碱性氨基酸影响肉品品质及机理的研究进展

李冬梅[1,2,3]， 任 响[1]， 林峻鑫[1]， 孙培梓[1]， 赵燕芬[1]

（1. 大连工业大学 食品学院，辽宁 大连 116034；2. 大连工业大学 国家海洋食品工程技术研究中心，辽宁 大连 116034；3. 大连工业大学 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心，辽宁 大连 116034）

摘要： 肉及肉制品在加工和贮藏过程中会出现食用品质下降、营养功能降低等问题，寻求能够改善肉品品质的绿色健康改良剂具有重要意义和经济价值。碱性氨基酸可以作为 NaCl 以及 $NaNO_2$ 等传统食品改良剂的替代物，在工业生产与应用中受到广泛关注。作者概述了碱性氨基酸对肉品的质构、色泽、嫩度的影响，并着重从影响蛋白质的溶解度、热聚集、凝胶性、氧化稳定性、调控蛋白酶活性等方面阐述了碱性氨基酸对肉品品质的作用机理，为碱性氨基酸在肉品中的应用和推广提供参考。

关键词： 碱性氨基酸；肉及肉制品；食用品质；理化性质

中图分类号：TS 202　**文章编号：**1673-1689(2022)08-0035-08　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.08.004

Research Progress on Basic Amino Acids Affecting Meat Quality and Its Mechanism

LI Dongmei[1,2,3]， *REN Xiang*[1]， *LIN Junxin*[1]， *SUN Peizi*[1]， *ZHAO Yanfen*[1]

(1. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034,China; 2. National Engineering Research Center of Seafood, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 3. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Meat and meat products may have food quality degradation, nutritional function reduction, and other problems during processing and storage. It is of great significance and economic value to seek green and healthy improvers to improve meat quality. Basic amino acids have become more popular in industrial production and application, which can be as substitutes for traditional food improvers such as NaCl and $NaNO_2$. The effects of basic amino acids on the texture, color and tenderness of meat were summarized in this paper, and the mechanism of basic amino acids affecting meat quality was highlighted from the aspects of protein solubility, heat aggregation, gelation, oxidative stability and regulation of protease activity, providing a reference for the application and promotion of basic amino acids in meat.

Keywords: basic amino acids, meat and meat products, edible quality, physicochemical properties

收稿日期： 2022-05-16

基金项目： 国家重点研发计划项目(2017YFD0400504)。

作者简介： 李冬梅(1977—)，女，博士，教授级高级工程师，硕士研究生导师，主要从事海洋资源开发与利用方面的研究。

E-mail：lidongmei@dlpu.edu.cn

畜禽肉和水产品为人类提供了优质蛋白质,是改善居民膳食结构的主要食物之一。我国是肉品的生产和消费大国,2021 年猪牛羊禽肉产量达到 8 887 万 t,水产品产量 6 693 万 t[1]。质构、色泽和嫩度等是肉品重要的理化性质,影响消费者的购买意愿。为了改善肉品的品质,在生产中会采用物理法、化学法以及生物法[2]进行干预,其中化学法操作最为简单,应用最为普遍,主要包括使用 NaCl、$NaNO_2$、多聚磷酸盐[3]等化学改良剂。然而这些化学改良剂的摄入会增加消费者患慢性疾病的风险,不利于身体健康[4],寻找新的、绿色的肉品改良剂成为学术界和产业界关注的热点。碱性氨基酸作为一类绿色食品添加剂,对肉品的色泽[5]、质构[6]、嫩度[7]等食用品质有明显的改善作用,并通过组分间的相互作用产生 NaCl 的咸味[8],显示出其在食品工业中广阔的应用前景。作者总结了碱性氨基酸干预对肉品色泽、质构和嫩度的影响,并着重归纳了碱性氨基酸对肉品品质的影响机理,旨在为碱性氨基酸在肉品中的应用提供参考。

1 碱性氨基酸对肉品品质的影响

碱性氨基酸包括 *L*-赖氨酸(*L*-Lys)、*L*-精氨酸(*L*-Arg)、*L*-组氨酸(*L*-His)。近年来,碱性氨基酸在肉品中的应用越来越广泛,在改善肉品色泽、质构、嫩度等方面表现出较好的效果。

1.1 碱性氨基酸对肉品色泽的影响

色泽是肉品品质优劣最直观的表现。在加工过程中,产品原料和生产工艺的不同会直接导致肉品色泽的差异[9]。对肉品色泽起着主要作用的是肌红蛋白和血红蛋白[10],肌红蛋白中含有由卟啉环与铁原子络合形成的血红素,根据中心铁原子第六配位键配合物的不同形成不同的化合物[11],当中心铁原子由亚铁离子被氧化为铁离子时就形成了褐色的高铁肌红蛋白[12]。

