

新型辅助加工技术提高肉制品消化特性的研究进展

姚文晶, 张风雪, 曹传爱, 孔保华, 刘 骞*

(东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 随着国民生活质量的提高, 人们对肉制品的需求也不再仅仅局限于感官质量和卫生质量等基本特性。肉制品中蛋白质含量高达 10%~20%, 是人体不可缺少的营养物质。近年来, 如何提高肉制品的消化率这一问题受到了广泛的关注。目前, 改善肉制品中蛋白质的结构和功能特性是提高消化率的主要可行性途径。在传统蒸煮、烘烤等加工方式的前提下, 肉制品的制作过程中辅以新型加工技术(如超声波、超高压、脉冲电场、真空低温烹饪、酶解技术等), 可以达到改变蛋白质结构、提高蛋白水解酶活性的目的, 从而提高肉制品的消化率。本文系统综述新型辅助加工技术在提高肉制品消化特性方面的研究进展, 旨在探求更经济有效的加工方法, 为提高肉制品的消化特性提供理论基础。

关键词: 肉制品; 消化特性; 新型加工技术; 蛋白结构

Research progress of new auxiliary processing technology to improve digestive characteristics of meat products

YAO Wen-Jing, ZHANG Feng-Xue, CAO Chuan-Ai, KONG Bao-Hua, LIU Qian*

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

ABSTRACT: With the improvement of national quality of life, people's demand for meat products is no longer limited to the basic characteristics of sensory quality and hygienic quality. The protein content in meat products is up to 10%–20%, which is an indispensable nutrient for human body. In recent years, how to improve the digestibility of meat products has attracted extensive attention. At present, improving the structure and functional properties of protein in meat products is the main feasible way to improve digestibility. Under the premise of traditional cooking, baking and other processing methods, the production process of meat products supplemented by new processing technologies (such as ultrasound, ultra-high pressure, pulsed electric field, vacuum low-temperature cooking, enzymatic hydrolysis technology, etc.), can achieve the purpose of changing protein structure and improving proteolytic enzyme activity, thereby improving the digestibility of meat products. This paper systematically reviewed the research progress of new auxiliary processing technologies in improving the digestive characteristics of meat products, aiming at exploring more economical and effective processing methods and providing a theoretical basis for

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项课题项目(2020ZX07B02)、黑龙江省省属本科高校中央支持地方高校改革发展资金(优秀青年人才项目)(2020YQ15)

Fund: Supported by the Millions of Major Science and Technology Projects in Heilongjiang Province (2020ZX07B02), and the Foundation of Central Support for the Reform and Development of Local Universities in Heilongjiang Province (Excellent Young Talents Project) (2020YQ15)

*通信作者: 刘骞, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为畜产品加工工程。E-mail: liuqian@neau.edu.cn

Corresponding author: LIU Qian, Ph.D, Professor, College of Food Science, Northeast Agricultural University, No.600, Changjiang Road, Xiangfang District, Harbin 150030, China. E-mail: liuqian@neau.edu.cn

improving the digestive characteristics of meat products.

KEY WORDS: meat products; digestive characteristics; new processing technology; protein structure

0 引言

蛋白质是仅次于碳水化合物和脂肪的主要营养素之一^[1], 是人体蛋白质合成所需的氮和必需氨基酸的主要膳食来源, 以实现组织生长和维持生命活动^[2]。对于成年人来说, 每天建议的蛋白质膳食摄入量为 0.8~1.0 g/kg 而老年人则需要更多, 为 1.0~1.2 g/kg^[3]。为了满足如此高的日常蛋白质需求, 饮食必须包括一些高质量的蛋白质来源。蛋白质的质量不仅取决于必需氨基酸的组成, 还取决于其消化率, 即摄入后可供吸收的食物氮的比例^[4]。肉类和肉制品中蛋白质含量高, 并且含有所有必需氨基酸, 氨基酸的比例与人体组织的生长和维持要求相似^[5]。肉类蛋白质也是人类蛋白质摄入来源的主要途径之一^[6], 对促进人体骨骼发育、提高细胞活性和生命体组织修复具有积极的影响^[7]。因此, 充分利用并提高肌肉食品的蛋白质消化率显得尤为重要。

目前, 肉类工业中采用超高压、超声波、冷等离子体等各种新型辅助加工技术来修饰肉蛋白质结构, 提高肉制品的感官和消化特性。利用超高压技术破坏肉蛋白质的二级结构, 可以诱导蛋白质展开, 氧化氨基酸残基, 裂解肽键, 从而导致抵抗消化蛋白酶的结合位点被破坏, 有利于提高肉制品蛋白质的消化率^[8]。以空气为气源产生的冷等离子体因含有大量氧化和反应性物质, 这些氧化和反应性物质能够诱导肌原纤维蛋白展开, α -螺旋含量减少, β -折叠含量增加^[9], 蛋白组织致密的网络结构变为松散, 蛋白质的消化利用率得到提高。与传统的加工方式相比, 新型加工技术已经被证实能够诱导肌肉蛋白质的有利修饰, 并增加它们对消化过程中蛋白水解酶的敏感性, 提高蛋白质的消化特性^[10]。已有研究发现, 经超高压处理后的猪肉饼消化率可从不足 60% 提高到 90%^[11], 经超声波技术处理后制备的婴幼儿肉泥制品在婴儿小肠中消化率可提高到 80.85%^[12]。

祝超智等^[13]从肉类自身因素和外部处理因素两方面综述了对肉类蛋白质消化性的影响。通过分析前人的研究基础发现无论是基于肉制品自身因素还是外部对肉制品的处理作用, 肉制品的消化特性最终还是与肉蛋白密切相关。本文主要归纳了影响肉制品消化性的因素, 并系统综述几种提高肉制品消化性的新型辅助加工技术(超声波、超高压、脉冲电场、低温真空烹饪、酶解技术)及其对提高肉制品消化性的影响, 以期为后续改善提高肉制品的消化性提供理论参考。

1 影响肉制品消化率的主要因素

1.1 肉蛋白结构

肉蛋白的结构修饰发生在分子和生理两个阶段^[14]。当蛋白质的分子内和分子间相互作用在加工过程中发生改变时, 蛋白质的初级、二级和三级结构都可能会发生变化。比如蛋白质羰基化、芳香残基修饰、美拉德反应等可能会在分子水平上改变肉蛋白的初级结构, 在二级结构, 使 α -螺旋增多, β -折叠减少, 从而导致蛋白质在三级结构上聚集^[15~16], 致使蛋白水解酶敏感性降低而降低蛋白质的消化率^[17]。热处理也能够影响肉蛋白的结构, 当在 50~60°C 以上加热时, 肉蛋白的三级结构开始改变, 而在 60~90°C 中加热不足 1 h 时, 二级结构被改变并广泛变性, 其中 α -螺旋含量减少, 而 β -折叠含量增加, 蛋白质中埋藏的疏水残基和巯基被暴露出来, 蛋白质表面疏水性增强, 迫使蛋白质分子间的氢键、二硫键部分断裂, 蛋白质得到延伸和重组, 内部致密结构被破坏, 与胃蛋白酶相互作用的内部位点被暴露, 更易于与胃蛋白酶结合, 蛋白质的消化性得到提高^[13,18~19]。

