛋白质结构发生改变必然导致其功能性质发生变化,包括食品质地、持水性、乳化性和分散性等的变化。周麟依等<sup>[46]</sup>利用丙二醛氧化米

糠蛋白的研究中发现,氧化导致米糠蛋白的溶解性、乳化性、乳化稳定性和起泡性降低及泡沫稳定性增大;研究发现,过度氧化可能会形成不溶性聚集体,从而降低米糠蛋白的溶解性。SHEN 等<sup>[47]</sup>研究氧化对猪肉肌原纤维蛋白凝胶性的影响及其与风味化合物的结合能力时发现,轻度氧化可诱导猪肉肌纤维蛋白的部分展开,从而增加肌纤维蛋白的盐溶解度,并且提高其凝胶的硬度;除此之外,挥发性香味的释放很大程度上取决于挥发性化合物与其他成分(特别是油和蛋白质)结合的程度。

另一方面,脂质氧化产物-蛋白质相互作用在合适的条件下对食品品质可以产生积极影响。刘晶等<sup>[48]</sup>发现适当浓度的丙二醛氧化能够改善大豆蛋白的功能性质。此外,脂肪氧合酶诱导亚油酸产生的过氧自由基对小麦蛋白质产生影响;小麦蛋白的功能特性如起泡能力、泡沫稳定性、乳化活性指数、乳化稳定性指数随酶促反应的增强而增加,对改善面团性能有积极的效果<sup>[7]</sup>。适度氧化条件对蛋白质溶解性、凝胶性等功能性质有一定的改善作用<sup>[49]</sup>。加入适量  $H_2O_2$ ,抑制了加热过程中二硫键的形成,蛋白质热稳定性增强<sup>[50]</sup>;在适度氧化的条件下,三文鱼肌肉蛋白被氧化可以提高其凝胶强度和质构特性<sup>[51]</sup>。这对于改善食品品质具有积极意义。

### 4 结语与展望

油脂氧化产物与蛋白质相互作用可以诱发蛋白质的交联、聚合,导致蛋白质共价结构变化、功能特性下降、风味恶化及营养损失,甚至产生有毒有害物质。然而,目前对于油脂氧化和蛋白质氧化的研究仍较为独立;脂质氧化和蛋白质分子的组成及结构变化之间的联系尚未完整建立;脂肪与蛋白质氧化程度与食品品质之间的关系不明确。因此,脂质氧化与蛋白质分子之间的强弱相互作用、油脂氧化产物诱导的蛋白质共价结合及聚合产物仍需深入探讨;在此基础上,由脂质氧化产物诱导的蛋白质氧化动力学及调控蛋白质聚集的方法还有待进一步地研究;最后,深入研究淀粉-蛋白质-脂质、抗氧化成分-蛋白质-脂质等三元体系有助于提高食品品质及开发新型食品产品。这对于提高食品品质、延长食品储藏期、减少资源浪费具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 徐丹,郭芮,易建华,等. 乳蛋白水包油乳液氧化稳定性影响因素研究[J]. 陕西科技大学学报, 2018, 36(2): 39-44.  
XU D, GUO R, YI JH, *et al.* Study on the factors affecting the oxidation stability of milk protein oil-in-water emulsion [J]. J Shaanxi Technol, 2018, 36(2): 39-44.
- [2] RAKOTONDRAMAVO A, RABESONA H, BROU C, *et al.* Ham processing: effects of tumbling, cooking and high pressure on proteins [J]. Eur Food Res Technol, 2019, 245(2). DOI: 10.1007/s00217-018-3159-4

