

超声波辅助煮制对畜禽肉制品品质影响研究进展

刘 薇, 赵 赵, 朱文政, 沙文轩, 章海风, 周晓燕

Research Progress on the Effect of Ultrasonic Assisted Cooking on the Quality of Livestock and Poultry Meat Products

LIU Wei, ZHAO Zhao, ZHU Wenzheng, SHA Wenxuan, ZHANG Haifeng, and ZHOU Xiaoyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050059>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声波技术在肉制品腌制加工中的应用研究进展

Recent Advances in the Application of Ultrasonic Technology in the Curing of Meat Products

食品工业科技. 2021, 42(24): 445-453 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120001>

发酵温度波动对酸奶感官、质构和风味特性的影响

Effects of fermentation temperature fluctuation on sensory, texture and flavor characteristics of yogurt

食品工业科技. 2018, 39(4): 82-87 <https://doi.org/>

牡蛎酶解产物添加量对苏打饼干品质的影响

Effects of Oyster Hydrolysates on the Quality of Soda Biscuits

食品工业科技. 2020, 41(19): 26-32 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.19.005>

冷藏即食虾仁保藏期间品质变化

The change of quality during storage of shrimp in cold storage

食品工业科技. 2018, 39(9): 283-289 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.09.050>

畜禽宰后肌肉能量代谢与肉品质研究进展

Progress on Muscle Energy Metabolism and Meat Quality after the Slaughter of Livestock and Poultry

食品工业科技. 2020, 41(9): 357-361 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.09.057>

不同煮制时间对水煮鸡蛋质构及蛋黄脂质成分的影响

Effect of different cooking time on the textural profile and lipid composition of hard-boiled egg

食品工业科技. 2018, 39(6): 25-30, 37 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.06.005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘薇, 赵赵, 朱文政, 等. 超声波辅助煮制对畜禽肉制品品质影响研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 419–427. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050059

LIU Wei, ZHAO Zhao, ZHU Wenzheng, et al. Research Progress on the Effect of Ultrasonic Assisted Cooking on the Quality of Livestock and Poultry Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 419–427. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050059

· 专题综述 ·

超声波辅助煮制对畜禽肉制品 品质影响研究进展

刘 薇^{1,2,3}, 赵 赵¹, 朱文政^{1,2,3}, 沙文轩^{1,2,3}, 章海风^{1,2,3}, 周晓燕^{1,2,3,*}

(1.扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127;

2.江苏省淮扬菜产业化工程研究中心, 江苏扬州 225127;

3.中餐非遗技艺传承文化和旅游部重点实验室, 江苏扬州 225127)

摘 要:超声波对畜禽肉制品加工主要通过超声波产生的空化等作用, 使肉质结构、营养成分、风味物质等发生改变, 从而对其品质产生影响。超声辅助煮制作为新型煮制方式, 与传统煮制方式相比, 其高频率、高热量的优势可快速提高食物煮制效果, 短时间内达到并优于传统长时煮制的效果。本文立足于超声辅助煮制, 结合国内外研究进展, 论述超声辅助煮制对畜禽肉制品品质的影响, 为畜禽肉制品后续工业化生产提供一定的理论基础, 在未来食品生产加工新方向中起到积极的引导作用。

关键词:超声辅助煮制, 畜禽肉制品, 质构, 嫩度, 风味

中图分类号: TS251.55

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)07-0419-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050059



本文网刊:

Research Progress on the Effect of Ultrasonic Assisted Cooking on the Quality of Livestock and Poultry Meat Products

LIU Wei^{1,2,3}, ZHAO Zhao¹, ZHU Wenzheng^{1,2,3}, SHA Wenxuan^{1,2,3}, ZHANG Haifeng^{1,2,3}, ZHOU Xiaoyan^{1,2,3,*}

(1. Tourism and Culinary Institute, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. Huaiyang Cuisine Industrialization Engineering Research Center of Jiangsu Province, Yangzhou 225127, China;

3. Key Laboratory of Chinese Cuisine Intangible Cultural Heritage Technology Inheritance, Ministry of Culture and Tourism, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Ultrasound on livestock and poultry meat products processing mainly through ultrasound generated cavitation and other effects, so that the meat structure, nutrients, flavour substances and other changes, so as to have an impact on its quality. A new technique for cooking is ultrasonic assistance. When compared to the traditional way of cooking, its benefits of high frequency and high calories can quickly enhance the efficiency of food preparation, achieving greater results than the traditional long-term cooking effect in a short period of time. This study analyzes the function of ultrasonic assisted cooking in the quality processing of livestock and poultry meat products based on ultrasonic assisted cooking and integrated with the research development at home and abroad. It serves as a theoretical underpinning for the subsequent industrial production and healthy diet of food cattle and poultry meat products, and contributes positively to the future direction of food production and processing.