1.2 蛋白质的聚集状态

蛋白质聚集会降低蛋白酶对蛋白质的敏感性, 进而降低蛋白质的消化率^[18]。蛋白质聚集会导致蛋白质内部分子不可逆地形成低聚物并且粒子数量减少^[14]。这些分子相互作用的主要步骤分为两个阶段。第一阶段是蛋白质的结构变化或部分展开, 第二阶段是化学反应, 包括脱氨或蛋白质氧化, 导致蛋白质聚集^[20]。其中第二阶段可诱导蛋白质对胃蛋白酶的消化性下降。ZHOU 等^[21]在研究亚油酸诱导的氧化修饰对猪肌原纤维蛋白理化性质和体外消化性的影响中也发现当氧化亚油酸浓度的增加到 5~10 mmol/L 时, 猪肌原纤维蛋白的游离氨基酸和蛋白溶解度显著降低, 蛋白质交联和聚集增强, 消化率显著降低。蛋白质的过度聚集会使蛋白质分子拥有更大的颗粒尺寸, 不利于消化酶分解。同时大的尺寸掩盖了和蛋白酶的结合位点, 更不利于提高肉蛋白的消化特性。

1.3 消化蛋白酶对蛋白质的可消化性

蛋白质的消化离不开胃肠中消化酶的作用。肉制品进入肠胃中先被胃蛋白酶消化。胃蛋白酶是一种非特异性酶, 具有广泛的底物特异性, 破坏疏水氨基酸和芳香族氨基酸之间的肽键^[22], 之后进入肠道中被胰蛋白酶分解。胰蛋白酶切割氨基酸中的赖氨酸和精氨酸的羧基侧肽链^[23], 最后在小肠上皮细胞中, 游离氨基酸和较小的肽(二肽、三肽或

四肽)通过主动运输或促进扩散方式转移到血液中^[24], 被人体吸收利用。胃蛋白酶和胰蛋白酶对不同种类的肉源蛋白质消化率也不同。研究发现, 在胃蛋白酶消化作用下, 大部分肌浆蛋白质在反应后 1 min 内降解, 肌球蛋白在 60 min 内被完全消化, 但是原肌球蛋白很难被完全降解^[13]。肌红蛋白的芳香族氨基酸残基在蛋白质内部, 与胃蛋白酶的亲和力较弱, 虽然易溶于水, 但不易被胃蛋白酶消化^[25~26]。胶原蛋白的氨基酸组成中脯氨酸含量相对较高, 通常含有脯氨酸的肽对消化酶水解具有抵抗性, 故胶原蛋白具有一定的抗消化性^[27]。胰蛋白酶可以在赖氨酸和精氨酸氨基酸残基的 c 端切割多肽, 如果在解离位点的任意一侧都有酸性残基则水解的速度会较慢, 而如果脯氨酸残基解离位点的羧基一侧, 则解离不会发生^[23]。肉蛋白中氨基酸的种类不同, 消化蛋白酶对各种氨基酸的消化难易程度不同, 消化特性也不同。

2 几种新型辅助加工技术对肉制品消化特性的影响

肉制品工业采用各种技术来改变蛋白质结构, 提高肉类和肉制品的感官和功能品质^[28]。一些传统的加工技术不仅在一定程度上对蛋白质构象有破坏作用, 进而影响食物原有的风味和品质, 而且加工效率相对较低, 对于批量生产造成极大的不方便。而新兴技术如脉冲电场、超高压、超声波、低温真空烹调等, 通过影响蛋白质和肌肉的微观结构和功能特性, 可以诱导蛋白质变性, 影响蛋白质的展开和折叠, 从而影响胃肠道蛋白酶深入扩散到蛋白质基质以及其裂解位点, 从而对提高蛋白质消化率产生有利的影响^[7]。LI 等^[29]通过超声-微波联合处理金丝鲷, 发现与对照组相比, 超声处理后的金丝鲷样品被胃蛋白酶、碱性蛋白酶和中性蛋白酶水解的程度更高, 消化率更好。WANG 等^[30]和 TANG 等^[31]在对鸡肉和罗非鱼的处理实验中发现, 利用超声波处理可以诱导蛋白质折叠和解离, 使肌原纤维蛋白的二级和三级结构被破坏, 肌动球蛋白的粒径减小, 浊度降低, 总巯基含量增加, 肌动球蛋白的表面疏水性随超声强度和暴露时间的增加而增加, 原本致密的组织交联结构变为松散, 在肌原纤维蛋白内部出现大的空腔, 胃蛋白酶、

胰蛋白酶等消化酶类更容易通过空腔直接与肉蛋白接触, 肉蛋白的消化率提高。本文详细介绍了以上 4 种辅助加工技术以及酶解技术对肉制品消化特性的影响。

2.1 超声波辅助加工技术

超声波是一种绿色食品加工技术, 被广泛应用于食物组分与功能间互作的检测。基于机械电波频率高于人类听觉阈值(>16 kHz), 可以分为两个频率范围, 低频率高强度(16~100 kHz, 10~1000 W/cm)和高频率低强度(100 kHz~1 MHz, <1 W/cm)^[32]。高强度(低频)超声可用于物理或化学特性改变食物属性, 低强度(高频)超声提供关于食物的物理化学性质的信息^[33]。在肉制品生产中也常借助这种技术, 完成对原料肉的处理。低频率高场强超声可以通过“空化效应”产生机械、化学和热效应, 也可以通过形成局部瞬时高压和高温产生机械剪切和紊流。超声产生空化效应示意图如图 1^[34]所示。伴随着空化效应会有大量气泡生成, 气泡破裂产生的剪切力会破坏肉的组织结构, 进而破坏 Z 线和 M 线, 使肌动球蛋白的结构被破坏, 肌动球蛋白复合物溶解度显著提高。同时由于蛋白质结构的展开和疏水性氨基酸残基的暴露^[35]使肌原纤维蛋白表面疏水性增加, 蛋白质分子的氢键作用力、疏水相互作用和交联构象均发生变化^[36]。超声空化效应引起的蛋白质结构的展开导致总巯基含量下降, 活性巯基的含量增加^[37], 部分暴露的巯基被氧化成二硫键, 蛋白质二、三级结构被严重破坏, 从而提高了蛋白质的消化率。表 1 总结了超声波处理对肉制品消化产物中肉蛋白结构的影响。