Wachirasiri 等研究发现,1 g/dL *L*-Lys 和 1 g/dL 的 $NaHCO_3$ 组合使用可以替代磷酸盐显著改善解冻后南美白对虾的色泽,呈现出与鲜虾相似的外观[13]。叶慧琼等探究了 *L*-Lys 对猪血红蛋白浓缩物(porcine hemoglobin concentrates,Hbc)理化性质的影响,发现添加 2~4 g/dL 的 *L*-Lys 显著增加了 Hbc 的亮度值(*L** 值)、红度值(*a** 值)和黄度值(*b** 值),源于 *L*-Lys 对 Hbc 的氧化有一定抑制作用,从而提高了 Hbc 色泽稳定性[14]。Hou 等发现,*L*-Arg 可以抑制血红蛋白的氧化,增加 *L*-Arg-血红蛋白粉在贮藏期间的颜色稳定性[15]。Zheng 等探究 *L*-Arg 和 *L*-Lys 对低钠无磷猪肉香肠理化特性和品质的影响[16],发现 *L*-Arg 和 *L*-Lys 通过螯合铁离子,防止铁卟啉的氧化,导致 *a** 值的增加以及 *b** 值的减少,*L** 值降低,可能是 *L*-Lys 和 *L*-Arg 促进了肌球蛋白的溶解,增加了猪肉肠的水分含量,过高的含水量也会增加肉品的 *a** 值[8]。宋璇等研究发现,*L*-Arg 通过提高溶液 pH 值使血红蛋白变性[17],导致蛋白质二级结构的变化,有效抑制了血红素辅基中亚铁离子的氧化,降低了高铁肌红蛋白的含量,显著提高腌肉的 *a** 值,降低 *L** 值。Ning 等研究发现,*L*-Arg/*L*-Lys/*L*-半胱氨酸促进高铁肌红蛋白的还原,减少其含量,从而改善腊肠的色泽[18]。此外,Ning 等研究还发现 *L*-Arg/*L*-Lys/*L*-半胱氨酸促进了五配位亚硝基肌红蛋白的形成,阻碍了肌红蛋白的氧化,提高腊肠 *a** 值和亚硝基色素含量,从而改善了腊肠的色泽[19]。碱性氨基酸通过螯合亚铁离子,阻碍肌红蛋白和高铁肌红蛋白之间的转化,改善肉制品色泽。肉品的色泽还与肉中的色素有关,当色素(如血红素)溶解到肉品中会使肉品的 *a** 值增高[20]。

1.2 碱性氨基酸对肉品质构的影响

质构特性作为食品重要的品质特性受多种因素的影响[21],特别是与水分含量有关[22],随着水分含量的增加,硬度、咀嚼性等降低[23]。李俊研究发现,分别添加 0.8 g/dL *L*-Lys、0.6 g/dL *L*-Arg 能显著提高猪肉肠的硬度、弹性、咀嚼性,使猪肉肠表面更光滑、致密,改善猪肉肠的感官品质[24]。Lin 等研究发现,使用 *L*-Lys 对南极磷虾进行浸泡处理后,南极磷虾肉的 pH 值增高,蛋白质与水之间相互作用增强,热处理磷虾肉的蒸煮损失减小,硬度和咀嚼性都显著降低[25]。许鹏等研究发现,乳化香肠的质构特性与其凝胶结构有关,*L*-Lys 和 *L*-Arg 促使形成均匀的凝胶网络结构,可以束缚更多的水,提高乳化香肠的持水性[26]。诸晓旭等研究发现,*L*-Arg 能显著提高鸡肉肠中盐溶蛋白的含量,利于三维网络凝胶的形成,提高肉制品的质构[27]。Zhu 等研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 增加了鸡肌球蛋白表面疏水残基,增加了鸡肉香肠的凝胶强度,减少烹饪过程中脂肪和水分的损失[28]。Guo 等研究发现,*L*-Lys 提高了肌球蛋白在低离子强度下的溶解度,从而形成更好的凝

胶网络结构,提高火腿的持水力,显著降低了火腿硬度、弹性[29]。黄亚军研究发现,添加 *L*-Lys 和 *L*-Arg 能够增强油滴之间的静电排斥,增加凝胶基质的弹性模量,且超声波和 *L*-Lys/*L*-Arg 在改善乳化肠质构特性方面存在协同作用[30]。碱性氨基酸增加 pH 值与肉品含水量是改善肉制品质构的原因之一,碱性氨基酸的添加量与种类也会造成现有研究结果的差异。

1.3 碱性氨基酸对肉品嫩度的影响

嫩度是肉制品的重要品质之一,肉的嫩度受肌原纤维的结构状态、肌纤维直径、内源嫩化酶等因素的影响[31]。在储存期间肌动蛋白与肌球蛋白相互连接的能力减弱,肌动球蛋白的解离会导致肌节长度的增加[32],肌纤维蛋白的降解会破坏其本身结构的完整性,导致肌原纤维碎片化[33]。肉制品的肌节长度较长,肌原纤维蛋白碎片化,持水性强[34],高 pH 值[35]均有利于肉的嫩化。剪切力法是表征肉嫩度的常用方法[36],低的剪切力表明高的嫩度。

雷振[37]研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 可以抑制肌动球蛋白的聚集和促进蛋白质的展开,提高肌动球蛋白凝胶的持水力。张银银研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 会使肌动球蛋白解离,导致肌原纤维内部结构的破坏[38]。Chen 等发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 促进肌钙蛋白-T 的降解和肌动球蛋白的分解,增加了猪排的持水力,提高了猪排的嫩度,并且 *L*-Lys 和 *L*-Arg 还能在短时间内有效降低总挥发性碱性氮,抑制蛋白质在冷藏过程中的氧化[39]。Zhang 等研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 显著降低了卤煮鸡胸脯肉的剪切力,作者认为可能是由于 *L*-Lys 和 *L*-Arg 提高溶液的 pH 值,使肌纤维间的间隙逐渐缩小,抑制肌纤维的横向收缩,加强了肌球蛋白的水合作用,从而提高了卤煮鸡胸脯肉的嫩度[40]。Bao 等研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 通过提高猪腰长肌的 pH 值和 Ca^{2+}-ATPase 活性,减轻肌纤维蛋白的结构损伤,维持肌节的结构完整性,增加了持水能力,降低了剪切力,提高了嫩度[41]。