Key words: ultrasonic assisted cooking; livestock and poultry meat products; texture; tenderness; flavor

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 扬州市-扬州大学市校合作共建创新科技平台项目 (YZ2020267); 烹饪科学四川省高等学校重点实验室资助项目 (PRKX2020Z06); 四川省哲学社会科学重点研究基地川菜发展研究中心课题 (CC20G03)。

作者简介: 刘薇 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 营养与食品卫生学, E-mail: 1274408817@qq.com。

* 通信作者: 周晓燕 (1964-), 男, 本科, 教授, 研究方向: 烹饪科学与工程研究, E-mail: yzuxyz@163.com。

针对畜禽肉制品,传统的煮制加工技术主要是将其置于锅中,以水为传热介质,通过热传导,传递热能给肉质本身^[1],使其有效营养成分(可溶性蛋白、脂质、矿物质等)、风味成分(氨基酸、脂肪酸、多肽)溶解在水中,一般用于熬煮高汤、煮熟食物。传统的煮制方式有常压煮制、高压煮制等,其在炖煮过程中主要利用水分子沸腾传递热能,破坏原料分子间的结构,但想达到滋味浓郁、肉质软烂却需要长时间煮制,耗时长、能耗大^[2]。而在新时代背景下,“方便”、“快捷”这些关键词愈加成为人们青睐的对象,因此方便快捷的新型煮制技术逐渐涌现。

超声作为一种新型绿色加工技术^[3],其在各方面都发展迅速。目前在食品方面的应用主要有嫩化、腌制、杀菌、煮制、解冻等。与传统加工技术相比,超声辅助具有高频率、高速度、高能量等优点^[4]。超声辅助煮制作为其中发展的一个支点,其主要利用超声波的空化作用、机械效应及热效应,使食物在短时间内通过高频率、高能量、高振荡快速达到传统炖煮方式下滋味丰富、肉质软烂的效果,并进一步缩短炖煮时间。超声辅助煮制畜禽肉制品,利用声耦作用于肉质,破坏其肌肉结构^[2],显著提高肉质嫩度,其无损、快捷、高效、低廉的优点,显著改善了肉的质地和质量^[5],受到了研究学者的关注与热爱。本文针对超声波辅助煮制对畜禽制品品质的影响进行了详细论述,为超声波辅助煮制在畜禽肉制品加工中的应用研究提供理论依据。

1 超声波简介

1.1 超声波的定义

超声波是指高于 20 kHz 的人类可听频率范围之外的声波,其按照频段范围、强度大小可分为低强度高频率超声波(功率强度 $<1\text{ W/cm}^2$ 、频率 100 kHz~1 MHz)和高强度低频率超声波(功率强度 $>10\text{ W/cm}^2$ 、频率 20~100 kHz)^[6-7]。

1.2 超声波辅助煮制的作用原理

超声波辅助煮制主要是利用超声波在液体(水)传播过程中对受热食物产生作用,使食物结构中的小分子在高频振荡下发生变化,其作用机理主要是超声波的空化作用、热效应及机械效应三大方面。

1.2.1 空化作用 超声波空化作用,是超声波和液体二者之间产生的主动力,是指在超声波振动的作用下,液体中产生微小气泡在到达一定程度值之后,气泡膨胀、紧闭、破裂,同时产生冲击波,这一系列过程称为空化^[8]。空化作用产生的气泡在爆裂时可产生短暂瞬间的高温高压,威力可达 5500 K, 50 MPa。图 1 为空化作用的形成过程^[9]。在空化作用发生的过程中引起的一系列物理、化学反应,可对食品质量、能量传输、结构变化发生改变,在食品加工中有利于生产时间的缩短、质量的提升^[10-11]。空化作用在食品加工业中应用较为广泛,有学者研究表明超声波在液体中产生的空化作用可使小分子之间发生激