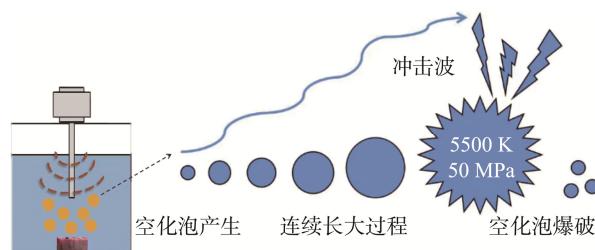


图 1 超声产生空化效应示意图^[34]

Fig.1 Diagrammatic sketch of cavitation effect produced by ultrasound^[34]

表 1 超声波处理对肉制品消化产物中肉蛋白结构的影响
Table 1 Effects of ultrasonic treatment on the structures of meat protein in meat digestive products

| 样品 | 超声频率/kHz | 超声强度/W | 超声时间/min | 微观变化 | 参考文献 |
|---------|----------|-----------------|------------------|---|------|
| 猪背最长肌 | 20 | 400 | 10 | 肌动球蛋白螺旋结构明显下降, 蛋白质中巯基含量增多, 消化率提高 | [37] |
| 鸡肉 | 20 | 350 | 5 | 肌原纤维碎裂, 胶原蛋白变性, 组织中内源酶释放 | [38] |
| 白牦牛背最长肌 | 20 | 0、200、400 和 600 | 13、26、40、53 和 66 | 肌凝蛋白结构特征改变, 巯基含量增加, α -螺旋向 β -薄片结构转变 | [39] |
| 鸡胸肉 | 20 | 300 | 5 | 溶酶体被破坏, 蛋白酶, 脂肪酶被释放, 肉蛋白质被分解 | [40] |

婴幼儿肉泥的消化率不足 60%, 远低于纯肉中蛋白质的消化率, LUO 等^[12]将猪里脊肉超声后制成婴幼儿肉泥, 发现肠期内肉泥消化率提高了 30%, 这有效解决了婴幼儿肉泥制品蛋白质利用率不充分的问题。程华峰等^[41]发现超声波结合蒸煮处理对中华绒螯蟹原肌球蛋白的降解具有明显的促进作用, 消化率显著提高。JIANG 等^[37]将猪背最长肌进行超声波处理, 后与对照组相比发现样品的胰酶消化率(除 0 d 为 89.30%外)显著增加。多项研究表明, 蛋白质的消化速度和程度取决于底物分子的结构特性, 这决定了可用于水解暴露位点和可用于裂解位点的数量, 以及消化酶与蛋白质裂解位点结合的容易程度^[42]。超声技术破坏了肌原纤维或肌原纤维与胶原纤维之间的间隙, 使消化酶与底物的接触面积增加, 提高了消化酶的可消化性, 同时也会诱导蛋白质构象发生改变, 导致酶裂解位点暴露, 从而提高蛋白质的消化率^[43]。

2.2 超高压辅助加工技术

超高压处理是肉类工业领域的一种绿色非热新兴加工技术。早期主要用来延长食品的保质期, 现已有研究表明它也可以显著改善凝胶型肉制品的质地性能和水分特性^[44]。肉类蛋白质对高压非常敏感, 高压通常会改变蛋白质的非共价键, 导致二级和三级结构的变化^[45]。而蛋白质构象或结构的变化可以提高肉类蛋白质的消化率^[46]。此外, 经高压处理后加热可促进肉类蛋白质形成凝胶网络, 导致蛋白质对胰蛋白酶和凝乳蛋白酶的敏感性增强, 体外消化率也随之提高^[9]。表 2 总结了超高压处理对肉制品消化产物中肉蛋白结构的影响。

超高压处理可通过影响蛋白质的微观结构进而影响肉蛋白的消化特性。李彩云等^[52]通过对牦牛肉进行不同压力程度的超高压处理, 发现经高压处理后牦牛肉肌红蛋白与胃蛋白酶之间的氢键由 3 个增加为 6 个, 肌红蛋白表面的疏水相互作用增大, 与胃蛋白酶的结合位点增多, 与未经高压处理的牦牛肉相比, 胃消化率提高了 9.46%。WANG 等^[53]对鸡胸肉肌原纤维蛋白溶液进行 200 MPa 高压处理,

发现超高压与低浓度氯化钙(<40 mmol/L)协同处理, 鸡胸肉的肌原纤维肿胀, 断裂并分散成短丝, 肌原纤维蛋白的溶解度增加, 并且肌凝蛋白构象被轻微破裂, 表面疏水性增加, 总巯基含量降低, 肌球蛋白的稳定性在更大程度上被破坏。JIA 等^[54]对猪肉进行不同压力水平的处理, 发现肌原蛋白、肌球蛋白和肌动蛋白由于压力诱导变性而使蛋白结构受到显著影响, 蛋白质与蛋白质之间的非共价交互作用被破坏, 蛋白组织间的连接变得松散, 蛋白酶的可结合位点增多, 能够显著提高肉蛋白的消化率。同时超高压力诱导蛋白质变性, 影响了肌原纤维蛋白的水结合位点, 从而影响蛋白质与水分子之间以竞争模式与水结合位点结合, 使得持水力增加。因此, 超高压技术主要通过影响蛋白质与蛋白质或蛋白质与水分子之间的作用模式来影响蛋白质的结构和相关的酶作用进而改变肉蛋白的消化行为, 提高肉蛋白的消化特性。

2.3 脉冲电场辅助加工技术

脉冲电场是一种新颖的非热技术, 在食品加工中有多种应用^[55]。其原理是通过放置在两个电极之间的食品材料之间施加电流, 引起电穿孔现象, 进而实现对食品组织结构的修饰。对肉制品的贮藏、软化及保水等方面有积极影响^[56]。脉冲电场处理通过破坏单个多肽链的静电相互作用和局部静电场和疏水相互作用, 以及二硫键或氢键, 使沿着蛋白质主干的电荷非均匀分布, 导致蛋白质分子沿着电场逐渐拉伸或变形, 诱导蛋白质展开, 从而破坏蛋白质的二级、三级结构, 导致 α -螺旋结构和 β -折叠结构的完全丢失^[57-58], 从而对蛋白质的消化产生积极的影响。表 3 介绍了脉冲电场对肉制品蛋白消化产物中肉蛋白结构的影响, 进而提高肉制品的消化率。

脉冲电场可以改变肌原纤维蛋白的结构, 提高肉制品的消化特性。有研究表明, 脉冲电场能够降低肉结缔组织的热稳定性, 可以将其应用于富含结缔组织的低值分割^[63]。同时, BHAT 等^[64]对鹿背最长肌进行电场强度(2.5 kV, 10 kV)和脉冲频率(50 Hz, 90 Hz)的脉冲电场处理, 研究脉冲电场对鹿