- [3] ME A, JML B. Impact of antioxidants on oxidized proteins and lipids in processed meat [J]. *Encycl Food Chem*, 2019, 299: 600–608.
- [4] REFSGAARD HH, TSAI L, STADTMAN ER. Modifications of proteins by polyunsaturated fatty acid peroxidation products [J]. *Proceed Nat Acad Sci USA*, 2000, 97(2): 611–616.
- [5] 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 LL, ZHANG YM, ZHU LX, *et al.* The effect of protein oxidation and post-translational modification on meat quality and the research progress of its mechanism [J]. *Food Sci*, 2021, 42(9): 241–247.
- [6] 黄友如, 华欲飞, 裘爱泳. 脂质氧化诱导的大豆蛋白质聚集机理的研究[J]. *中国粮油学报*, 2006, (1): 80–87.  
HUANG YR, HUA YF, QIU AY. Study on the mechanism of soybean protein aggregation induced by lipid oxidation [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2006, (1): 80–87.
- [7] 黄星雨, 曾谦, 张新玲, 等. 羟自由基氧化对鹰嘴豆蛋白质结构及功能性质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 3234–3241.  
HUANG XY, ZENG Q, ZHANG XL, *et al.* The effect of hydroxyl radical oxidation on the structure and functional properties of chickpea protein [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(8): 3234–3241.
- [8] 王汉玲, 刘彩华, 秦军委, 等. 羟自由基氧化系统对草鱼肌肉蛋白理化特性及其保水性的影响 [J]. *食品科技*, 2018, 43(1): 134–140.  
WANG HL LIU CH, QIN JW, *et al.* The effect of hydroxyl radical oxidation system on the physical and chemical properties of grass carp muscle protein and its water retention [J]. *Food Sci Technol*, 2018, 43(1): 134–140.
- [9] 孙领鸽, 毛晓英, 吴庆智, 等. 蛋白质氧化对核桃蛋白界面性质的影响 [J]. *中国食品学报*, 2020, 20(9): 59–66.  
SUN LG, MAO XY, WU QZ, *et al.* The effect of protein oxidation on the interface properties of walnut protein [J]. *Chin J Food Sci*, 2020, 20(9): 59–66.
- [10] 孙金龙, 黄峰, 师希雄, 等. 不同包装方式对土豆烧牛肉菜肴中牛肉脂肪与蛋白质氧化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 148–153.  
SUN JL, HUANG F, SHI XX, *et al.* Effects of different packaging methods on the oxidation of beef fat and protein in potato roast beef dishes [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(19): 148–153.
- [11] 吴晓娟, 吴伟. 米糠酸败诱导的蛋白质氧化对米糠清蛋白界面性质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(6): 8–15.  
WU XJ, WU W. The effect of protein oxidation induced by rice bran rancidity on the interface properties of rice bran albumin [J]. *Food Sci*, 2021, 42(6): 8–15.
- [12] LUCEY JA, OTTER D, HORNE DS. A 100-year review: Progress on the chemistry of milk and its components [J]. *J Dairy Sci*, 2017, 100(12): 9916–9932.
- [13] SHEN H, STEPHEN EJ, ZHAO MM, *et al.* Effect of oxidation on the gel properties of porcine myofibrillar proteins and their binding abilities with selected flavour compounds [J]. *Food Chem*, 2020, 329: 127032.
- [14] 胡春林, 谢晶. 蛋白质氧化对肉食品品质影响研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42: 1–10.  
HU CL, XIE J. Research progress on the effect of protein oxidation on meat quality [J]. *Food Sci*, 2021, 42: 1–10.
- [15] MOYLAN S, BERK M, DEAN OM, *et al.* Oxidative & nitrosative stress in depression: Why so much stress? [J]. *Neuro Sci Biobehav Rev*, 2014, 45: 1–17.
