

超声技术对肌原纤维蛋白结构的影响及其在肌肉食品中的应用现状

张茸茸^{1,2}, 刘佳丽^{1,2}, 李亦凡^{1,2}, 张月美^{1,2*}, 曹锦轩^{1,2*}

(1. 北京工商大学老年营养与健康教育部重点实验室, 北京 100048;

2. 北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048)

摘 要: 近年来, 随着人们对食品加工技术的不断研究, 超声技术作为一种新型食品物理加工技术, 在肉制品加工应用中取得了显著的进展。本文综述了超声技术对肌肉组织和蛋白结构等微观品质的调控作用及其对肉制品品质构、色泽、风味、保水性等宏观品质的影响, 详细阐述了超声技术在不同肉制品加工工艺场景下超声技术的应用进展, 包括原料肉的解冻、嫩化、凝胶化和乳化特性的提升以及腌制剂的渗透、腥臭味的掩埋等方面。此外, 本文进一步探讨了超声技术与变压滚揉、腌制剂、微波、浸渍冷冻等其他技术的联合应用在改善肉制品加工品质方面的潜在作用, 为超声技术在肌肉食品加工领域的深层次应用提供了重要的理论参考。

关键词: 肌肉食品; 超声技术; 肌原纤维蛋白; 加工工艺; 宏观品质

Influence of ultrasound technology on the structure of myofibrillar proteins and its current applications in muscle-based food products

ZHANG Rong-Rong^{1,2}, LIU Jia-Li^{1,2}, LI Yi-Fan^{1,2}, ZHANG Yue-Mei^{1,2*}, CAO Jin-Xuan^{1,2*}

[1. Key Laboratory of Geriatric Nutrition and Health (Beijing Technology and Business University), Ministry of Education, Beijing 100048, China; 2. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China]

ABSTRACT: In recent years, with the continuous research on food processing technology, ultrasound technology, as a new type of food physical processing technology, has made significant progress in the application of meat product processing. This article provided an overview of the impact of ultrasound technology on the microstructural qualities of meat tissue proteins and its influence on the macroscopic qualities of meat products, including texture, color, flavor, and water-holding capacity, and discussed the progress of ultrasound technology applications in various meat processing scenarios, including thawing of raw meat, tenderization, gelation, and emulsification, as well as the penetration of marinades and the masking of undesirable odors. Furthermore, this article further explored the potential role of the combined application of ultrasound technology with other technologies such as variable pressure rolling, marinating agents, microwaves, immersion freezing, etc., in improving the quality of meat product

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201945)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32201945)

***通信作者:** 张月美, 博士, 副教授, 主要研究方向为畜产品蛋白质化学特性。E-mail: zhangyumei@btbu.edu.cn

曹锦轩, 博士, 教授, 主要研究方向为畜产品加工与资源功能化利用。E-mail: caojinxuan@btbu.edu.cn

***Corresponding author:** ZHANG Yue-Mei, Ph.D, Associate Professor, College of Beijing Technology and Business University. No.11, Fucheng Road, Haidian District, Beijing 100048, China. E-mail: zhangyumei@btbu.edu.cn

CAO Jin-Xuan, Ph.D, Professor, College of Beijing Technology and Business University. No.11, Fucheng Road, Haidian District, Beijing 100048, China. E-mail: caojinxuan@btbu.edu.cn

processing, providing important theoretical references for deep application of ultrasound technology in the field of muscle food processing.

KEY WORDS: muscle-based food products; ultrasound technology; myofibrillar proteins; processing techniques; macroscopic quality

0 引言

超声波是一种机械波,其频率高于人类可听到的声音范围,通常定义为超过 20 kHz 的声波。超声技术目前被视为是一种利用高频声波的新型物理非热加工技术,具备处理效率高、可控性好、非侵入性、分辨率高等多个优点^[1],其空化效应和机械效应常被应用于食品加工操作,例如,超声波通过产生快速移动的微气泡流,在临界尺寸时因高声压导致气泡破裂,即空化效应,从而产生高温和高压,且通常伴随着强烈的冲击波和微射流,进而对肌肉食品中的蛋白质产生影响^[2]。近年来,随着人们对食品品质的不断追求,超声技术备受食品工业领域的关注,目前已在超声提取、超声灭菌、超声干燥等领域取得诸多成果并得到广泛应用^[3-4]。肌肉食品加工行业在我国食品工业和农业领域占有重要地位。超声技术产生的空化效应和机械效应可以精确调控肌肉蛋白质的微观结构变化,从而显著影响肌肉食品的宏观口感和质地,进而改善其加工品质^[5]。研究发现,超声技术在辅助冷冻解冻、提升肌肉嫩化、改善凝胶乳化、掩埋肉制品腥味等方面具有显著的效果^[6]。另外,利用超声技术还可以有效抑制肉制品生物膜污染,在肉制品的高效灭菌方面也发挥了一定作用^[7]。同时,超声技术与变压滚揉、微波等其他技术的联合应用,有望显著提高肉制品的加工效率,并进一步改善肉制品品质。但需要注意的是,超声技术在调控肉制品品质时受到处理时间、超声功率等参数的影响,因此,明确不同参数下超声波处理对于肌肉蛋白质结构的影响及其在肌肉食品加工过程中的应用适用性显得尤为重要。本文主要综述了超声技术对肌肉组织与蛋白质结构的影响及调控作用,以及对肉制品加工工艺提升和宏观品质改善方面的应用进展,以期深入探讨超声技术在肌肉食品加工领域的应用提供理论依据。

1 超声技术对肌原纤维蛋白结构的影响

1.1 超声技术对肌球蛋白解离的影响

肌原纤维蛋白是组成动物肌肉中肌原纤维骨架结构的蛋白质,主要包括原肌球蛋白、肌球蛋白、肌动蛋白、肌球蛋白等。其中,肌球蛋白约占肌肉总蛋白质量的 35%左右,占肌原纤维蛋白的 45%左右,目前研究认为肌球蛋白是影响肌原纤维蛋白热凝胶形成特性的决定性蛋白质^[8]。超声处理对肌球蛋白的解离有一定影响。高强度

超声处理会改变肌球蛋白的构象,促使肌球蛋白由大分子聚合物解离为小分子蛋白。张靖铭等^[9]研究表明,超声技术中空化效应的产生会导致大量的能量被释放,同时产生强烈的剪切力,导致蛋白质构象变化,从而使肌球蛋白解离。在高强度超声处理条件下,超声诱导的空化现象促进瞬时自由基的产生,进而重组形成过氧化氢^[10],诱导肌球蛋白巯基发生过氧化氢氧化。此外,在超声波处理过程中,水分子可以产生大量高度活性自由基,导致与其他分子或活性基团发生反应,引起结构变化,促进肌球蛋白中疏水基团、巯基等功能性基团的暴露与氧化^[11]。不同高强度超声处理条件下,肌球蛋白的构象、二级结构和流变学特性会发生一定变化。谢亚如等^[12]研究表明,超声处理可以降低鲢鱼肌球蛋白的低温自组装程度,导致样品的剪切黏度逐渐降低,流动性增大;此外,超声处理还可以诱导肌球蛋白从天然 α -螺旋向较为松散的 β -折叠和无规卷曲结构转变,从而促使包埋在分子内部的活性基团暴露出来。高霞等^[13]研究发现,在不同浓度的盐环境下,使用高强度超声对鲢鱼肌球蛋白的理化性质有不同的影响。在低盐浓度下,超声能量主要用于破坏肌球蛋白聚集体,使聚集体的平均粒径和零剪切黏度明显降低,流动性增大;而在中、高盐浓度下,超声能量不仅可以破碎聚集体,使肌球蛋白分散均匀,还可以进一步诱导肌球蛋白的构象发生改变,促进部分活性基团的暴露,进一步提高肌球蛋白的溶解性。