2 碱性氨基酸对肉品品质的影响机理

2.1 碱性氨基酸影响蛋白质的溶解性

肌球蛋白的溶解度与肉制品的品质紧密相关[42],主要是其容易受到 pH 值、离子强度、肌球蛋白的结构等因素的影响。当 pH 值在等电点时肌球蛋白的溶解度最小,偏离等电点时溶解度增大,呈现“U”形趋势。在较低盐离子浓度时,肌球蛋白不易溶解,高盐离子浓度下则会产生盐析效应[43]。相比离子强度,碱性氨基酸更多的是改变肌球蛋白的结构与体系的 pH 值从而影响肌球蛋白的溶解度。

Cao 等研究发现,*L*-Lys 能够增加肌球蛋白单体的比例,并且与焦磷酸钠协同降低肌球蛋白粒径,显著增加了猪氧化肌纤维蛋白的溶解度[44]。周春霞等研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 能够有效增加罗非鱼肌球蛋白体系的 pH 值并干扰蛋白质分子间的静电作用,且干扰效果优于 NaCl[45]。Li 等研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 增加了鸡肌球蛋白溶液的 pH 值,使其偏离了等电点,肌球蛋白分子获得了更多的净负电荷并展开,导致二级结构的变化与疏水残基的暴露,增加了肌球蛋白与水的相互作用[46]。Guo 等发现,*L*-Lys 和 *L*-His 可以与猪肌球蛋白带电残基结合[47],增加肌球蛋白体系的 Zeta 电位[48],破坏了蛋白质分子间的离子连接,引起了猪肌球蛋白构象的转变,增加了溶解度。Li 等发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 优先与酸性氨基酸相互作用[49],其次是芳香氨基酸和脂肪族氨基酸,这增加了蛋白质聚集的活化能,阻碍肌球蛋白聚集,提高了溶解度。*L*-Arg 的增溶效果与其特殊结构胍基有关,然而有研究表明,*L*-Arg 中的胍基在单独存在时的增溶效果不明显[50]。碱性氨基酸的增溶效果还与离子强度和氨基酸的种类有关。

2.2 碱性氨基酸影响蛋白质的热聚集

加热处理是促使蛋白质聚集的重要途径[51]。蛋白质分子肽链受热后,化学键断裂,使蛋白质原有的折叠状结构变得松散[52],蛋白质内部的疏水基团暴露,引起分子相互碰撞发生聚集[53]。除了温度外,蛋白质溶液体系中的离子种类以及 pH 值可以影响蛋白质聚集体的结构[54],进而影响蛋白质的凝胶性等功能特性,最终影响肉品的品质。

浊度的变化通常用于评价蛋白质聚集的程度。石彤等研究发现,添加 1~20 mmol/L 的 *L*-Lys 使鲢肌球蛋白溶液的浊度显著降低,作者认为可能是 *L*-Lys 与肌球蛋白相互结合,减弱了肌球蛋白之间的相互作用,抑制了鲢肌球蛋白的聚集[55]。时娇娇研究发现,*L*-Arg 通过增强肌球蛋白亚基间的疏水性作用来抑制蛋白质折叠状结构的展开[53]。Gao 等研究发现,*L*-Arg 和 *L*-His 提高了溶液的 pH 值,导致肌球蛋白间的静电斥力增强[56],在两步加热过程中,*L*-

Arg 和 *L*-His 与鳙鱼肌球蛋白芳香残基相互作用增加了表面疏水性,且 *L*-Arg 对肌球蛋白聚集的抑制作用大于 *L*-His。Reddy 等结果同样显示 *L*-Arg 可以有效抑制蛋白质聚集[57]。Shi 等研究发现,*L*-Arg 的结构对抑制鱼肌球蛋白热聚集有关[58],*L*-Arg 的胍离子扰乱了肌球蛋白主链 α-螺旋结构的氢键,胍基上的一个氨基(—NH_2)优先与主链羰基氧原子形成氢键,改变肌球蛋白的二级结构。Gao 等研究发现,*L*-His 显著提高了在低或高离子强度溶液中鳙鱼肌球蛋白的溶解度[59]。形态学研究表明,*L*-His 破坏了肌球蛋白的静电性质,减弱疏水相互作用,形成了更细小的聚集体和蜂巢状的网状结构,最终抑制了鳙鱼肌球蛋白的聚集。这些研究表明,碱性氨基酸能提高肉制品体系的 pH 值,增大蛋白质分子间的静电斥力;另一方面,碱性氨基酸含有特定的基团,如 *L*-Arg 的胍基和 *L*-His 的咪唑基,能与蛋白质相互结合,从而阻止肌球蛋白的聚集。