表 2 超高压处理对肉制品消化产物中肉蛋白结构的影响

Table 2 Effects of ultra-high pressure treatment on the structures of meat protein in meat digestive products

| 样品 | 超高压强度/MPa | 处理时间/min | 温度/°C | 应用效果 | 参考文献 |
|-----|-------------|----------|-------|--------------------------------|------|
| 牛里脊 | 800 | 10 | 20 | 肉蛋白被严重修饰, 部分肌原纤维和不溶性蛋白形成自由基 | [47] |
| 虾肉 | 200 | 5 | 4 | 肌原纤维蛋白氧化, 巯基含量下降, 表面疏水性显著上升 | [48] |
| 鱼肉糜 | 200 | 4 | 50 | 蛋白质展开, 二硫键增多, 疏水性增强 | [49] |
| 牛胸腰 | 200、400、600 | 20 | 20 | 肌肉蛋白溶解性增大, 亲水基团暴露 | [50] |
| 鸡胸肉 | 200 | 10 | | 表面黏度降低, 蛋白质溶解度增加, 肌球蛋白-水相互作用增强 | [51] |

表 3 脉冲电场对肉制品蛋白消化产物中肉蛋白结构的影响

Table 3 Effects of pulsed electric field on the structures of meat protein in meat protein digestion products

| 样品 | 脉冲频率/Hz | 脉冲强度/kV | 脉冲宽度/μs | 应用效果 | 参考文献 |
|--------|---------|---------|---------|--|------|
| 牛肉半膜肌 | 20、90 | 51、0 | 20 | 肌肉细胞中引起电穿孔效应, 膜通透性增加使蛋白酶更广泛地扩散到肌肉中, 导致更多的肌肉蛋白水解, 消化率显著增高 | [59] |
| 牛肉股二头肌 | 20、90 | 5、10 | 20 | 消化率明显增高, 肉蛋白(如肌球蛋白)对胃肠道蛋白酶(如胃蛋白酶)酶水解的敏感性增强 | [60] |
| 牛腰肉 | 200 | 2.5、10 | 20 | 牛肉肌肉纤维束伸长, 肉表面的水分增加, 超微结构改变, 松散 | [61] |
| 羊肉 | 90 | 1~1.4 | 20 | 促进冰晶形成和生长, 加速了结缔组织和刚性细胞的机械损伤, 有助于促进消化分解 | [62] |

背最长肌体外模拟消化蛋白质的影响。发现与对照组相比, 经脉冲电场处理后的样品胃肠道消化率显著较高, 尤其在肠消化阶段蛋白质发生了更多的酶解。十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)图也表明, 脉冲电场处理通过修改肉消化物的蛋白质剖面影响体外消化动力学。它使蛋白质和多肽在胃和肠道消化过程中得到更快、更多的消化。这些结果表明, 脉冲电场可通过诱导蛋白质变性和增强蛋白膜对肉蛋白胃蛋白酶和胰蛋白酶的通透性, 从而加快肉制品蛋白质的消化。

2.4 真空低温烹调辅助加工技术

真空低温烹调技术是采用真空密封包装、低温(100°C 以下)蒸煮使食物受热均匀^[65]的一种新型加工技术。诸多研究证明真空低温烹调具有节能环保、操作简单易行、能够最大限度地保留原料的风味和营养成分、能避免脂肪氧化带来的不良风味、增加产品的嫩度、获得最接近新鲜食材的品质等优点^[66]。低温处理通过引起胶原蛋白变性使结缔组织降解、削弱肌原纤维蛋白发生生化反应、使蛋白质水解和胶原溶解性增加^[67], 引起蛋白质构象变化和溶解度增高, 提高肉蛋白对消化蛋白酶酶解的敏感性。同时, 在 $55\sim60^{\circ}\text{C}$ 的真空烹饪温度下, 一些胶原酶是活跃的, 可以显著增加嫩度。在一定温度下真空烹饪也通过激活组织蛋

白酶 B 和 L、20S 蛋白酶体和 calpain-2 来影响肌纤维和胶原蛋白成分^[68], 游离氨基酸增多, 蛋白质的结构被改变, 从而提高肉制品的消化率^[69]。表 4 总结了真空低温蒸煮技术对肉制品消化产物中肉蛋白结构特性的影响。

低温真空蒸煮技术是一项温和安全有效的提高肉制品消化特性的技术, 但是对于不同种类的肉制品, 目前还没有一套系统的加热条件, 未来还需要探索确定各类肉制品最适消化率下的作用时间与温度。LATORRE 等^[74]对牛半腱肌进行 60°C 、不同时间的真空低温烹饪处理, 发现每毫克剩余胶原蛋白的总变性能随烹饪时间的增加略有增加, 韧性减小, 肉中肌内胶原蛋白的溶解率增加, 肌原纤维蛋白水解。并且随着加热时间的增加, 可溶性胶原蛋白的比例增加。SAYD 等^[75]对牛肉进行不同温度(55、70 和 90°C)和不同蒸煮时间(5、30 和 30 min)的处理, 观察煮熟牛肉的体外蛋白质消化率。结果发现, 70%以上的肽在肠腔室中被释放, 在 55°C 烹饪的肉类胰蛋白酶活性更强。在胃室中, 当肉在较低的温度煮熟时, 肌浆蛋白的解离更高, 这是由于在低温煮熟时, 肌浆蛋白中的肽在胃相释放, 提高了对肌浆蛋白的吸收。ZHANG 等^[76]将牛胶原蛋白在不同温度(60、70 和 80°C)和不同蒸煮时间(0.5、1.5 和 2.5 h)进行处理, 发现在 70°C 、0.5 h 显示较高的体外蛋白质消化率。因此, 不难发现, 进行合适的低温和时间控制, 真空低温烹饪技术可在提高肉制品消化率方面产生积极的作用。

表 4 真空低温蒸煮技术对肉制品消化产物中肉蛋白结构的影响

Table 4 Effects of vacuum low temperature cooking technology on the structures of meat protein in meat digestive products

| 样品 | 真空处理温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 真空时间/h | 应用效果 | 参考文献 |
|--------|----------------------------|---------|--|------|
| 牛肉半腱肌 | 60 | 4、5、10 | 样品的蛋白质消化率、可溶性蛋白消化率以及游离氨基酸和矿物质的释放显著提高 | [69] |
| 牛胸肉 | 70 | 0.5 | 牛胸肉肌原纤维结构严重破坏, 肌肉蛋白质分解的初始速率提高 | [70] |
| 老牛肱二头肌 | 65、75 | 1、8、18 | 胶原蛋白的溶解度呈线性增加, 结缔组织收缩, 肌纤维和结缔组织蛋白作用力减弱 | [71] |
| 鸡胸肉 | 65、75、85 | 2、6、14 | 巯基含量下降, 蛋白质的天然构象改变, 蛋白质间网络组织被破坏, 结构疏松 | [72] |
| 羊腰肉 | 60、70、80 | 6、12、24 | 羰基含量增加, 消化率相对提升 | [73] |