经高强度超声处理后,肌球蛋白的构象发生改变,导致肌球蛋白由大分子聚合物逐渐解离为小分子蛋白。这一过程主要由超声波的剪切力和共振波动引起,这些力和波动能够破坏肌球蛋白分子间的静电作用力和氢键等化学键,促使肌球蛋白的分子构象发生变化^[8]。此外,超声波的能量也可以诱导局部的温度和压力变化,进一步破坏肌球蛋白聚合物的稳定结构,使其分解为小分子蛋白^[10]。研究发现,经超声处理的鹅胸肉肌球蛋白相较于对照组,其分子构象发生了显著的变化,表现为 ATPase 活性、粒径和流变性明显降低,Zeta 电位显著升高;此外,处理组肌球蛋白的组织蛋白酶 B、D、L、H 的活性也显著升高。在蛋白质表面微观结构上,经超声处理后的肌球蛋白出现了明显的变化,由完整且有序排列的结构变为破碎、无序的蛋白颗粒^[14]。这些发现揭示了超声处理对肌球蛋白分子结构的影响机制,为该方法在改善肌球蛋白的结构和性质方面的应用提供了理论基础。

1.2 超声技术对肌原纤维蛋白降解的影响

超声波处理过程中涉及的空化效应和机械效应可引发机械能、化学能与热作用等,通过改变畜禽蛋白的结构性质,对蛋白质分子之间的相互作用产生影响^[15]。经过超声波处理,具有天然有序结构的肌原纤维蛋白分子链倾向于转变为无序松散的伸展状态,导致分子间疏水键等非共价键力破坏,疏水基团暴露,表现为蛋白质的水合能力增强和溶解度提高,进而促进蛋白质的降解^[16]。刁小琴等^[17]研究表明,采用超声技术对猪肉肌原纤维蛋白进行改性处理,适度功率的超声处理可以促进肌原纤维蛋白伸展,蛋白分子粒径降低,以及蛋白质降解程度和溶解度提高。

然而,目前研究发现,超声波强度过高时会对肌原纤维蛋白的降解产生抑制效果。随着超声功率持续增加,肌原纤维蛋白分子的展开程度增强,同时导致疏水基团和疏基基团过度暴露,进而促进蛋白质分子聚集,肌原纤维蛋白降解受到抑制^[17]。WANG 等^[18]利用超声功率为 240 W 的超声波处理鸡肉肌原纤维蛋白时,当超声时间为 6 min 时,肌原纤维蛋白降解程度达到最大,然而,随超声时间的延长,蛋白质降解程度与溶解度均呈现逐渐下降的趋势。由此可见,适当时间和功率的超声处理能够促进肌原纤维蛋白伸展,对肌原纤维蛋白的降解有促进作用,而过度的超声处理则会抑制肌原纤维蛋白的降解效果。

1.3 超声技术对肌原纤维蛋白超微结构的影响

不同超声处理强度和时间对肌原纤维蛋白的超微结构产生差异化影响^[19]。李可等^[20]研究发现,随着超声波处理时间的延长(0~6 min), α -螺旋的相对含量显著降低, β -折叠、 β -转角和无规则卷曲相对含量显著增加,肌原纤维蛋白有序结构逐渐向无序结构转变。超声处理会使蛋白聚集程度发生改变。王子凌等^[21]研究表明,高强度超声处理会使小龙虾肌原纤维蛋白平均粒径和浊度显著降低,而溶解度、 ζ 电位的绝对值呈现先上升后下降的趋势。随着处理时间的延长,小龙虾肌原纤维蛋白的二级结构和三级结构均发生了改变,并且发生一定程度的变性现象。王静宇等^[22]研究表明,较未处理的肌原纤维蛋白热凝胶相比,经过 100 W 超声处理的蛋白凝胶网孔呈现减小的趋势,经 200 W 超声处理的凝胶网络呈现更加细致、分布均匀的特点,并呈现蜂窝状胶束,能较好地平衡蛋白分子间的相互作用。

然而,超声波强度过高或超声时间过长会促进肌原纤维蛋白聚集体形成。ZHOU 等^[23]研究表明,过度的超声处理会破坏使将蛋白质分子聚集在一起的一些物理作用力,从而释放出不可溶性蛋白质聚集体。LIU 等^[24]研究发现,适当(450 W)的超声处理有助于形成更加致密的蛋白质凝胶网络,而当超声强度增加到 600 W 时,观察到肌原纤维蛋白分子聚集体的出现及凝胶网络结构明显聚集的现象,这

可能与过度的超声处理诱导蛋白质解折叠释放出过量的疏水残基进而促进蛋白质分子间疏水相互作用有关。此外,在鸡肉肌动球蛋白和鱼肉肌原纤维蛋白的研究中同样观察到了类似的现象^[25-26]。目前研究结果表明肌原纤维蛋白在超声技术处理后,其超微结构会因超声波强度和时间的不同发生复杂的变化。因此,需要通过其他技术手段来进一步分析总结其结构变化规律,揭示反应机制。

2 超声技术在肉制品加工中的应用进展

2.1 原料肉的解冻

超声波解冻技术是利用肉品对超声波振动能的吸收,并将振动能转化为热能,从而使肉品内部温度升高进行快速解冻的一种新型技术。超声波解冻技术能够显著缩短解冻时间,具备高效快速且解冻稳定的特点,其不同肉制品加工工艺中的应用效果因品种而异。研究发现,超声波解冻较其他解冻方式对中国对虾的品质影响较小^[27],超声波在传播过程中会产生微射流和空化效应^[28],同时对虾内部组织吸收并转化为热能,实现内外同时解冻,进而加快解冻速率。此外,超声波解冻可以明显缩短冷冻羊肉的解冻时间,且对羊肉营养组分、脂肪酸组成和相对含量并未产生显著影响,但可能导致较多的汁液流失^[29]。在猪肉方面,超声解冻可以更好地保持冻融猪肉的物理、化学和微生物特性,使蛋白质构象的损伤最小化,有助于加热肌原纤维蛋白凝胶的形成^[30]。

然而,超声解冻技术存在一些缺点,如高功率要求、局部升温明显、能耗大及渗透性较差等^[31]。蔡路昀等^[32]采用超声解冻与其他解冻方式相结合的方式(超声微波解冻、超声远红外解冻、超声欧姆解冻、超声真空解冻和超声解冻等)。结果发现,不同处理的解冻损失率和蒸煮损失率差异显著($P<0.05$),超声微波解冻条件下海鲈鱼肉的解冻损失率和蒸煮损失率最低,分别为 1.52%和 13.13%,低场核磁结果显示超声微波解冻的样品中,细胞内水分向游离水迁移较少,说明超声微波解冻的鱼肉持水性较高,也提示超声微波解冻可以较好地解决超声解冻造成的汁液流失严重、持水力差、解冻损失率高等问题;超声真空解冻后肌原纤维束发生轻微卷曲,超声欧姆解冻和超声解冻后肌原纤维表面粗糙、结构疏松;而超声微波解冻和超声远红外解冻的海鲈鱼具有较高的热稳定性和黏弹性,且拥有更紧密光滑的微观结构,在蛋白的凝胶化、维持蛋白热稳定性中有较好的效果,可以解决超声解冻技术局部升温明显等问题。