2.3 碱性氨基酸影响蛋白质的凝胶性

凝胶特性是肉与肉制品加工过程中重要的功能特性之一[60],决定着肉品的保水性、蒸煮损失率和质构特性[61]。在高离子强度下,肌球蛋白分解成单体,并通过非共价相互作用和共价键交联形成有序的凝胶基质[62]。为了追求健康饮食而选择的低盐会导致凝胶型肉制品持水能力低,凝胶强度差[63],凝胶基质特性受体系的 pH 值[64]的影响还与其微观结构有关[65]。Sun 等发现经过酸性处理的肌球蛋白构象产生改变,最终完全丧失凝胶形成能力[66]。碱性氨基酸能够增加体系 pH 值,改变氨基酸侧链的电荷分布,影响蛋白质之间的相互作用[67],进而影响肌球蛋白的凝胶性。当 pH 值逐渐远离等电点,肌球蛋白热凝胶结构趋于稳定[68]。

关宏等研究发现,*L*-Arg 增加草鱼糜凝胶体系的 pH 值,提高肌球蛋白的溶解性,增加盐溶性蛋白质的含量,*L*-Arg 结构上的胍基可以抑制改变肌球蛋白的聚集,进而改善鱼糜凝胶的持水性和凝胶强度[69]。郭秀云研究发现,经 *L*-His、*L*-Lys 及低钠盐处理的猪肉肌球蛋白溶解度增加,在加热过程中形成更致密的凝胶网络结构,在低盐浓度和在生理盐浓度条件下显著提高了凝胶的保水性[70]。尚校兰等研究发现,*L*-Arg 增加牛肉肌原纤维蛋白巯基含量,提高牛肉糜的保水性[71]。Cao 等研究发现,添加 *L*-His、*L*-His 与转谷氨酰胺酶(TG)的组合显著降低了氧化损伤肌原纤维蛋白的蒸煮损失,提高了凝胶强度[72]。作者认为,加入 *L*-His 会导致蛋白质疏水区域和巯基暴露,并使蛋白质的 α-螺旋结构转化为 β-折叠或 β-转角结构,这有利于凝胶强度和持水能力的恢复和增强。由于 *L*-Lys 本身的淡黄色,凝胶白度会有所下降[73]。Lei 等[74]研究发现,*L*-Arg 可能通过改变鸡肌动球蛋白的结构和热行为,有利于形成致密均匀的凝胶,提高凝胶的持水能力、强度和横向弛豫时间。

2.4 碱性氨基酸抑制蛋白质氧化

在加工肉品过程中,蛋白质难免会暴露于过氧自由基而被氧化[75]。蛋白质氧化可以增强蛋白质分子间相互作用(离子键、氢键、疏水力和二硫键),引起蛋白质之间的交联,使溶解性降低[76]。蛋白质的氧化可以由活性氧(Reactive Oxygen Species,ROS)和活性氮(Reactive Nitrogen Species,RNS)直接诱导产生[77],肌球蛋白中的巯基基团可以被氧化成亚磺酸和磺酸[78],半胱氨酸的硫醇基团氧化形成二硫键使蛋白质发生聚集[79]。蛋白质中羰基基团主要由氧化机制产生[80],因此羰基含量被广泛用于评价蛋白质的氧化程度。Xia 等[81]发现氧化损伤的肌原纤维蛋白制备的凝胶型产品比未氧化的蛋白质更容易变质。Wang 等发现高水平的蛋白质氧化可以降低兔肉肌原纤维蛋白凝胶性能[82]。然而 Xia 等发现适度的氧化可以提高猪肉肌纤维蛋白凝胶的质构特性[83]。有研究表明,一定程度的冷冻储存和轻度的蛋白质氧化可以改善凝胶质地和持水力[84],能够改善但不能维持凝胶的硬度、弹性和粘聚性[83],肌原纤维蛋白的氧化可以影响肉品的保水性、质构等食用品质[77]。

Zhang 等研究发现,*L*-Lys 和 *L*-Arg 能够有效缓解肌球蛋白在羟自由基(·OH)氧化应激下的结构损伤,降低了二酪氨酸的含量,改善了肌球蛋白的溶解度,最终有助于保持肌球蛋白乳化能力[85]。马文慧等研究发现,添加 1~5 mmol/L 的 *L*-Arg 时,*L*-Arg 自身的—NH_2 等基团先与·OH 进行反应,从而阻止了肌原纤维蛋白巯基的损失,当 *L*-Arg 的浓度达到 10 mmol/L 时,引起了肌原纤维蛋白分子解折叠,加速了肌原纤维蛋白巯基的损失,同时暴露了更多的色氨酸残基,进而促进了蛋白质的交联形成聚集体[86]。

清除·OH 或其他自由基可以抑制由金属离子引起的氧化作用[87],庞坤等研究发现,*L*-His 具有清

除自由基的能力,且随着浓度的提高对牛血清白蛋白氧化的抑制率增大[88]。Xu 等研究发现,随着 *L*–Lys、*L*–Arg 质量浓度的升高,清除二苯代苦味肼基(1,1–diphenyl–2–pierylhydrazy,DPPH·)和·OH 的速度和与亚铁离子螯合速率也随之增加,阻断自由基链反应的传播,最终抑制乳化香肠的脂类和蛋白质的氧化,并且 *L*–Lys 和 *L*–Arg 的抗氧化能力不受它们弱还原力的影响[89]。Zhang 等研究发现,*L*–Lys 和 *L*–Arg 均降低了·OH 氧化胁迫下乳化香肠中的羰基含量,其中 *L*–Lys 还增加了总巯基含量,主要是 *L*–Lys 和 *L*–Arg 由于具有螯合亚铁离子和清除·OH 的能力,从而延缓了肉类蛋白质的氧化,但不能彻底消除氧化作用[90]。