2.5 酶解技术

酶解技术就是利用酶的催化作用, 在反应过程中添加酶, 酶只对与特异结构的底物结合起作用^[77]的一种技术。这些消化酶如半胱氨酸蛋白酶、木瓜蛋白酶通过作用于主要的收缩蛋白—肌球蛋白, 将其释放降解, 同时刺激钙蛋白酶。钙蛋白酶可以降解肌原纤维中肌联蛋白和肌间线蛋白等维持肌原纤维完整性的主要蛋白, 弱化 Z 盘结构, 使 M 线消失、Z 线和 I 带断裂, H 区肿胀, 导致肌原纤维小片化, 蛋白质间的致密交联结构减弱, 蛋白质的溶解量比未经酶处理前增加, 暴露更多的消化酶结合位点^[34,71](图 2)。由于使用的酶种类不同, 作用的特异性也不一样, 对肉制品消化特性影响的因素也往往不一样, 但大多数主要是对肌原纤维蛋白具有活性。外源性蛋白酶还会降解肌肉中的肌原纤维蛋白和结缔组织蛋白^[78], 使酶对肉蛋白的消化敏感性提高。表 5 总结了利用酶解技术在肉制品消化特性

方面产生的积极影响。

目前利用酶解技术嫩化肉蛋白的研究很多, ZHU 等^[70]向牛胸肉中注射 5% 的 3 mg/mL 的商业铜系素提取液, 在 4°C 解冻 16 h 后进行处理。结果发现, 与未经铜系元素处理的样品相比, 肌肉的组织结构遭到严重破坏, 酶前处理通过分解肌纤维结构使真空烹调的牛胸肌更加柔软, 蛋白质在模拟胃条件下的消化率提高。LI 等^[84]对羊背最长肌注射不同浓度(0.05、0.10、0.15、0.20、0.25 g/L)的无花果素 20 mL, 结果发现, 0.10 g/L 无花果蛋白酶孵化减少了 80% 的肉硬度, 肌原纤维蛋白二级结构由有序到无序, 肉蛋白部分降解。尤其与高压处理相结合后, 在 1600~1700 cm⁻¹之间的酰胺 I 带, 发现 β -折叠较未处理组明显增加, 肌原纤维蛋白遭到破坏, 绵羊肉的嫩度提高。因此, 不难推断, 通过酶解技术作用于肌原纤维蛋白, 破坏肌肉蛋白质的结构, 对提高肉制品消化特性具有积极的作用。

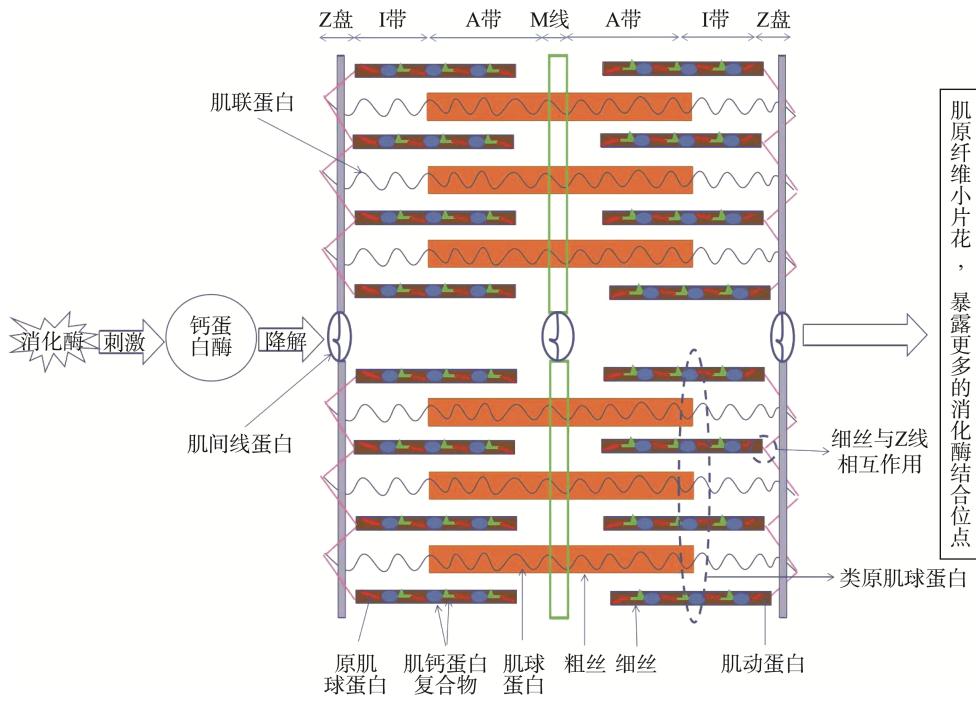


图 2 钙蛋白酶促进消化机制^[34]
Fig.2 Mechanism of calpain promoting digestion^[34]

表 5 利用酶解技术在肉制品消化特性方面产生的影响

Table 5 Effects of enzymatic hydrolysis on the digestive characteristics of meat products

| 样品 | 酶处理 | 温度/°C | 作用时间 | 酶含量 | 影响 | 参考文献 |
|-------|---------|-------|--------|-----------|--|------|
| 牛肉 | 木瓜蛋白酶 | 55 | 3 h | 1.0 mg/kg | 硬度下降, 肌原纤维结构受到破坏, 嫩度提高 | [79] |
| 鸭肉 | 菠萝蛋白酶 | 45 | 15 min | 350 U/g | 大分子蛋白被水解成小分子肽类和氨基酸, 鸭肉肌原纤维 Z 线断裂溶解 | [80] |
| 牛背最长肌 | 无花果蛋白酶 | 25 | 15 min | 5 U/g | 牛肉糜中游离氨基酸含量提高, 肌原纤维断裂 | [81] |
| 低脂牛排 | 猕猴桃铜系元素 | 373 | 13 d | 300 U/g | 添加猕猴桃蛋白酶体外消化蛋白质, 特别是肌 钙蛋白消化率提高了 15% | [82] |
| 鸡肉 | 葡萄糖氧化酶 | 37 | 42 d | 200 mg/kg | 随着其添加水平提高, 干物质、能量和粗 蛋白质的表观消化率提高 | [83] |

3 结语与展望

综上所述,脉冲电场、超高压和超声波等这些新型辅助加工技术通过在物理作用下破坏肉蛋白的结构完整性,降低肉蛋白质之间的共价相互作用,阻碍各蛋白之间形成致密的三维网络结构,并在食物老化过程中间接改善内源性蛋白酶,使生产的肉具有很好的消化酶活性。肉制品作为人们常食用的食物,具有优良的必需氨基酸组成、高蛋白质含量和高生物利用度。而由于一些特殊人群(婴幼儿,老年人)消化道不成熟或功能失调,肉类在胃肠阶段的消化延迟或整体消化率降低可能会发生。此外,食用未煮熟的肉类后,可能出现消化不良,例如过度加热,这可能导致各种健康问题。因此,提高肉制品的消化率在未来可以作为一种策略,以减轻或防止因营养摄入过量和不平衡而导致疾病的产生。