2.2 原料肉的嫩化

超声技术是当前广泛应用的一种物理嫩化方法,其通过调节肌肉蛋白成分及其分子间作用力的变化,降低肌肉硬度,从而实现肉品嫩化的目的^[33]。超声波具备空化、机

械振动、击碎等特性, 在肉品嫩化中起主要作用的是其机械效应和空化效应特性^[34]。超声波的机械效应是超声波在介质中传播时所产生的振动效应, 这种振动引起细胞内部的振荡, 改变细胞膜的通透性及蛋白合成率, 同时破坏物质结构, 软化结缔组织等。空化效应是声波在介质中传播时, 介质因流动产生无数微小气泡的现象。这些气泡不断受到拉伸和压缩, 当负压达到一定强度时, 分子间距离超过极限值, 液体断裂, 形成近似真空的空洞, 从而破坏介质的结构完整性。当这些空洞在压缩时崩溃产生的瞬时高温高压环境会进一步破坏细胞及肌肉结构^[35]。宰后 24 h 的牛肉经超声波处理后, 肌原纤维被破碎, 碎片化指数显著增加, 保水力得到增强^[36]。经过一定条件的超声处理的河蚌肉, 其硬度显著降低, 更易于咀嚼^[37]。此外, 超声波还可以改变细胞膜的通透性或击碎细胞膜, 促进胞内酶的释放, 从而提高酶解速率^[38]。经过超声波处理后, 肌肉宰后成熟期缩短, 嫩化速率得到提升, 进而获得更好的嫩化效果^[39]。当处理羊肉的超声波功率在 $0.75\sim 3\text{ W/cm}^2$ 范围内时, 羊肉的剪切力和破碎指数迅速降低, 可以获得嫩化效果较好的羊肉。

2.3 肉糜类制品凝胶强度和乳化稳定性的提高

2.3.1 凝胶强度

以鱼糜为例, 超声处理通过改变鱼糜肌原纤维蛋白的二级结构及溶解度等理化性质, 进而影响热凝胶形成及凝胶强度。研究发现, 适当的超声处理强度和时间可以改善鱼糜凝胶性能, 但超声强度超过一定水平时, 鱼糜的凝胶强度随着超声强度的增加而增加^[40-41], 处理时间过长也会对鱼糜凝胶化造成不利影响^[42]。此外, 超声波对不同水分含量的鲢鱼糜凝胶性能的影响不同, 鲢鱼糜的水分含量越高, 超声改善效果越显著^[42-43]。超声对低等级的鱼糜如海水杂鱼糜类比对高等级的鱼糜如铜盆鱼的凝胶性能改善效果更好^[43]。低等级的海水鱼鱼糜结构中空洞多且不规则, 在样品中传播时超声波所受阻力相对较小, 更易于穿透, 促进凝胶化作用更明显。

2.3.2 乳化稳定性

适宜的超声波处理可以改变类苍白松软渗水(pale, soft, exudate, PSE)鸡肉肌原纤维蛋白的结构和理化性质, 提高肌原纤维蛋白乳液分散体系稳定性, 进而提高肉品的乳化稳定性; 增加超声波功率的处理可以有效增强类 PSE 鸡肉中肌原纤维蛋白在油-水界面的吸附作用, 从而改善其乳化性能^[44]。随着超声波功率的增加, 肌原纤维蛋白的乳化活性和乳化稳定性增加, 界面张力减小, 在微观结构上, 蛋白乳滴孔径呈现小而均匀的状态, 高功率超声波处理可以有效改善类 PSE 鸡肉肌原纤维蛋白的乳化稳定性, 进一步地拓宽了异质肉蛋白在食品工业中的应用范围^[45]。

2.4 腌制过程中腌制剂渗透的促进

目前, 腌制肉技术主要包括干腌法、湿腌法、混合腌制法和盐水注射腌制等方法^[46]。超声波处理可以加快肉品的腌制速度, 提升肉品嫩度和保水性等品质特性。其中, 超声波的空化效应可促进猪肉腌制过程中盐分渗透和扩散^[47-48]。研究发现, 超声波辅助腌制技术应用于不同种类和部位的原料肉时, 其氯化钠的渗透速度表现出明显差异^[49]。以山羊肉块为例, 在适当的参数下, 经过 3~5 min 的超声波水浴处理, 肉块的嫩化速率显著提高^[50]。JIN 等^[51]研究表明, 采用 315 W 的超声条件与 6% 的盐水结合对猪肉进行腌制, 相比于 3 d 的传统腌制, 超声辅助处理显著缩短了腌制时间, 推测与超声对肌原纤维蛋白结构的破坏作用有关。

2.5 肉制品腥臭味的掩埋

目前, 脱腥技术主要包括物理法、化学法、生物法和复合法等^[52]。物理脱腥技术一般包括超滤法、掩盖法、辐照法和微胶囊技术等。在超声波处理中, 其空化效应会抑制腥味物质与肌原纤维蛋白的结合, 从而加速腥味物质的去除过程^[53]。研究发现, 在采用超声+壳聚糖复合脱腥方法对牛肝脱腥时, 随着超声功率、时间和料液比的增加, 硫代巴比妥酸值和腥味值均呈先降低后增加的趋势, 超声功率过低或处理时间过短可能无法有效实现脱腥作用, 而过高的超声功率或处理时间过长容易导致水溶性蛋白溶出, 肉品营养价值降低^[52]。因此, 在应用超声技术脱腥时, 需要确定适宜的超声功率、时间和料液比, 以实现最佳的脱腥效果并保持肉品的营养价值。此外, 超声+壳聚糖复合脱腥方法处理的牛肝表现出最强的酯味和水果味, 以及最弱的青草味和异味, 未检出金属味, 这主要是因为超声过程中的空化效应与壳聚糖脱腥和脱脂作用相结合, 从而最大程度地改善了牛肝的整体风味。

3 超声技术对肉制品宏观品质的影响

3.1 超声技术对肉制品质构的影响

超声波所产生的机械效应和空化效应可引起肉制品内部肌肉蛋白成分及其分子间作用力的变化, 使牛肉肌纤维排列变得松散且不规则, 肌束间间隙增大, 肌肉结构逐渐松弛, 甚至可能导致细胞破裂, 肉制品内部蛋白质分子结构的改变最终可以对牛肉的质构特性造成影响^[54-55]。研究发现, 在 300 W 和 450 W 的超声功率下, 肌纤维的断裂程度相近, 而当功率达到 600 W 时, 肌纤维的断裂程度最大^[56]。与湿腌法和干腌法相比, 超声腌制后的煮制猪肉表现出较高的黏性、良好的内聚性、较低的硬度和咀嚼性, 并具有较低的剪切力, 研究人员推测, 在超声腌制的过程中, 更多的肌肉蛋白质渗出, 导致煮制后的猪肉结构更加致密, 从而提高了其黏度和内聚性^[57]。

肌原纤维蛋白断裂指数(myofibrillar fragmentation index, MFI)是用于衡量肌原纤维蛋白完整性的指标^[58]。研究表明,超声处理对牛肉 MFI 的影响与超声功率的大小密切相关,增加超声功率可以显著改善牛肉嫩度,这种改善效果与超声波的空化效应和机械作用密切相关。超声波可以产生强烈的剪切作用,短时间内对肌原纤维蛋白造成明显的损伤,导致其结构弱化、断裂,从而降低肉样的剪切力和硬度,增加蛋白质的溶解度,提高肉品的嫩度^[59]。因此,通过适当调节超声功率,可以实现对肉品嫩化效果的优化。