- [16] 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.  
ZHANG JY, ZHAO YL, DING YT, *et al.* Research progress on the correlation between lipid and protein oxidation and meat product flavor characteristics [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2018, 32(7): 1417–1424.
- [17] XIONG YL, GUO AQ. Animal and plant protein oxidation: Chemical and functional property significance [J]. *Foods*, 2020, 10(1): 40–40.
- [18] 甘潇, 李洪军, 王兆明, 等. KCl部分替代NaCl对腊肉蛋白质氧化降解及质构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(4): 171–177.  
GAN X, LI HJ, WANG ZM, *et al.* Effects of partial replacement of NaCl by KCl on oxidation, degradation and texture of bacon protein [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(4): 171–177.
- [19] HE J, XIA C, HE Y, *et al.* Proteomic responses to oxidative damage in meat from ducks exposed to heat stress [J]. *Food Chem*, 2019, 295: 129–137.
- [20] CUCU T, DEVREESE B, KERKAERT B, *et al.* A comparative study of lipid and hypochlorous acid induced oxidation of soybean proteins [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2013, 50(2): 451–458.
- [21] MESTDAGH F, KERKAERT B, CUCU T, *et al.* Interaction between whey proteins and lipids during light-induced oxidation [J]. *Food Chem*, 2011, 126(3): 1190–1197.
- [22] POMÉLIE DDL, SANTÉ-LHOUELLIER 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 Chem*, 2018, 243: 295–304.
- [23] 李学鹏, 刘慈坤, 王金厢, 等. 水产品贮藏加工中的蛋白质氧化对其结构性质及品质的影响研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(18): 319–325, 333.  
LI XP, LIU CK, WANG JX, *et al.* Research progress on the effect of protein oxidation on the structure, properties and quality of aquatic products during storage and processing [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(18): 319–325, 333.
- [24] AUTY MA, TWOMEY M, GUINEE TP, *et al.* Development and application of confocal scanning laser microscopy methods for studying the distribution of fat and protein in selected dairy products [J]. *J Dairy Res*, 2001, 68(3): 417–427.
- [25] ZHAO J, SU G, ZHAO M, *et al.* Physicochemical changes and *in vitro* gastric digestion of modified soybean protein induced by lipoxygenase catalyzed linoleic acid oxidation [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(50): 13978–13985.
- [26] ZARIEAN M, TYBUSSEK T, SILCOCK P, *et al.* Interrelationship among myoglobin forms, lipid oxidation and protein carbonyls in minced pork packaged under modified atmosphere [J]. *Food Packaging Shelf*, 2019, 20: 100311.
- [27] FENG XL. Effect of sarcoplasmic proteins oxidation on the gel properties of myofibrillar proteins from pork muscles [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(5): 1835–1844.
- [28] ZAINUDIN M, POOJARY MM, JONGBERG S, *et al.* Light exposure accelerates oxidative protein polymerization in beef stored in high oxygen atmosphere [J]. *Food Chem*, 2019, 299: 125132.
- [29] CAMEL IA, PAPUC C, GHEORG HE, *et al.* Mechanisms of oxidative processes in meat and toxicity induced by postprandial degradation