参考文献

- [1] ADHIKARI S, SCHOP M, DE BI, *et al.* Protein quality in perspective: A review of protein quality metrics and their applications [J]. Nutrients, 2022, 14(5): 1–31.
- [2] EUROPEAN FSA. Outcome of a public consultation on the draft scientific opinion of the EFSA panel on dietetic products, nutrition and allergies (NDA) on dietary reference values for protein [J]. EFSA Support Public, 2012, 9(2): 225–226.
- [3] MACKIE A, ALAN M. Insights and gaps on protein digestion [J]. Curr Opin Food Sci, 2020, 31: 96–101.
- [4] BHAT ZF, MORTON JD, BEKHIT A, *et al.* Non-thermal processing has an impact on the digestibility of the muscle proteins [J]. Crit Rev Food Sci, 2021, 62(28): 21–28.
- [5] PEREIRA PMDC, VICENTE AFDR. Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet [J]. Meat Sci, 2013, 93(3): 586–592.
- [6] OKUBO H, SASAKI S, MURAKAMI K, *et al.* The ratio of fish to meat in the diet is positively associated with favorable intake of food groups and nutrients among young Japanese women [J]. Nutr Res, 2011, 31(3): 169–177.
- [7] 叶姝. 补充蛋白质在人体运动中的应用[J]. 四川体育科学, 2020, 39(4): 36–38, 62.
- YE S. Application of protein supplementation in human sports [J]. Sichuan Sport Sci, 2020, 39(4): 36–38, 62.
- [8] LI Q, LIU H, JIANG S, *et al.* The effects of high pressure treatment on the structural and digestive properties of myoglobin [J]. Food Res Int, 2022, 156: 11193.
- [9] EKEZIE Flora-Glad Chizoba. 冷等离子体处理对凡纳滨对虾蛋白功能特性和致敏性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- EKEZIE FGC. Functionality and allergenicity response of king prawn (*Litopenaeus vannamei*) proteins following modification by cold plasma [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [10] BHAT ZF, MORTON JD, BEKHIT AEDA, *et al.* Emerging processing technologies for improved digestibility of muscle proteins [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 110: 226–239.
- [11] XUE S, WANG C, KIM YHB, *et al.* Application of high-pressure treatment improves the *in vitro* protein digestibility of gel-based meat product [J]. Food Chem, 2020, 306(C): 125602.
- [12] LUO M, SHAN K, ZHANG M, *et al.* Application of ultrasound treatment for improving the quality of infant meat puree [J]. Ultrason Sonochem, 2021, 80: 105831.
- [13] 祝超智, 陈画, 田玮, 等. 肉类蛋白质消化性影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 349–357.
- ZHU CZ, CHEN H, TIAN W, *et al.* A review of the factors influencing the digestibility of meat protein [J]. Food Sci, 2022, 43(21): 349–357.
- [14] LEE S, CHOI YS, JO K, *et al.* Improvement of meat protein digestibility in infants and the elderly [J]. Food Chem, 2021, 356: 129707.
- [15] YU P. Protein molecular structures, protein subfractions, and protein availability affected by heat processing: A review [J]. Amer J Biochem Biotech, 2007, 3(2): 210–220.
- [16] YU TY, MORTON JD, CLERENS S, *et al.* Cooking-induced protein modifications in meat [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2017, 16(1): 141–159.
- [17] FEIJIAN L, XIUPING D, SHIKE S, *et al.* Changes in the digestion properties and protein conformation of sturgeon myofibrillar protein treated by low temperature vacuum heating during *in vitro* digestion [J]. Food Funct, 2021, 12(15): 6981–6991.
- [18] KIM WJ, KIM SH, KANG DH. Thermal and non-thermal treatment effects on *staphylococcus aureus* biofilms formed at different temperatures and maturation periods [J]. Food Res Int, 2020, 137: 109432–109463.
- [19] SANTÉ LHV, ASTRUC T, MARINOVA P, *et al.* Effect of meat cooking on physicochemical state and *in vitro* digestibility of myofibrillar proteins [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(4): 1488–1494.
- [20] MARIE LB, LAURENT A, CLAUDE F, *et al.* Cooking temperature is a key determinant of *in vitro* meat protein digestion rate: Investigation of underlying mechanisms [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(10): 2569–2576.
- [21] ZHOU F, ZHAO M, CUI C, *et al.* Influence of linoleic acid-induced oxidative modifications on physicochemical changes and *in vitro* digestibility of porcine myofibrillar proteins [J]. LWT, 2015, 61(2): 414–421.
- [22] OSTERMEIER R, GIERSEMEHL P, SIEMER C, *et al.* Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions [J]. J Food Eng, 2018, 237: 110–117.
- [23] AIPING SS, HAUSER PC. Peptic and tryptic digestion of peptides and proteins monitored by capillary electrophoresis with contactless conductivity detection [J]. Anal Biochem, 2009, 387(2): 202–207.
- [24] MACFARLANE NG. Digestion and absorption [J]. Anaest Intens Care Med, 2018, 19(3): 125–127.
- [25] 李莹, 刘源, 张丹妮, 等. 传统与现代工艺金华火腿蛋白质的体外消化特性研究[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(1): 163–171.
- LI Y, LIU Y, ZHANG DN, *et al.* Study on *in vitro* digestibility of proteins from jinhua ham between traditional and modern processes [J]. J Nanjing Agric Univ, 2018, 41(4): 163–171.
- [26] 李雅萍, 李友元, 周新文, 等. 超声波辅助 Urea-Free 试剂结合热变性快速酶解蛋白质[J]. 分析化学, 2010, 38(5): 663–637.
- LI YP, LI YY, ZHOU XW, *et al.* Ultrasonic assisted urea-free reagent combined with thermal denaturation for rapid enzymatic hydrolysis of protein [J]. Anal Chem, 2010, 38(5): 663–637.
- [27] XINYU G, LAN Z, HUAZHEN Z, *et al.* The effects of various Chinese processing methods on the nutritional and safety properties of four kinds of meats [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2021, 70: 102674–102686.
- [28] ZHANG Y, BI Y, WANG Q, *et al.* Application of high pressure processing to improve digestibility, reduce allergenicity, and avoid protein oxidation