3.2 超声技术对肉制品色泽的影响

颜色是影响肉制品质量和消费者选择的重要指标之一。通过对腌制后肉制品的亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)进行研究对比,发现腌制处理可以改善肉制品的色泽属性。与湿腌法和干腌法相比,超声腌制显著提高了煮制猪肉的 $a^{*[60]}$ 。通常情况下,良好的牛肉干应具有较高的 L^* 和 a^* ,以及较低的 $b^{*[61]}$ 。牛肉在发酵过程中的颜色变化主要与肉干的含水量和肌红蛋白的氧化有关,有研究发现^[56],随着超声功率的增加,牛肉条与牛肉干的 L^* 和 a^* 呈上升趋势,并在 600 W 时达到最大($P<0.05$)。因此,超声腌制技术在改善肉制品的色泽方面具有潜力,可以作为一种有效的腌制方法。

3.3 超声技术对肉制品风味的影响

肉品中的风味物质主要是来源于风味前体物质在加工过程中经历一系列复杂的生化反应而生成,风味前体物质包括肽类、氨基酸类、糖类、核苷酸类、硫胺素及脂类,涉及到的生化反应主要包括肽和氨基酸的热降解、美拉德反应、焦糖化反应、硫胺素的热降解及脂类物质的氧化降解^[62]。

超声波的机械振动可以改变分子的构象和相互作用,从而影响风味物质的生成和释放。此外,超声波的作用还可能促进某些化学反应的进行,加速风味物质的形成。因此,超声波在肉品加工中的应用可以对风味前体物质的生成和品质产生显著影响。研究发现,随着超声时间的延长,挥发性风味物质烃类和酮类物质的相对含量逐渐增加,而醛类、醚类、酯类等物质的相对含量逐渐降低^[63]。醛类物质在肉制品的风味中具有重要的脂肪香味,且其阈值较低,因此醛类物质对肉制品的风味影响较大。超声处理可以增加醛类物质的含量,但过长的超声时间可能会导致醛类物质的挥发或流失^[64]。ZHOU 等^[65]研究发现,超声(1000 W)结合热处理(50℃)降低了干腌火腿中酸味物质的含量,提高了酯类物质的含量,因此显著改善了干腌火腿的整体风味。

需要注意的是,超声波处理条件对风味物质的影响是复杂而多样的,需要根据具体的处理过程和产品要求进行优化和控制,确保在有效改善风味的同时不破坏风味物质。同时,应综合考虑其他因素,如原料的特性、超声处理

的温度和功率等,以最大程度地提高肉制品的风味品质,并确保产品的稳定性和营养价值。此外,对超声波处理过程中风味物质的变化和生成机制还需要进一步深入地研究。

3.4 超声技术对肉制品保水性的影响

超声腌制在提高肉制品的保水性方面表现出良好的效果,具有较高的出品率和水分含量。研究发现^[66],与湿腌法和干腌法相比,超声腌制的煮制猪肉出品率和水分含量均达到最高值,这可能是由于超声处理增加了盐分的渗透性,使腌制液更加均匀地渗透到肉的孔隙中,进而提高了肌原纤维蛋白结构的内部溶胀和水分结合能力,因此降低了热加工过程中的水分流失,从而提高了肉制品的水分含量。低场核磁共振结果显示,超声腌制肉样中不易流动水的弛豫时间和比例显著高于其他腌制方式,这说明超声辅助湿腌技术能够进一步提高肉制品的保水性^[67]。氢质子密度图像显示的蓝色区域可以代表结合水含量,而红色区域一般代表不易流动水和自由水的含量^[68]。超声腌制的肉样红色区域面积最大,即具有最多的不易流动水和自由水区域,说明超声处理显著增强了肌肉蛋白的保水性^[67]。综上可知,超声腌制技术作为一种有效的腌制方法,在提高肉制品保水性方面具有显著优势,可以增加盐的渗透性,提高肌原纤维蛋白的水分结合能力,降低水分流失,从而实现较高的出品率和水分含量。这为生产高质量的肉制品提供了一种可行的技术手段。

4 超声与其他技术的联用在肉制品加工中的应用进展

4.1 变压滚揉

随着科技发展,超声波辅助变压滚揉作为一种新型腌制方法正逐步应用于肉制品加工中。样品在滚揉过程中进行真空滚揉和加压滚揉的交替,之后进行超声处理。通过不断重复上述步骤,可以改善肉制品在色泽、剪切力和腌制速率等多个方面的品质特性^[69]。目前研究发现,超声波与滚揉联用可以使水分更好的渗入肌肉细胞中,增强了肉制品的保水性,与传统滚揉和真空滚揉组相比,超声波辅助变压滚揉使得鸭肉的色泽得到了显著改善, L^* 增加, a^* 减小,这可能是由于在超声波、压强和滚揉的共同作用下,肌肉中残存血液迅速排出,血红蛋白含量降低,且肌红蛋白可以转化为高铁肌红蛋白。冯婷等^[70]研究表明,超声波联合变压滚揉技术应用于鸡肉腌制时,可有效降低鸡肉剪切力,并且腌制过程中的盐分吸收率在短时间内呈上升趋势,超声波辅助变压滚揉组的腌制吸收率在整个腌制过程中都高于常压滚揉组。研究人员推测,这可能与超声波辅助变压处理对肌肉细胞和胞内酶活性的影响有关。超声波辅助变压处理改善了肌肉细胞的渗透性,使腌制料能够迅

速均匀地分配到肌肉纤维的各个部位;此外,超声波处理改善了质量传输机制,提升了酶的活性,进而加快了肉制品的腌制速率^[70]。吴汉东等^[71]研究发现,在进行超声辅助变压滚揉时,无氧、加压等环境可以抑制肉中微生物的生长,这意味着超声波辅助变压滚揉技术不仅对腌制过程的效果有益,还有助于确保腌制过程中的食品安全性。综上所述可知,超声波联合变压滚揉技术在肉制品腌制中具有降低剪切力、提高盐分吸收率、加快腌制速率及抑制微生物生长等多重优势。

4.2 腌制剂

4.2.1 转谷氨酰胺酶

转谷氨酰胺酶(transglutaminase, TG)是一种能够催化蛋白质间酰基转移反应的酶。它能够促使蛋白质分子之间形成共价交联,从而改善肉制品的口感、组织结构、风味和营养成分,并能够阻止美拉德反应对氨基酸结构的破坏。在 TG 的作用下,肌肉蛋白质分子可以在酰基转移反应中与其他蛋白质或多肽链结合,形成交联网络结构,这种共价交联增加了肉制品的黏性和弹性,改善了口感和咀嚼性。同时,交联还能够改变肉的组织结构,使其更加紧实和稳定。超声技术与 TG 协同作用,使蛋白分子中疏水性残基暴露,有助于 TG 发挥催化作用,进而增强蛋白分子间的相互作用力,形成更加稳定的凝胶三维空间网络结构,提升蛋白质凝胶品质^[72]。目前研究发现^[73],当超声时间保持不变时,凝胶强度随着 TG 添加量的增加而增加,但在达到最高值后继续添加 TG 会降低凝胶强度;而当 TG 添加量保持不变时,凝胶强度受超声时间的变化影响,30 min 以上的长时间超声处理会降低凝胶强度;此外,当超声功率发生变化时,超声时间和 TG 添加量保持不变,凝胶强度会随着超声功率的增加而增加,但如果功率达到 300 W 以上时,则会降低凝胶强度。因此,应用超声结合 TG 协同处理技术时,需要综合考虑超声时间、功率和 TG 添加量,以实现最佳的凝胶强度和所需的肉制品品质。这些因素的优化可以通过实验研究和工艺调整来确定,以满足具体产品的要求。