- products: A Review [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2017, 16(1): 96–123.
- [30] 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.  
MENG T, LIU Y, QIU CY, *et al.* Protein oxidation and effects on meat quality [J]. *Chin J Food Sci Technol*, 2015, 15(1): 173–181.
- [31] RAKOTONDRAMAVO A, RABESONA H, BROU C, *et al.* Ham processing: Effects of tumbling, cooking and high pressure on proteins [J]. *Eur Food Res Technol*, 2019, 245(2): 245, 273–284.
- [32] ALAVI F, EMAM-DJOMEH Z, MOMEN S, *et al.* Effect of free radical-induced aggregation on physicochemical and interface-related functionality of egg white protein [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 87: 734–746.
- [33] 尤翔宇, 黄慧敏, 吴伟, 等. 过氧自由基氧化对米糠蛋白体外胃蛋白酶消化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(4): 69–74, 82.  
YOU XY, HUANG HM, WU W, *et al.* Effects of peroxy free radical oxidation on the in vitro pepsin digestion properties of rice bran protein [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2019, 34(4): 69–74, 82.
- [34] LIU R, XING L, FU Q, *et al.* A review of antioxidant peptides derived from meat muscle and by-products [J]. *Antioxidants*, 2016, 5(3): 32.
- [35] 王赛, 李慧, 孙婉婷, 等. 豌豆肽抗氧化性机制评析[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 306–310.  
WANG S, LI H, SUN WT, *et al.* Evaluation on the antioxidant mechanism of pea peptides [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(10): 306–310.
- [36] NISHIMURA K, SAEKI H. Random-centroid optimization reveals the strongest superoxide anion radical scavenging activity of maltose and ribose-conjugated chicken myofibrillar protein [J]. *J JPN Soc Food Sci*, 2018, 24(3): 551–557.
- [37] BECK SM, KNOERZER K, ARCOT J. Effect of low moisture extrusion on a pea protein isolate's expansion, solubility, molecular weight distribution and secondary structure as determined by fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) [J]. *J Food Eng*, 2017, 214: 166–174.
- [38] YAYA W, HONGHUA L, KE L, *et al.* Analysis of the physical meat quality in partridge (*Alectoris chukar*) and its relationship with intramuscular fat [J]. *Poultry Sci*, 2020, 99(2): 1225–1231.
- [39] DALSGAARD TK, TRIQUIGNEAUX M, DETERDING L, *et al.* Oxidation of  $\alpha$ -lactalbumin after a lactoperoxidase-catalysed reaction: An oxidomics approach applying immuno-spin trapping and mass spectrometry [J]. *Int Dairy J*, 2014, 38(2): 154–159.
- [40] BAO Y, BOEREN S, ERTBJERG P. Myofibrillar protein oxidation affects filament charges, aggregation and water-holding [J]. *Meat Sci*, 2018, 135: 102–108.
- [41] 方海砚, 苑歆, 刘友明, 等. 羟自由基氧化对鲢鱼肌原纤维蛋白结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 6–12.  
FANG HY, YUAN X, LIU YM, *et al.* The effect of hydroxyl radical oxidation on the structure of silver carp myofibrillar protein [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2020, 41(4): 6–12.
- [42] 李芳, 吴晓娟, 吴伟. 蛋白质氧化影响机体营养状况的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2021, 328: 1–7.  
LI F, WU XJ, WU W. Research progress on the effect of protein oxidation on the nutritional status of the body [J]. *Chin J Food Sci*, 2021, 328: 1–7.
- [43] 王耀松, 张唯唯, 马天怡, 等. 丙二醛氧化对核桃分离蛋白结构及乳化性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3372–3384.  
WANG YS, ZHANG WW, MA TY, *et al.* The effect of malondialdehyde oxidation on the structure and emulsification of walnut protein isolate [J]. *Chin Agric Sci*, 2020, 53(16): 3372–3384.
- [44] WU W, WU X, HU Y. Structural modification of soy protein by the lipid peroxidation product acrolein [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2010, 43(1): 133–140.
- [45] CAO JX, ZHOU CY, WANG Y, *et al.* The effect of oxidation on the structure of G-actin and its binding ability with aroma compounds in carp grass skeletal muscle [J]. *Food Chem*, 2017, 240: 346–353.
- [46] 周麟依, 孙玉凤, 吴非. 丙二醛氧化对米糠蛋白结构及功能性质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(12): 98–107.  
ZHOU LY, SUN YF, WU F. The effect of malondialdehyde oxidation on the structure and functional properties of rice bran protein [J]. *Food Sci*, 2019, 40(12): 98–107.
- [47] SHEN H, ELMORE JS, ZHAO M, *et al.* Effect of oxidation on the gel properties of porcine myofibrillar proteins and their binding abilities with selected flavour compounds [J]. *Food Chem*, 2020, 329: 127032.
- [48] 刘晶, 蔡勇建, 吴伟, 等. 丙二醛氧化对大豆蛋白功能性质的影响[J]. *中国油脂*, 2014, 39(6): 41–44.  
LIU J, CAI YJ, WU W, *et al.* The effect of malondialdehyde oxidation on the functional properties of soybean protein [J]. *Chin Oils Fats*, 2014, 39(6): 41–44.
- [49] PAN J, LIAN H, JIA H, *et al.* Dose affected the role of gallic acid on mediating gelling properties of oxidatively stressed Japanese seerfish myofibrillar protein [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020, 118: 108849.
- [50] CHEN X, XIONG YL, XU X. High-pressure homogenization combined with sulfhydryl blockage by hydrogen peroxide enhance the thermal stability of chicken breast myofibrillar protein aqueous solution [J]. *Food Chem*, 2019, 285: 31–38.
- [51] MUHAN Z, DAOYING W, XINGLIAN X, *et al.* Comparative proteomic analysis of proteins associated with water holding capacity in goose muscles [J]. *Food Res Int*, 2019, 116: 354–361.

(责任编辑: 王欣郑丽)

## 作者简介



郭亚晶, 硕士研究生, 主要研究方向为食品蛋白质资源开发与利用。

E-mail: 1529885972@qq.com



刘昆仑, 博士, 教授, 主要研究方向为食品蛋白质资源开发与利用。

E-mail: knlnliu@126.com