- in cod (*Gadus morhua*) [J]. *Food Chem*, 2019, 298: 125087.
- [29] LI Z, WANG J, ZHENG B, et al. Impact of combined ultrasound-microwave treatment on structural and functional properties of golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myofibrillar proteins and hydrolysates [J]. *Ultras Sonochem*, 2020, 65: 105063.
- [30] WANG K, LI Y, SUN J, et al. Synergistic effect of preheating and different power output high-intensity ultrasound on the physicochemical, structural, and gelling properties of myofibrillar protein from chicken wooden breast [J]. *Ultras Sonochem*, 2022, 86: 106030.
- [31] TANG L, YONGSAWATDIGUL J. Physicochemical properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) actomyosin subjected to high intensity ultrasound in low NaCl concentrations [J]. *Ultras Sonochem*, 2020, 63(C): 104922.
- [32] SORIA AC, VILLAMIEL M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2010, 21(7): 323–331.
- [33] HU H, LI-CHAN ECY, WAN L, et al. The effect of high intensity ultrasonic pre-treatment on the properties of soybean protein isolate gel induced by calcium sulfate [J]. *Food Hydrocolloid*, 2013, 32(2): 303–311.
- [34] LIU J, PUOLANNE E, ERTBJERG P. Temperature induced denaturation of myosin: Evidence of structural alterations of myosin subfragment-1 [J]. *Meat Sci*, 2014, 98(2): 124–128.
- [35] SHIKHA OK, GRANATO D, RAJURIA G, et al. Application of chemometrics to assess the influence of ultrasound frequency, *Lactobacillus sakei* culture and drying on beef jerky manufacture: Impact on amino acid profile, organic acids, texture and colour [J]. *Food Chem*, 2018, 239: 544–550.
- [36] 王颂萍, 王雪羽, 杨欣悦, 等. 超声波技术嫩化机理及其在肉制品中应用效果的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 423–431.
WANG SP, WANG XY, YANG XY, et al. Research progress on the mechanism of ultrasound tenderization and application effect in meat products [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(9): 423–431.
- [37] JIANG S, ZHAO D, NIAN Y, et al. Ultrasonic treatment increased functional properties and *in vitro* digestion of actomyosin complex during meat storage [J]. *Food Chem*, 2021, 352: 129398.
- [38] ZOU Y, SHI H, XU P, et al. Combined effect of ultrasound and sodium bicarbonate marination on chicken breast tenderness and its molecular mechanism [J]. *Ultras Sonochem*, 2019, 59: 104735.
- [39] GUO Z, GE X, YANG L, et al. Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure [J]. *Ultras Sonochem*, 2021, 70: 105345.
- [40] SHI H, ZHANG X, CHEN X, et al. How ultrasound combined with potassium alginate marination tenderizes old chicken breast meat: Possible mechanisms from tissue to protein [J]. *Food Chem*, 2020, 328: 127144.
- [41] 程华峰, 王福田, 朱亚军, 等. 不同热加工处理方式对中华绒螯蟹原肌球蛋白的消化稳定性和致敏性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8303–8311.
CHENG HF, WANG FT, ZHU YJ, et al. Effects of different thermal processing methods on digestibility and allergenicity of Chinese mitten crab, *eriocheir sinensis tropomyosin* [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(22): 8303–8311.
- [42] MACKIE A, MACIERZANKA A. Colloidal aspects of protein digestion [J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2010, 15(1): 102–108.
- [43] WANG B, MENG T, MA H, et al. Mechanism study of dual-frequency ultrasound assisted enzymolysis on rapeseed protein by immobilized alcalase [J]. *Ultras Sonochem*, 2016, 32: 307–313.
- [44] XUE S, WANG H, YANG H, et al. Effects of high-pressure treatments on water characteristics and juiciness of rabbit meat sausages: Role of microstructure and chemical interactions [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2017, 41: 150–159.
- [45] SANTOS MC, NUNES C, CAPPELLE J, et al. Effect of high pressure treatments on the physicochemical properties of a sulphur dioxide-free red wine [J]. *Food Chem*, 2013, 141(3): 2558–2566.
- [46] KAUR L, MAUDENS E, HAISMAN DR, et al. Microstructure and protein digestibility of beef: The effect of cooking conditions as used in stews and curries [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 55(2): 612–620.
- [47] BOLUMAR T, ANDERSEN ML, ORLIEN V. Mechanisms of radical formation in beef and chicken meat during high pressure processing evaluated by electron spin resonance detection and the addition of antioxidants [J]. *Food Chem*, 2014, 150: 422–428.
- [48] 石钢鹏, 周俊鹏, 章蔚, 等. 超高压与热烫预处理对克氏原螯虾肉冻藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 288–296, 322.
SHI GP, ZHOU JP, ZHANG W, et al. Effect of ultra-high pressure and blanching pretreatment on the quality of frozen *Procambarus clarkii* meat [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(15): 288–296, 322.
- [49] VARELA P, SALVADOR A, FISZMAN S. Changes in apple tissue with storage time: Rheological, textural and microstructural analyses [J]. *J Food Eng*, 2007, 78(2): 622–629.
- [50] MARCOS B, MULLEN AM. High pressure induced changes in beef muscle proteome: Correlation with quality parameters [J]. *Meat Sci*, 2014, 97(1): 11–20.
- [51] ZHOU Y, WANG Y, MA F, et al. Compensation of high-pressure processing for the solubility of sodium-reduced chicken breast myosin with three anion types of potassium salts [J]. *Poul Sci*, 2020, 99(3): 1717–1723.
- [52] 李彩云, 孙恒元, 华红新, 等. 超高压联合乳酸钙处理对牦牛肉品质及肌红蛋白消化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 3(21): 1–14.
LI CY, SUN HY, HUA HX, et al. Effects of ultra-high pressure combined with calcium lactate treatment on yak quality and myoglobin digestion [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 3(21): 1–14.
- [53] WANG Y, ZHOU Y, LI PJ, et al. Combined effect of CaCl₂ and high pressure processing on the solubility of chicken breast myofibrillar proteins under sodium-reduced conditions [J]. *Food Chem*, 2018, 269: 236–243.
- [54] JIA G, ORLIEN V, LIU H, et al. Effect of high pressure processing of pork (*Longissimus dorsi*) on changes of protein structure and water loss during frozen storage [J]. *LWT*, 2021, 135: 110084–110091.
- [55] BARBA FJ, KOUBAA M, DO PSL, et al. Mild processing applied to the inactivation of the main foodborne bacterial pathogens: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2017, 66: 20–35.
- [56] 赵宏蕾, 常婧瑶, 刘美月, 等. 基于清洁标签理念的新型加工技术在低磷肉制品中应用的研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 83–91.
ZHAO HL, CHANG JY, LIU MY, et al. Recent development in the application of novel processing technologies based on the clean label concept in low phosphate meat products [J]. *Meat Res*, 2021, 35(1): 83–91.
- [57] WEI JN, ZENG XA, TANG T, et al. Unfolding and nanotube formation of ovalbumin induced by pulsed electric field [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2018, 45: 249–254.
- [58] GITERO SG, O'EY I, ALI MA. Feasibility of using pulsed electric fields to modify biomacromolecules: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 72: 91–113.
- [59] BHAT ZF, MORTON JD, MASON SL, et al. Pulsed electric field