4.2.2 木瓜蛋白酶

木瓜蛋白酶是一种在肉制品加工中常用的酶,它能够分解肌纤维,针对肌动球蛋白和胶原蛋白中的特定键进行酰基转移反应,进而将肌动球蛋白和胶原蛋白降解成较小的多肽分子,从而改变肌纤维的蛋白质结构^[74]。这种酶的作用能够破坏肌纤维之间的连接,降低肉的黏性和硬度,使其更容易咀嚼和消化,在肉制品的嫩化处理过程中发挥着重要作用。目前研究发现,超声波与木瓜蛋白酶的联合应用能够更好地改善肉制品的口感和质地。周丹等^[75]研究表明,超声波结合木瓜蛋白酶相比于单独使用木瓜蛋白酶,可以显著提高河蚌肉中的可溶性蛋白含量,并明显降低硬度、改善咀嚼性。潘治利等^[76]研究发现,相比于单独

使用木瓜蛋白酶,超声波与木瓜蛋白酶联合使用显著降低了鸡胸肉的剪切作用力,然而,如果超声功率过大,会导致木瓜蛋白酶失活,从而使剪切力上升、鸡胸肉嫩度下降。因此,在实际应用中,需要控制超声功率的大小,以实现最佳的嫩化效果。同时,根据具体产品 and 需求,可以调整超声波与木瓜蛋白酶的联合使用方式和条件,如中频超声、低频超声、更改超声介质、更改超声传播方式等,以达到所期望的改善效果。

4.2.3 钙离子

钙离子腌制剂通过与肉中的蛋白质相互作用,促进肌纤维的松弛和蛋白质的水合作用,从而实现嫩化效果,被广泛应用于肉制品的嫩化过程中。超声波联合钙离子腌制剂可以发挥协同作用,进一步提高肉制品的嫩化效果。万云飞^[77]研究发现,超声波与氯化钙联合应用,可以有效改善牛肉的嫩度、持水性和色泽。钙离子腌制剂可以改变肉组织的蛋白质结构,使其更易于受到超声波的作用,从而加速嫩化过程。此外,超声波的振动和剪切力也可以促进钙离子在肉组织中的扩散和作用,增强嫩化效果。这种联合处理可以在一定程度上改善肉制品的质地和口感,减少蒸煮损失率。

4.3 微波

近年来,超声波-微波协同联用技术在肌肉的快速解冻过程中得到了广泛应用。这种联合技术结合了超声波和微波的特点和优势,能够加快解冻速度、提高解冻均匀性,并改善肌肉的质地和口感。蔡路昀等^[32]对超声结合其他解冻方法(超声解冻、超声真空解冻、超声远红外解冻、超声欧姆解冻、超声微波解冻)进行对比。结果显示,超声微波解冻组在解冻损失率和蒸煮损失率方面明显低于其他 4 种方法,展现出较好的持水性,在微观结构方面,超声微波解冻技术能够更好地保持肌原纤维结构的整齐紧凑,且肌球蛋白的热稳定性没有影响。伊小丽^[78]研究发现超声波-微波辅助技术处理的河蚌肉的酶解效果最好,酶解液的蛋白分子量较小。

4.4 超声辅助浸渍冷冻

超声辅助浸渍冷冻是一种利用超声技术来促进浸渍和冷冻过程的方法。超声辅助浸渍冷冻可以有效缩短浸渍和冷冻时间,有助于提高生产效率,缩短制品的生产周期^[79-81]。超声辅助浸渍技术通过加速液体在肉制品中的渗透过程,帮助调味品更均匀地分布在肉制品中,提高产品的口感和风味。此外,超声波的机械作用能够破坏冰晶的形成,减少冷冻引起的细胞膜破裂和组织结构损伤,从而保持肉制品的质量和口感。张潮等^[79]研究发现,超声辅助冷冻对鸡胸肉中肌原纤维蛋白的乳化稳定性有积极影响。叶剑等^[80]通过比较不同冷冻方式发现,使用超声波的冷冻方法能够显著提升鲢鱼肉的冷冻速率和解冻后持水力,

有效降低其冻藏损失率。此外,吴宇桐等^[81]研究表明在适当的超声功率下,猪肉馅料在冻藏时的色泽、持水性等品质得到了显著提升。总的来说,超声辅助浸渍冷冻技术在肉品工业中展示出了非常广阔的应用前景。

5 结论与展望

超声技术有助于促进肌原纤维蛋白降解和肌球蛋白的解离,进而调控肌肉蛋白质的微观结构变化,导致蛋白网络结构的孔隙度增加、分子间交联断裂,从而影响肉制品的口感和质地。此外,超声技术在肉制品加工工艺中扮演着重要的角色,对肉制品的质构、色泽、风味和保水性等宏观品质具有积极的影响,展示出广阔的应用前景。在原料肉的解冻过程中,超声技术可以提高解冻速率并改善肉质的质地。在嫩化过程中,超声波的作用可以改善肉质的嫩度和口感。在凝胶乳化性能提升方面,超声技术可以改善凝胶的强度和稳定性,促进乳化过程中的脂肪分散。此外,超声技术还可以用于增强腌制剂的渗透性、掩埋腥臭味,以提高肉制品的风味和品质。近年来,超声技术与高压滚揉、腌制剂、微波、浸渍冷冻等其他技术在肉制品加工工艺中的联合应用进一步显著改善了肉制品的质地、口感和保水性能,提高了加工效率和产品品质。然而,需要注意的是,超声技术对肉制品品质的影响是复杂的,超声波的处理时间过长对鱼糜凝胶化、溶解度、蛋白质降解等产生不利影响。因此,在具体应用超声技术时,需要根据具体要求和食品加工的特点来进行合理的设计和控制,选择合适的超声参数,以避免对蛋白质结构和品质产生不可逆的损伤,最终达到理想的效果。当前对微波与超声联用的研究不够深入,在肉制品加工处理中超声-微波联用技术主要是应用于对肉制品的解冻处理,未来可以进一步探究超声-微波联用的其他协同效果,随着进一步的研究和技术改进,超声技术将继续为肉制品工业带来更多的创新和发展。