2.5 碱性氨基酸调控肉品中蛋白酶的活性

蛋白酶系统通过调控蛋白质的降解影响肉品的嫩度等品质[91]。有研究表明,动物死后早期,在不破坏钙蛋白酶分子结构条件下,pH 值缓慢下降有利于激活钙蛋白酶,加快嫩化速度,如果 pH 值下降太快可能结果相反[92]。在极端酸性 pH 条件下,肌球蛋白的空间构象发生不可逆的改变,Ca^{2+}–ATPase 失活[93]。Zhang 等研究发现,*L*–Lys 和 *L*–Arg 作为碱性氨基酸减缓了体系 pH 值下降速度,维持了钙蛋白酶活性和 *L*–Arg 的胍基与 Ca^{2+}/Mg^{2+}–ATPase 酶芳香族残基的相互作用,促进肌动球蛋白的解离[94]。瞿彪研究发现,*L*–His 可以降低草鱼肌肉中组织蛋白酶 B 和 L 的活性,增加了胶原蛋白的含量,*L*–His 还可以提高抗氧化酶的基因表达水平,最终提高草鱼肌肉的抗氧化能力[95]。Zou 等研究发现,*L*–His 的咪唑基与蛋白质结合,促进蛋白质的溶解,提高 Ca^{2+}–ATPase 的活性,经超声辅助 0.15 g/dL *L*–His 处理的牛半腱肌的剪切力最低[96]。

3 展 望

随着人们生活水平的不断提高,人们对食物的营养和健康的重视程度也越来越高。在低盐、无磷、天然、绿色等食品产业发展趋势的大背景下,碱性氨基酸在食品加工领域显示出广阔的应用前景,一是源于它们自身的营养特性,二是源于它们对肉品色泽、质构、嫩度等食用品质的改善。现有研究结果表明,碱性氨基酸通过增加肌原纤维蛋白溶解度来提高肉品的持水能力,调控蛋白酶的活性,有效改善肉及肉制品的色泽、质构和嫩度等理化性质,还能在一定程度上抑制肌原纤维蛋白的氧化,进而提高肉品的保水性和氧化稳定性,改善凝胶特性。但关于碱性氨基酸在肉品以及其他食品中的应用研究还需要进一步拓展,对其作用机理的研究有待进一步深入。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报,2022-03-01(010).
[2] BEKHIT E D A,CARNE A,HA M,et al. Physical interventions to manipulate texture and tenderness of fresh meat:a review[J]. **International Journal of Food Properties**,2014,17(2):433-453.
[3] 邹玉峰,钱畅,韩敏义,等. 凝胶类肉制品加工技术研究进展及趋势[J]. 食品与发酵工业,2017,43(11):232-237.
[4] PINTON M B,DOS SANTOS B A,LORENZO J M,et al. Green technologies as a strategy to reduce NaCl and phosphate in meat products:an overview[J]. **Current Opinion in Food Science**,2021,40:1-5.
[5] 杨锡洪,夏文水. 亚硝酸盐替代物——组氨酸发色作用的研究[J]. 食品与生物技术学报,2005,24(5):102-106.
[6] 张道静,周存六. L- 精氨酸和 L- 赖氨酸在肉及肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究,2020,34(6):96-102.
[7] VIDAL V A S,SANTANA J B,PAGLARINI C S,et al. Adding lysine and yeast extract improves sensory properties of low sodium salted meat[J]. **Meat Science**,2020,159:107911.
[8] ZHANG Y,GUO X,LIU T,et al. Effects of substitution of NaCl with KCl,L-histidine,and L-lysine on instrumental quality attributes of cured and cooked pork loin[J]. **CyTA–Journal of Food**,2018,16(1):877-883.
[9] 董丽,刘登勇,谭阳,等. 肉制品食用品质评价方法研究进展[J]. 肉类研究,2014,28(4):32-37.
[10] 王瑞军. 浅析常见食品护色剂的护色机理[J]. 农产品加工,2021(23):76-77.
[11] 林森森,戴志远. 鱼肉肌红蛋白的呈色机理及其在热加工中对肉色的影响[J]. 肉类工业,2019(1):52-57.
[12] 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.
[13] WACHIRASIRI K,WANLAPA S,UTTAPAP D,et al. Changing in processing yield and physical properties of frozen white shrimp(*Penaeus vannamei*) treated with lysine and sodium bicarbonate[J]. **International Journal of Food Science & Tech–**