- improved protein digestion of beef during *in-vitro* gastrointestinal simulation [J]. LWT, 2019, 102: 45–51.
- [60] BHAT ZF, MORTON JD, MASON SL, et al. Pulsed electric field: Role in protein digestion of beef biceps femoris [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2018, 50: 132–138.
- [61] KHAN AA, RANDHAWA MA, CARNE A, et al. Effect of low and high pulsed electric field on the quality and nutritional minerals in cold boned beef *M. longissimus et lumborum* [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2017, 41: 135–143.
- [62] MA Q, HAMID N, OHEY I, et al. Effect of chilled and freezing pre-treatments prior to pulsed electric field processing on volatile profile and sensory attributes of cooked lamb meats [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2016, 37: 359–374.
- [63] 廖博群, 李昕炫, 王文琪, 等. 肉品物理嫩化技术研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(10): 64–72.
- LIAO BQ, LI XX, WANG WQ, et al. Advances in physical tenderization of meat [J]. Met Res, 2022, 36(10): 64–72.
- [64] BHAT ZF, MORTON JD, MASON SL, et al. Pulsed electric field: Effect on *in-vitro* simulated gastrointestinal protein digestion of deer *Longissimus dorsi* [J]. Food Res Int, 2019, 120: 793–799.
- [65] 胥钦, 乔宇, 汪莹, 等. 超高压结合真空低温烹调处理对鲈鱼品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 174–178.
- XU Q, QIAO Y, WANG Y, et al. Effect of high hydroelectric pressure combined with sous-vide treatment on quality of perches [J]. Food Ind, 2021, 42(6): 174–178.
- [66] 卜俊芝, 徐迅, 严利强, 等. 真空低温烹调技术在半成品食品加工中的应用及展望[J]. 四川旅游学院学报, 2020, 5: 14–17.
- BO JZ, XU X, YAN LQ, et al. Application and prospect of sous vide cooking techniques in the processing of half-finished foods [J]. J Sichuan Tourism Univ, 2020, 5: 14–17.
- [67] DOMINGUEZ HE, SALASEVICIENE A, ERTBJERG P. Low-temperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms [J]. Meat Sci, 2018, 143: 104–113.
- [68] ISMAIL I, HWANG YH, JOO ST. Interventions of two-stage thermal sous-vide cooking on the toughness of beef semitendinosus [J]. Meat Sci, 2019, 157: 107882.
- [69] BHAT ZF, MORTON JD, ZHANG X, et al. Sous-vide cooking improves the quality and *in-vitro* digestibility of semitendinosus from culled dairy cows [J]. Food Res Int, 2020, 127(C): 108708.
- [70] ZHU X, KAUR L, STAINCLIFFE M, et al. Actinin pretreatment and sous vide cooking of beef brisket: Effects on meat microstructure, texture and *in vitro* protein digestibility [J]. Meat Sci, 2018, 145: 256–265.
- [71] NAQVI ZB, CAMPBELL MA, LATIF S, et al. Improving tenderness and quality of *M. biceps femoris* from older cows through concentrate feeding, zingibain protease and sous vide cooking [J]. Meat Sci, 2021, 180: 108563.
- [72] 李梦琪, 孙思远, 刘敏, 等. 加热温度和时间对真空低温烹饪鸡胸肉脂肪与蛋白质氧化的影响[J]. 肉类研究, 2018, 32(10): 6–11.
- LI MQ, SUN SY, LIU M, et al. Effect of different temperature-time combinations on lipid and protein oxidation of sous-vide cooked chicken [J]. Meat Res, 2018, 32(10): 6–11.
- [73] ROLDAN M, ANTEQUERA T, ARMENTEROS M, et al. Effect of different temperature-time combinations on lipid and protein oxidation of sous-vide cooked lamb loins [J]. Food Chem, 2014, 149: 129–136.
- [74] LATORRE ME, PALACIO MI, VELÁZQUEZ DE, et al. Specific effects on strength and heat stability of intramuscular connective tissue during long time low temperature cooking [J]. Meat Sci, 2019, 153: 109–116.
- [75] SAYD T, CHAMBON C, SANTÉ-LHOUTELLIER V. Quantification of peptides released during *in vitro* digestion of cooked meat [J]. Food Chem, 2016, 197: 1311–1323.
- [76] ZHANG M, ZHAO D, ZHU S, et al. Overheating induced structural changes of type I collagen and impaired the protein digestibility [J]. Food Res Int, 2020, 134: 109225.
- [77] 杨军. 酶解技术改善绿茶浓缩液品质的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2018.
- YANG J. Study of improving the quality of green tea concentrate by enzymolysis technology [D]. Xiamen: Jimei University, 2018.
- [78] BHAT ZF, MORTON JD, MASON SL, et al. Role of calpain system in meat tenderness: A review [J]. Food Sci Hum Well, 2018, 7(3): 196–204.
- [79] 白玲燕. 木瓜蛋白酶处理对牛肉品质影响的研究[J]. 食品安全导刊, 2021, 26: 122–124.
- BAI LY. Effect of papain treatment on beef quality [J]. Chin Food Saf Magaz, 2021, 26: 122–124.
- [80] 赵立, 周振, 贺倩倩, 等. 超声波与菠萝蛋白酶协同作用对鸭肉嫩化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 93–100.
- ZHAO L, ZHOU Z, HE QQ, et al. Effect of ultrasonic-bromelain hydrolysis on tenderization of duck meat [J]. Food Sci, 2018, 39(12): 93–100.
- [81] 李琦, 贡佳欣, 唐善虎, 等. 无花果蛋白酶对牦牛肉糜理化和凝胶特性的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 161–166.
- LI Q, GONG JX, TANG SH, et al. Effect of ficin on physico-chemical and gelation properties of yak meat patties [J]. Food Sci Technol, 2020, 45(1): 161–166.
- [82] RUTHERFURD SM, MONTOYA CA, ZOU ML, et al. Effect of actinin from kiwifruit (*Actinidia deliciosa* cv. hayward) on the digestion of food proteins determined in the growing rat [J]. Food Chem, 2011, 129(4): 1681–1689.
- [83] 于会民, 王瑞生, 陈宝江, 等. 葡萄糖氧化酶及粪肠球菌对肉仔鸡生长性能、血液抗氧化指标及养分表观消化率的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(23): 60–64.
- YU HM, WANG RS, CHEN BJ, et al. Effects of glucose oxidase and *Enterococcus faecalis* on growth performance, serum antioxidant parameters and apparent digestibility of nutrients in broilers [J]. Chin J Anim Sci, 2016, 52(23): 60–64.
- [84] LI D, ZHANG H, MA L, et al. Effects of ficin, high pressure and their combination on quality attributes of post-rigor tan mutton [J]. LWT, 2021, 137: 110407.

(责任编辑: 张晓寒 郑丽)

作者简介



姚文晶, 硕士研究生, 主要研究方向为畜产品加工工程。

E-mail: yaowenjing2022@163.com



刘骞, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为畜产品加工工程。

E-mail: liuqian@neau.edu.cn