参考文献

- [1] 罗楚文,孔超颖,汤朝晖. 超声化学在生物医学中应用的研究进展[J]. 化学学报, 2023, 81(7): 836–842.
LUO CW, KONG CY, TANG CH. Research progress in sonochemistry for biomedical applications [J]. Acta Chim Sin, 2023, 81(7): 836–842.
- [2] 梁诗洋,张鹰,曾晓芳,等. 超声波技术在食品加工中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2022, 44(4): 462–467.
LIANG SY, ZHANG Y, ZENG XF, *et al.* Research progress on the application of ultrasound in food processing food [J]. Food Ind Sci Technol, 2022, 44(4): 462–467.
- [3] 马永强,张一鹏,王鑫,等. 复合酶协同超声提取黄精多糖及其降血脂活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(11): 99–109.
MA YQ, ZHANG YP, WANG X, *et al.* Optimization of extraction of polygonatum sibiricum polysaccharide by compound enzymes combined ultrasound and its hypolipidemic activity [J]. China Food Addit, 2023, 34(11): 99–109.
- [4] 王学成,伍振峰,徐诗军,等. 超声强化干燥技术与设备及其在中药领域应用的研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2022, 53(4): 446–453.
WANG XC, WU ZF, XU SJ, *et al.* Progress of ultrasound-enhanced drying technology and equipment and its application in traditional Chinese medicine [J]. Chin J Pharm, 2022, 53(4): 446–453.
- [5] HAIJING L, XUE B, YING L, *et al.* The positive contribution of ultrasound technology in muscle food key processing and its mechanism—A review [J]. Crit Rev Food Sci, 2022. DOI: 10.1080/10408398.2022.2153239
- [6] 黄荣秋,臧明伍,李海花,等. 超声波技术在肉品加工中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 431–439.
HUANG RQ, ZANG MW, LI HH, *et al.* Research advance of application of ultrasonic treatment in meat processing [J]. Food Ind Sci Technol, 2023, 44(20): 431–439.
- [7] 张婧男,刘昊天,陈倩,等. 超声技术抑制微生物生物膜污染: 机制、影响因素及其在肉及肉制品中的应用[J]. 肉类研究, 2021, 35(5): 50–59.
ZHANG JN, LIU HT, CHEN Q, *et al.* Inhibition of microbial biofilm contamination by ultrasonic technology: mechanism, influential factors and application to meat and meat products [J]. Meat Res, 2021, 35(5): 50–59.
- [8] 周银娜,魏相茹,张德权,等. 不同升温模式对北京鸭肉肌球蛋白热凝胶特性的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(6): 8–14.
ZHOU YN, WEI XR, ZHANG DQ, *et al.* Effects of different heating modes on gel properties of beijing duck myosin [J]. Meat Res, 2023, 37(6): 8–14.
- [9] 张靖铭,冯扬扬,时平茹,等. 谷氨酰胺转氨酶催化交联对肌原纤维蛋白凝胶特性影响的研究进展[J/OL]. 食品科学: 1–15. [2023-11-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230714.1122.042.html>
ZHANG JM, FENG YY, SHI PR, *et al.* Research progress on effect of transglutaminase included cross-linking on the gel properties of myofibrillar protein [J/OL]. Food Sci: 1–15. [2023-11-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230714.1122.042.html>
- [10] ARZENI C, PÉREZ OE, PILOSO AMR. Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound [J]. Food Hydrocolloid, 2012, 29(2): 308–316.
- [11] LIU R, LIU Q, XIONG S, *et al.* Effects of high intensity ultrasound on structural and physicochemical properties of myosin from silver carp [J]. Ultrason Sonochem, 2016, 37: 150–157.
- [12] 谢亚如,刘庆,熊善柏,等. 高强度超声作用下鲢鱼肌球蛋白的结构及流变学特性变化[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 77–84.
XIE YR, LIU Q, XIONG SB, *et al.* Effect of high intensity ultrasound on structural and rheological properties of myosin from silver carp [J]. Food Sci, 2019, 40(5): 77–84.
- [13] 高霞,谢亚如,胡杨,等. 高强度超声处理对不同盐浓度下鲢鱼肌球蛋白理化特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 67–73.
GAO X, XIE YR, HU Y, *et al.* Effect of high intensity ultrasound on structural and rheological properties of myosin from silver carp [J]. Food Sci, 2022, 43(7): 67–73.
- [14] 张坤,邹烨,王道营,等. 高强度超声处理对鹅胸肉肌球蛋白特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 59–65.
ZHANG K, ZOU Y, WANG DY, *et al.* Effect of high-intensity ultrasound on the characteristics of goose breast muscle actomyosin [J]. Food Sci, 2018, 39(21): 59–65.
- [15] 邹宇欣,谢静雯,王洪涛,等. 超声对动物蛋白结构及性质影响研究进展[J/OL]. 食品工业科技: 1–16. [2023-11-08]. <https://doi.org/10.13386/>

- j.issn1002-0306.2023060247
- ZOU YX, XIE JW, WANG HT, *et al.* Research progress on the effect of ultrasound on animal protein structure and properties [J/OL]. Food Ind Sci Technol: 1–16. [2023-11-08]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060247>
- [16] MAITY I, RASALE DB, DAS AK. Sonication induced peptide-appended bolaamphiphile hydrogels for in situ generation and catalytic activity of Pt nanoparticles [J]. Soft Matter, 2012, 8(19): 5301–5308.
- [17] 刁小琴, 关海宁, 乔秀丽, 等. 超声波处理对猪肉肌原纤维蛋白理化及乳化特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 26–30.
- DIAO XQ, GUAN HN, QIAO XL, *et al.* Effect of ultrasound on physicochemical and emulsifying properties of pork myofibrillar protein [J]. Food Mach, 2019, 35(4): 26–30.
- [18] WANG JY, YANG YL, TANG XZ, *et al.* Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar protein [J]. Ultrason Sonochem, 2017, 38: 225–233.
- [19] TANG L, YONGSAWATDIGUL J. Physicochemical properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) actomyosin subjected to high intensity ultrasound in low NaCl concentrations [J]. Ultrason Sonochem, 2020, 63: 104922.
- [20] 李可, 李三影, 扶磊, 等. 低频高强度超声波对鸡胸肉肌原纤维蛋白性质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 122–129.
- LI K, LI SY, FU L, *et al.* Effect of low-frequency and high-intensity ultrasound treatment on characteristics of chicken breast myofibrillar protein [J]. Food Sci, 2020, 41(23): 122–129.
- [21] 王子凌, 熊可心, 蒋景淳, 等. 高强度超声处理时间对克氏原螯虾肌原纤维蛋白理化性质的影响[J/OL]. 食品科学: 1–14. [2023-11-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230921.1327.032.html>
- WANG ZL, XIONG KX, JIANG JC, *et al.* Effect of high intensity ultrasonic treatment time on the physico-chemical properties of myofibrillar protein in *Procambarus clarkii* [J/OL]. Food Sci: 1–14. [2023-11-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230921.1327.032.html>
- [22] 王静宇, 杨玉玲, 周磊, 等. 超声波对肌原纤维蛋白理化和质构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 12–16.
- WANG JY, WANG YL, ZHOU L, *et al.* Effects of ultrasound on physicochemical and texture property in myofibrillar protein [J]. Food Ind Sci Technol, 2018, 39(11): 12–16.
- [23] ZHOU M, LIU J, ZHOU Y, *et al.* Effect of high intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of soybean glycinin at different ionic strengths [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2016, 34: 205–213.
- [24] LIU HT, HUAN Z, QIAN L, *et al.* Solubilization and stable dispersion of myofibrillar proteins in water through the destruction and inhibition of the assembly of filaments using high-intensity ultrasound [J]. Ultrason Sonochem, 2020, 67: 105160.
- [25] SALEEM R, AHMAD R. Effect of low frequency ultrasonication on biochemical and structural properties of chicken actomyosin [J]. Food Chem, 2016, 205: 43–51.
- [26] 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]. Ultrason Sonochem, 2020, 65: 105063.
- [27] 李慢, 马晓彬, 王文骏, 等. 解冻方式对中国对虾品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 182–190.
- LI M, MA XB, WANG WJ, *et al.* Effects of thawing methods on the quality of Chinese shrimp [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2019, 19(5): 182–190.
- [28] 王文超. 超声激励下空化冲击波效应及其流场特性分析[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- WANG WC. Analysis of cavitation shock wave effect and flow field characteristics under ultrasonic excitation [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [29] 杜鹏飞, 王维婷, 李孟孟, 等. 超声波解冻对羊肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(1): 39–44.
- DU PF, WANG WT, LI MM, *et al.* Effect of ultrasonic thawing on quality characteristics of frozen mutton [J]. Meat Res, 2020, 34(1): 39–44.
- [30] GAMBUTEANU C, ALEXE P. Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork *Longissimus dorsi* muscle [J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(4): 2130–2138.
- [31] 段欢欢, 王珂, 冯森. 新型解冻技术对肉类品质影响的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022, (20): 159–161.
- DUAN HH, WANG K, FENG S. Research progress on the effect of new thawing technology on meat quality [J]. China Food Saf Magaz, 2022, (20): 159–161.
- [32] 蔡路鸣, 许晴, 曹爱玲. 不同超声辅助解冻方式对海鲈鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 264–271.
- CAI LY, XU Q, CAO AIL. Effects of different ultrasound-assisted thawing methods on the quality of the sea bass [J]. Food Ind Sci Technol, 2020, 41(24): 264–271.
- [33] 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]. Food Ind Sci Technol, 2022, 43(9): 423–431.
- [34] 晋艳曦. 肉类嫩化新技术—声波嫩化[J]. 肉品卫生, 1999, (6): 24–25.
- JIN YX. A new technology for meat tenderization-Sonic tenderization [J]. Meat Hyg, 1999, (6): 24–25.
- [35] 张坤. 超声波处理对鹅胸肉嫩度及肌球蛋白特性的影响研究 [D]. 南京: 南京财经大学, 2018.
- ZHANG K. Effects of ultrasonic treatment on goose tenderness and actomyosin property [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2018.
- [36] STADNIK J, DOLATOWSKI ZJ, BARANOWSKA HM. Effect of ultrasound treatment on water holding properties and microstructure of beef (*M. semimembranosus*) during ageing [J]. LWT-Food Sci Technol, 2007, 41(10): 2151–2158.
- [37] 周丹. 河蚌肉不同嫩化方法及复合河蚌肉丸基础配方研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- ZHOU D. Tenderization methods of freshwater mussel and basic mussel meatball formula [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.
- [38] 尚军, 李来好, 吴燕燕, 等. 响应面法优化超声波辅助蛋白酶水解浦珠母贝肉的条件研究[J]. 食品科学, 2009, 30(18): 44–49.
- SHANG J, LI LH, WU YY, *et al.* Response surface methodology for the optimization of ultrasound-assisted enzymolysis conditions of *Pinctada martensii* muscle [J]. Food Sci, 2009, 30(18): 44–49.
- [39] 李正英, 陈锦屏, 陈忠军, 等. 羊肉超声波嫩化技术的研究[J]. 食品科学, 2006, (12): 413–416.
- LI ZY, CHEN JP, CHEN ZJ, *et al.* Study on ultrasonic technology to tender lamb meat [J]. Food Sci, 2006, (12): 413–416.