nology,2017,52(3):763-771.
[14] 叶慧琼,汪慧,秦浩,等. L- 赖氨酸对血红蛋白浓缩物色泽稳定性的影响[J]. 农产品加工(学刊),2014(11):5-11.
[15] HOU C,SONG X,LI Z,et al. Arginine improves the color stability of hemoglobin powder during freeze-drying and storage[J]. **Food Science & Nutrition**,2019,7(5):1677-1684.
[16] ZHENG Y. Effects of L-lysine/L-arginine on the physicochemical properties and quality of sodium-reduced and phosphate-free pork sausage[J]. **International Journal of Nutrition and Food Sciences**,2017,6(1):12.
[17] 宋璇. 精氨酸—血红蛋白色素稳定性及应用研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
[18] NING C,BAO P,ZHANG D,et al. Reduction and coordination properties of L-lysine/L-arginine/L-cysteine for the improvement of the color of cured sausage[J]. **Food Chemistry**,2020,312:126122.
[19] NING C,LI L,FANG H,et al. L-lysine/L-arginine/L-cysteine synergistically improves the color of cured sausage with $NaNO_2$ by hindering myoglobin oxidation and promoting nitrosylmyoglobin formation[J]. **Food Chemistry**,2019,284:219-226.
[20] GAO R C, WANG X, SHI T, et al. Enhanced physical properties of reduced-salt surimi gels from Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*) by L-arginine and L-histidine[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2021,45(11):69-78.
[21] 郝红涛,赵改名,柳艳霞,等. 肉类制品的质构特性及其研究进展[J]. 食品与机械,2009,25(3):125-128.
[22] 涂敏建,迟海,杨宪时,等. 不同水分含量对南极磷虾烤虾质构和色泽的影响[J]. 现代食品科技,2012,28(9):1102-1105.
[23] 贾艳华,杨宪时,许钟,等. 水分含量对软烤扇贝质构和色泽的影响[J]. 食品与机械,2010,26(3):47-50.
[24] 李俊. 赖氨酸和精氨酸分别对猪肉肠品质特性影响的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
[25] LIN J,ZHANG Y,LI Y,et al. Improving the texture properties and protein thermal stability of Antarctic krill(*Euphausia superba*) by L-lysine marination[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2021,102(9):129-136.
[26] 许鹏,郑亚东,诸晓旭,等. 不同碱性氨基酸对乳化香肠品质特性的影响[J]. 肉类研究,2017,31(5):5-9.
[27] 诸晓旭. L- 精氨酸和 L- 赖氨酸对鸡肉肠乳化稳定性的影响及机理研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
[28] ZHU X,NING C,LI S,et al. Effects of L-lysine/L-arginine on the emulsion stability,textural,rheological and microstructural characteristics of chicken sausages[J]. **International Journal of Food Science & Technology**,2018,53(1):88-96.
[29] GUO X,TAO S,PAN J,et al. Effects of L-lysine on the physiochemical properties and sensory characteristics of salt-reduced reconstructed ham[J]. **Meat Science**,2020,166:108133.
[30] 黄亚军. 超声与碱性氨基酸联合处理对乳化肠物理稳定性的影响及机理研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
[31] 陈武东,杜险峰. 肉类嫩度的影响因素及盐类嫩化牛肉技术研究进展[J]. 中国调味品,2021,46(6):192-195.
[32] 李胜杰,徐幸莲,周光宏. 宰后肌动球蛋白解离对肉品嫩度的影响研究进展[J]. 食品科学,2010,31(21):442-445.
[33] HUFF LONERGAN E,ZHANG W,LONERGAN S M. Biochemistry of postmortem muscle — Lessons on mechanisms of meat tenderization[J]. **Meat Science**,2010,86(1):184-195.
[34] 曹竑,王爱国. 影响肉及肉制品嫩度的因素探讨[J]. 西北民族学院学报,1997,18(2):94-96.
[35] 吴盛夏,周鸿媛,夏杨毅,等. 肌肉嫩化方法及其机理分析[J]. 食品科技,2012,37(9):126-129.
[36] 田晓静,王俊. 质构分析在肉制品检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报,2014,5(6):1654-1660.
[37] 雷振. *L*- 精氨酸和 *L*- 赖氨酸对鸡肉肌动球蛋白及其凝胶特性的影响[D]. 合肥:合肥工业大学,2016.
[38] 张银银. 外源性 *L*- 精氨酸和 *L*- 赖氨酸对卤鸡胸肉嫩度的影响及机理研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
[39] CHEN L,BAO P,WANG Y,et al. Improving quality attributes of refrigerated prepared pork chops by injecting L-arginine and L-lysine solution[J]. **LWT– Food Science and Technology**,2022,153:112423.
[40] ZHANG Y,ZHANG D,HUANG Y,et al. Effects of basic amino acid on the tenderness,water binding capacity and texture of cooked marinated chicken breast[J]. **LWT– Food Science and Technology**,2020,129:109524.
[41] BAO P,CHEN L,WANG Y,et al. Quality of frozen porcine *Longissimus lumborum* muscles injected with L-arginine and L-lysine solution[J]. **Meat Science**,2021,179:108530.
[42] 张雅玮,郭秀云,尹敬,等. 低钠盐对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技,2017,38(19):6-10.
[43] 付苇娅,周春霞,朱潘红,等. 3 种离子强度下 pH 值对罗非鱼肌球蛋白溶解度及分子构象的影响[J]. 食品与发酵工业,2017,43(9):64-70.
[44] CAO Y,LI Z,LI B,et al. Mitigation of oxidation-induced loss of myofibrillar protein gelling potential by the combination of pyrophosphate and L-lysine[J]. **LWT– Food Science and Technology**,2022,157:113068.