- [40] FAN D, HUANG L, LI B, *et al.* Acoustic intensity in ultrasound field and ultrasound-assisted gelling of surimi [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2017, 75: 497–504.
- [41] 姜昕, 陈晴, 田志航, 等. 超声时间对鲑鱼糜凝胶特性和蛋白结构的影响及相关性[J]. *水产学报*, 2023, 47(6): 165–175.
- JIANG X, CHEN Q, TIAN ZH, *et al.* Effect of ultrasonic time on gel properties and protein structure of Hypophthalmichthys molitrix surimi and correlation analysis [J]. *J Fish China*, 2023, 47(6): 165–175.
- [42] 李斌, 陈海琴, 赵建新, 等. 超声辅助凝胶化对鲑鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(6): 65–69.
- LI B, CHEN HQ, ZHAO JX, *et al.* Effect of ultrasound assisted gelling on gel properties of silver carp surimi [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 41(6): 65–69.
- [43] 李斌. 超声波场强的干预因素及对鱼糜凝胶特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- LI B. Factors acting on the acoustic field and the effects of ultrasound on the gel properties of surimi [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [44] LI K, FU L, ZHAO YY, *et al.* Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the emulsion [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 98: 105275.
- [45] 李可, 张俊霞, 王欣瑶, 等. 不同超声波功率处理对类PSE鸡肉肌原纤维蛋白结构和乳化稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(13): 23–31.
- LI K, ZHANG JX, WANG XY, *et al.* Effects of ultrasound treatment at different powers on the structure and emulsifying properties of PSE-like chicken myofibrillar protein [J]. *Food Sci*, 2023, 44(13): 23–31.
- [46] 杨文鹤, 刘策, 韩乃瑄, 等. 肉类腌制工艺安全性的研究进展[J]. *肉类工业*, 2022, (11): 39–45.
- YANG WH, LIU C, HAN NX, *et al.* Research progress on the safety of meat curing process[J]. *Meat Ind*, 2022, (11): 39–45.
- [47] 蔡华珍, 王珏, 梁启好. 超声波处理对咸肉腌制影响的初步研究[J]. *食品与发酵工业*, 2005, (12): 110–113.
- CAI HZ, WANG Y, LIANG QH. A primary study on the influence of ultrasound on curing processing of preserved pork [J]. *Food Ferment Ind*, 2005, (12): 110–113.
- [48] 李心悦, 曹涓泉, 徐静, 等. 超声波辅助腌制对猪肉糜食用品质及凝胶性能的影响[J]. *肉类研究*, 2022, 36(8): 21–28.
- LI XY, CAO JQ, XU J, *et al.* Effects of ultrasonic-assisted curing on eating quality and gel properties of minced pork [J]. *Meat Res*, 2022, 36(8): 21–28.
- [49] 王逸鑫, 吴涵, 黄海源, 等. 超声波辅助腌制对青鱼腌制品品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(22): 142–146, 160.
- WANG YX, WU H, HUANG HY, *et al.* Effect of ultrasonic-assisted pickling on the quality of black carp (*Mylopharyngodon piceus*) pickled products [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(22): 142–146, 160.
- [50] 李兰会, 张志胜, 李艳琴, 等. 超声波在羊肉嫩化中的应用研究[J]. *食品科学*, 2005, (4): 107–111.
- LI LH, ZHANG ZS, LI YQ, *et al.* Study on supersonic wave treatment on mutton tenderization [J]. *Food Sci*, 2005, (4): 107–111.
- [51] JIN GF, LIU YY, ZHANG Y, *et al.* Underlying formation mechanisms of ultrasound-assisted brined porcine meat: The role of physicochemical modification, myofiber fragmentation and histological organization [J]. *Ultrason Sonochem*, 2023, 94: 106318.
- [52] 罗进, 马玉琴, 余群力, 等. 牛肝不同脱腥方法比较及腥物质分析[J]. *食品与发酵工业*: 1–12. [2023-11-08]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033284>
- LUO J, MA YQ, YU QL, *et al.* Comparison of different deodorization methods for bovine liver and analysis of off-flavor substances [J]. *Food Ferment Ind*: 1–12. [2023-11-08]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033284>
- [53] 郑淳坚, 郑虹君, 林锐淇, 等. 小球藻食品破壁去腥及稳定性工艺的研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(7): 132–137.
- ZHENG CJ, ZHENG HJ, LIN RQ, *et al.* Research progress on *Chlorella* cell wall cracking, fishy smell eliminating and stability improving [J]. *China Food Addit*, 2021, 32(7): 132–137.
- [54] 蔡华珍, 戴泓宇, 陈建功, 等. 多频复合超声真空煮制对卤牛肉肌纤维结构及保水性的影响[J/OL]. *食品科学*: 1–10. [2023-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20230714.1128.048.html>
- CAI HZ, DAI HY, CHEN JG, *et al.* Effect of multifrequency composite ultrasonic vacuum cooking on the muscle fibers structure and water holding capacity of stewed marinated beef [J]. *Food Sci*: 1–10. [2023-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20230714.1128.048.html>
- [55] XIONG G, FU X, PAN D, *et al.* Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat [J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, 60(C): 104808.
- [56] 董智铭, 么紫瑶, 姜菽婉, 等. 超声功率对牛肉干品质及牛肉肌原纤维蛋白结构的影响[J]. *食品科学*: 1–12. [2023-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20230223.1023.002.html>
- DONG ZM, YAO ZY, JIANG QW, *et al.* Effects of ultrasonic power on the quality of beef jerky and the structure of beef myofibrillar proteins [J]. *Food Sci*: 1–12. [2023-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20230223.1023.002.html>
- [57] 黄瀚. 不同腌制方式对兔肉及其产品加工过程品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- HUANG H. Effect of different curing on the quality of rabbit meat and processing of rabbit steak [D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [58] MCDONAGH MB, FERNANDEZ C, ODDY VH. Hind-limb protein metabolism and calpain system activity influence post-mortem change in meat quality in lamb [J]. *Meat Sci*, 1999, 52(1): 9–18.
- [59] VILLAGRANA RAR, JIMENEZ HM, CARRAZCO SLJ, *et al.* High-intensity ultrasonication of rabbit carcasses: A first glance into a small-scale model to improve meat quality traits [J]. *Ital J Anim Sci*, 2020, 19(1): 544–550.
- [60] 张漫漫. 山黑猪叉烧肉工艺配方优化及产品加工中杂环胺抑制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- ZHANG MM. Study on the optimization of processing formula and heterocyclic amine inhibition of hill-black barbecued pork [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [61] POSTHUMA JA, RASMUSSEN FD, SULLIVAN GA. Effects of nitrite source, reducing agents, and holding time on color development in a cured meat model system [J]. *Meat Muscle Biol*, 2017, 1(3): 165–165.
- [62] 秦刚. 荣昌猪肉在不同烤制温度中挥发性风味物质的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- QIN G. Study on the aroma compounds of Rong-chang pork at different core temperature in processing [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [63] 周唯伊, 陆欣怡, 戴嘉宁, 等. 超声波辅助卤制雪山鸡的品质和风味分析[J]. *肉类研究*, 2021, 35(10): 33–40.
- ZHOU WY, LU XY, DAI JN, *et al.* Quality and flavor analysis of ultrasonic assisted stewed snow mountain chicken [J]. *Meat Res*, 2021,

- 35(10): 33–40.
- [64] ZOU Y, KANG D, LIU R, *et al.* Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef [J]. *Ultrason Sonochem*, 2018, 46: 36–45.
- [65] ZHOU C, XIA Q, HE J, *et al.* Improvement of ultrasound-assisted thermal treatment on organoleptic quality, rheological behavior and flavor of defective dry-cured ham [J]. *Food Sci*, 2021, 43: 101310.
- [66] 刘成花, 李顺, 张雅玮, 等. 低钠干腌肉加工过程中肌内结缔组织特性[J]. *食品科学*, 2018, 39(1): 91–98.
- LIU CH, LI S, ZHANG YW, *et al.* Characteristics of intramuscular connective tissue in low sodium dry-cured meat during processing [J]. *Food Sci*, 2018, 39(1): 91–98.
- [67] 宋玉, 郑健, 黄峰, 等. 不同腌制方式对煮制猪肉品质、组织形态和蛋白结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(23): 103–111.
- SONG Y, ZHENG J, HUANG F, *et al.* Effects of different salting methods on the quality traits, histomorphology and protein structure of cooked pork steaks [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2022, 43(23): 103–111.
- [68] 王策. 含氧气调包装对冷却肉持水性的影响机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- WANG C. The effect of different oxygen concentrations in modified atmosphere packaging on water holding capacity of chilled meat [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2018.
- [69] 李鹏, 孙京新, 冯婷, 等. 不同滚揉腌制对鸭肉蛋白及水分分布的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(10): 157–164.
- LI P, SUN JX, FENG T, *et al.* Effects of different kneading and salting on protein and water distribution of duck meat [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(10): 157–164.
- [70] 冯婷, 孙京新, 徐幸莲, 等. 超声波辅助变压滚揉对鸡肉腌制品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(5): 248–254.
- FENG T, SUN JX, XU XL, *et al.* Effect of vacuum-pressure alternating tumbling aided by ultrasonic waves on the quality of marinated chicken [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, 31(5): 248–254.
- [71] 吴汉东, 查恩辉. 变压滚揉腌制工艺对冷却猪肉中微生物的影响[J]. *食品工业*, 2011, 32(7): 10–11.
- WU HD, ZHA ENH. Effect of PSA roller rubbing salt technology on micro-organisms of cooling pork [J]. *Food Ind*, 2011, 32(7): 10–11.
- [72] 刘亚春. 猪肌原纤维蛋白改性及复合猪肉丸研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- LIU YC. Modification of porcine myofibrillar protein gel and study of compound pork meatballs [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.
- [73] 尹艺霖. 超声辅助 TG 酶处理对鲢鱼肌原纤维蛋白凝胶特性影响及应用研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- YIN YL. Effect of ultrasound assisted TG enzyme treatment on gel properties of myofibrillar protein from silver carp and its application [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.
- [74] 张琼, 邹强, 刘雨蝶. 木瓜蛋白酶参与传统家养禽类肉品加工的应用[J]. *中国调味品*, 2022, 47(9): 199–201.
- ZHANG Q, ZOU Q, LIU YD. Application of papain in the processing of traditional domestic livestock and poultry meat [J]. *China Cond*, 2022, 47(9): 199–201.
- [75] 周丹, 文连奎, 董周永, 等. 响应面试验优化超声波辅助木瓜蛋白酶嫩化河蚌肉工艺[J]. *食品科学*, 2016, 37(4): 62–67.
- ZHOU D, WEN LK, DONG ZY, *et al.* Optimization of ultrasound-assisted papain treatment for tenderization of freshwater mussel [J]. *Food Sci*, 2016, 37(4): 62–67.
- [76] 潘治利, 李航天, 雷萌萌, 等. 超声波联合木瓜蛋白酶处理对鸡胸肉嫩度的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(11): 162–167.
- PAN ZL, LI HT, LEI MM, *et al.* Effect of ultrasound combined with papain treatment on tenderness of chicken breast [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2021, 42(11): 162–167.
- [77] 万云飞. 超声与氯化钙联合处理影响牛肉超微结构与嫩度的机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- WAN YF. The Effect of ultrasound combined with calcium chloride on the ultrastructure and tenderness of beef [D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019.
- [78] 伊小丽. 超声波—微波辅助酶解河蚌肉制备调味料工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- YI XL. Study on the technology of preparing seasoning with mussel meat by ultrasound-microwave assisted hydrolysis [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [79] 张潮, 吴宇桐, 孔保华. 超声辅助冷冻对鸡胸肉肌原纤维蛋白乳化稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 104–110.
- ZHANG C, WU YT, KONG BH. Effect of ultrasound-assisted freezing on emulsifying stability of myofibrillar protein from chicken breast [J]. *Food Sci*, 2020, 41(17): 104–110.
- [80] 叶剑, 林胜利, 戴璐怡, 等. 超声辅助浸渍冷冻对鲢鱼肉品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(16): 5193–5199.
- YE J, LIN SL, DAI LY, *et al.* Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality in *Miichthys miiuy* [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(16): 5193–5199.
- [81] 吴宇桐, 张潮, 陈倩, 等. 超声辅助浸渍冷冻对冻藏期间猪肉水饺肉馅水分分布和品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(3): 128–135.
- WU YT, ZHANG C, CHEN Q, *et al.* Changes in quality and water distribution of pork dumpling filler subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during frozen storage [J]. *Food Sci*, 2021, 42(3): 128–135.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



张茸茸, 主要研究方向为畜产品蛋白质化学特性。

E-mail: zhangrr1374@163.com



张月美, 博士, 副教授, 主要研究方向为畜产品蛋白质化学特性。

E-mail: zhangyuemei@btbu.edu.cn



曹锦轩, 博士, 教授, 主要研究方向为畜产品加工与资源功能化利用。

E-mail: caojinxuan@btbu.edu.cn