[45] 周春霞，时娇娇，付苇娅，等. 赖氨酸和精氨酸对三种离子强度下罗非鱼肌球蛋白溶解度及构象的影响[J]. 现代食品科技，2016，32(12)：99-104.
[46] LI S，LI L，ZHU X，et al. Conformational and charge changes induced by *L*-arginine and *L*-lysine increase the solubility of chicken myosin[J]. **Food Hydrocolloids**，2019，89：330-336.
[47] GUO X Y，PENG Z Q，ZHANG Y W，et al. The solubility and conformational characteristics of porcine myosin as affected by the presence of L-lysine and L-histidine[J]. **Food Chemistry**，2015，170：212-217.
[48] 朱潘红，周春霞，付苇娅，等. 赖氨酸诱导低离子强度下罗非鱼肌球蛋白增溶及机制[J]. 食品科学，2018，39(03)：97-103.
[49] LI S，ZHENG Y，XU P，et al. L-lysine and L-arginine inhibit myosin aggregation and interact with acidic amino acid residues of myosin：the role in increasing myosin solubility[J]. **Food Chemistry**，2018，242：22-28.
[50] TAKAI E，YOSHIZAWA S，EJIMA D，et al. Synergistic solubilization of porcine myosin in physiological salt solution by arginine[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**，2013，62：647-651.
[51] LI K，SHEN H，LI B，et al. Changes in physiochemical properties of water-soluble proteins from crucian carp （*Carassius auratus*） during heat treatment[J]. **Journal of Food Science and Technology**，2014，51(7)：1396-1400.
[52] 胡亚丽. 罗非鱼肌肉蛋白热变性聚集行为及其抑制[D]. 湛江：广东海洋大学，2015.
[53] 时娇娇. 蛋白稳定剂对罗非鱼肌球蛋白热变性聚集的抑制及机理[D]. 湛江：广东海洋大学，2016.
[54] 潘腾，陈星，沈清武，等. 不同 Ca^{2+} 浓度下猪肉肌球蛋白的热聚集体机制研究[J]. 农业机械学报，2020，51(9)：329-336.
[55] 石彤，袁丽，王艳敏，等. *L*- 赖氨酸对鲢肌球蛋白热聚集行为的影响[J]. 食品科学，2018，39(8)：1-5.
[56] GAO R，SHI T，SUN Q，et al. Effects of *L*-arginine and *L*-histidine on heat-induced aggregation of fish myosin：bighead carp (*Aristichthys nobilis*)[J]. **Food Chemistry**，2019，295(15)：320-326.
[57] REDDY K R C. L-arginine increases the solubility of unfolded species of hen egg white lysozyme[J]. **Protein Science**，2005，14(4)：929-935.
[58] SHI T，XIONG Z，JIN W，et al. Suppression mechanism of l-arginine in the heat-induced aggregation of bighead carp(*Aristichthys nobilis*) myosin：The significance of ionic linkage effects and hydrogen bond effects[J]. **Food Hydrocolloids**，2020，102：105596.
[59] GAO R，WANG Y，MU J，et al. Effect of l-histidine on the heat-induced aggregation of bighead carp(*Aristichthys nobilis*) myosin in low/high ionic strength solution[J]. **Food Hydrocolloids**，2018，75：174-181.
[60] 叶凤凌，周敏之，池玉闽，等. 蛋白氧化对肉品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.
[61] 李林贤，李诗义，诸晓旭，等. 氯化钠与 *L*- 精氨酸 /*L*- 赖氨酸复合提取鸡胸蛋白的凝胶性质[J]. 肉类研究，2018，32(6)：6-11.
[62] ZHAO X，XU X，ZHOU G. Covalent chemical modification of myofibrillar proteins to improve their gelation properties：a systematic review[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**，2021，20(1)：924-959.
[63] SHAO J，ZOU Y，XU X，et al. Effects of NaCl on water characteristics of heat-induced gels made from chicken breast proteins treated by isoelectric solubilization/precipitation[J]. **CyTA：Journal of Food**，2016，14(1)：145-153.
[64] YUAN L，LIU Y，GE J，et al. Effects of heat treatment at two temperatures on the myosin cluster of bighead carp for gel formation [J]. **CyTA：Journal of Food**，2017，15(4)：574-581.
[65] 胡忠良. 鸡胸肉肌原纤维蛋白质氧化对其热诱导凝胶和理化特性的影响[D]. 南京：南京农业大学，2012.
[66] SUN L C, LIN Y C, LIU W F, et al. Effect of pH shifting on conformation and gelation properties of myosin from skeletal muscle of blue round scads(*Decapterus maruadsi*)[J]. **Food Hydrocolloids**, 2019, 93(AUG.):137-145.
[67] 盖静. 不同加热温度对鳙鱼肌球蛋白聚集行为的影响及其机理研究[D]. 镇江：江苏大学，2016.
[68] 吴烨，许柯，徐幸莲，等. 低场核磁共振研究 pH 值对兔肌球蛋白热凝胶特性的影响[J]. 食品科学，2010，31(9)：6-11.
[69] 关宏，丁玉琴，尤娟，等. pH 值对添加 L- 精氨酸的草鱼糜凝胶特性的影响[J]. 华中农业大学学报，2018，37(5)：110-116.
[70] 郭秀云. HL- 低钠盐及其组分组氨酸和赖氨酸对猪肉肌球蛋白理化特性与热诱导凝胶特性的影响[D]. 南京：南京农业大学，2016.
[71] 尚校兰，许洪力，杨凤帆，等. L- 精氨酸对牛肉糜保水性的影响[J]. 食品工业科技，2017，38(4)：306-310.
[72] CAO Y，LI B，FAN X，et al. Synergistic recovery and enhancement of gelling properties of oxidatively damaged myofibrillar protein by L-lysine and transglutaminase[J]. **Food Chemistry**，2021，358：129860.
[73] 韩馨蕊，李朝蕊，范鑫，等. 赖氨酸对冷冻损伤肌原纤维蛋白凝胶性能的影响[J]. 食品科学，2022，43(2)：1-7.
[74] LEI Z，FU Y，XU P，et al. Effects of L-arginine on the physicochemical and gel properties of chicken actomyosin [J].

International Journal of Biological Macromolecules,2016,92:1258-1265.

[75] EDORTA E, AVILA F, FUENTES-LEMUS E, et al.. Oxidation of myofibrillar proteins induced by peroxyl radicals:role of oxidizable amino acids[J]. **Food Research International**,2019,126(C):108580.1-108580.8.

[76] 陈娇娇,蔡爽,李玲. 肌原纤维蛋白氧化对蛋白质及凝胶性能的影响[J]. 湖北农业科学,2021,60(S1):15-16.

[77] BAO Y,ERTBJERG P,ESTÉVEZ M,et al. Freezing of meat and aquatic food:underlying mechanisms and implications on protein oxidation[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2021,20(6):5548-5569.

[78] 郑尧,邱泽慧,王锡昌. 冻藏肉及其制品中蛋白氧化的研究进展[J]. 中国食品学报,2021,21(6):331-341.

[79] CHEN X,XIONG Y L,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 Chemistry**,2019,285:31-38.

[80] ZHANG Z L, XIONG Z Y, LU S F, et al. Effects of oxidative modification on the functional,conformational and gelling properties of myofibrillar proteins from *Culter alburnus*[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2020,162:1442-1452.

[81] XIA T,ZHAO X,YU X,et al. Negative impacts of in-vitro oxidative stress on the quality of heat-induced myofibrillar protein gelation during refrigeration[J]. **International Journal of Food Properties**,2018,21(1):2205-2217.

[82] WANG Z,HE Z,GAN X,et al. Effect of peroxyl radicals on the structure and gel properties of isolated rabbit meat myofibrillar proteins[J]. **International Journal of Food Science & Technology**,2018,53(12):2687-2696.

[83] XIA M Q, CHEN Y X, GUO J J, et al. Effects of oxidative modification on textural properties and gel structure of pork myofibrillar proteins[J]. **Food Research International**,2019, 121:678-683.

[84] LU H, ZHANG L, LI Q, et al. Comparison of gel properties and biochemical characteristics of myofibrillar protein from bighead carp (*Aristichthys nobilis*) affected by frozen storage and a hydroxyl radical-generation oxidizing system [J]. **Food Chemistry**, 2017,223(15):96-103.

[85] ZHANG D, ZHANG Y, HUANG Y, et al. *L*-arginine and *L*-lysine alleviate myosin from oxidation: their role in maintaining myosin's emulsifying properties[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2021,69(10): 3189-3198.

[86] 马文慧,邝吉卫,李保玲,等. 氧化条件下精氨酸对肌原纤维蛋白结构及凝胶性能的调控[J]. 食品科学,2021,42(24):24-31.

[87] 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.

[88] 庞坤,张安世. 肌肽、丙氨酸和组氨酸抗氧化性的比较研究[J]. 氨基酸和生物资源,2011,33(4):33-35.

[89] XU P,ZHENG Y,ZHU X,et al. *L*-lysine and *L*-arginine inhibit the oxidation of lipids and proteins of emulsion sausage by chelating iron ion and scavenging radical[J]. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**,2018,31(6):905-913.

[90] ZHANG D,XU B,ZHANG Y,et al. *L*-arginine/*L*-lysine alleviated the deterioration of emulsion sausages with partial replacement of porcine backfat by soybean oil by hindering hydroxyl radical stressed oxidation of meat proteins[J]. **ACS Food Science & Technology**,2021,1(5):967-974.

[91] FU Q,LIU R,WANG H,et al. Effects of oxidation *in vitro* on structures and functions of myofibrillar protein from beef muscles [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2019,67(20):5866-5873.

[92] 陈李,周存六. 化学干预调控肉及肉制品嫩度的研究进展[J]. 肉类研究,2021,35(3):53-59.

[93] 田元勇,王伟,宋扬,等. 低离子强度下调节 pH 值对鲤肌球蛋白空间构象的影响[J]. 中国食品学报,2019,19(3):86-92.

[94] ZHANG Y,ZHANG D,HUANG Y,et al. *L*-arginine and *L*-lysine degrade troponin-T,and *L*-arginine dissociates actomyosin:their roles in improving the tenderness of chicken breast[J]. **Food Chemistry**,2020,318:126516.

[95] 瞿彪. 组氨酸对生长中期草鱼肉质的影响和肠道、鳃损伤的保护作用研究[D]. 雅安:四川农业大学,2014.

[96] ZOU Y,JIANG D,XU P,et al. Evaluation of the postmortem ageing process of beef *M. semitendinosus* based on ultrasound-assisted *L*-histidine treatment[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2020,69:105265.