烈碰撞,从而使水分子裂解,产生具有较强氧化性的羟基自由基,促进食物中的蛋白质、脂质氧化^[12];空化与热效应产生的高温高压,可使游离氨基酸、核苷酸更易降解,从而对煮制食物的风味产生显著影响。空化在冷冻中可以促使冻品与冷冻剂之间的能量交换,强化冻结过程^[13];与传统方法相比,空化可促进脂肪油水解,使其利用率升高^[14];此外,空化还可提高并改善糖液的脱色率,提高精纯度^[15-16]。

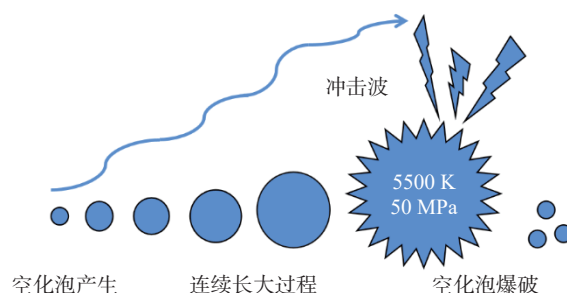


图 1 超声空化作用形成过程图

Fig.1 The diagram of ultrasonic cavitation formation process

1.2.2 热效应 热效应是指超声波利用介质传播,传播介质不断吸收热量,使自身温度升高的现象^[17]。介质在具有巨大能量的超声作用下,高频率振荡,产生大量热能^[18]。热效应一般在食品加工中可用于冷冻食物的解冻,在冻品的肌肉组织中包含一部分液态^[19],有学者研究表明在超声解冻中,超声波对已冻结范围的吸收作用要远超出未冻结的数十倍^[20],且解冻速度快,对产品质量起到积极的改善保持作用^[21],与传统解冻方式相比,超声对食品的蒸煮损失、剪切力值等变化可起到良好的改善作用^[22]。因此,利用超声波可以促进热量传输、交换的这一特点,选择合适的超声功率和超声频率,食品工业可以实现快速解冻并改善肉品品质的目的^[23]。在超声辅助煮制应用中,超声波热效应产生的高热能使氨基酸热降解,同时与还原糖产生美拉德反应,促进风味物质的产生。

1.2.3 机械效应 超声波的机械效应是指当超声波作用于传输介质时,传输介质中的粒子会产生强烈的振动,因此可以加强粒子在介质中的运动和传质过程,从而导致粒子位移、振动速度、加速度和声压的变化^[24-25]。机械效应在食品工业中主要应用于超声波嫩化、超声波清洗、超声波提取中,其可促进固体体的分散与乳化,对超声提取起着高效率并且稳定的作用^[26]。超声波处理不仅可以破坏肌原纤维的结构,还可以促进肌原纤维中内源性蛋白酶的释放,增强内源性蛋白酶的活性,改善肌肉的嫩度^[27-28]。在辅助煮制中,正是由于这一作用使肌纤维之间的缝隙增大,促进呈味物质溶出,同时也使调味品的滋味有效渗入,增加滋味。

2 超声波辅助煮制对畜禽肉制品品质的影响

2.1 超声波辅助煮制对畜禽肉制品色泽的影响

色泽是食品的基本物理特征,是消费者直观肉

眼可见的感官特征体现。颜色与食品的物理、化学、感官具有相关性^[29],它一般作为消费者判断食物是否新鲜、可食的评价标准,在肉品中,色泽的变化主要是取决于组织结构中肌肉肌红蛋白、血红蛋白的含量^[30]。此外,也有消费者认为食品色泽与食品是否嫩滑、安全、具有良好风味、具有良好营养价值等存在一定关系^[31]。表 1 为超声辅助煮制技术对畜禽肉制品色泽特性影响的相关研究结果。

超声波对畜禽肉制品的色泽影响较为复杂,影响因素主要包括食品的种类^[37]、超声强度^[38]、超声时间以及加工程度^[39]等。其基本原理则是超声处理对食品中 Mb(Fe²⁺)、MbO₂(Fe²⁺)、MetMb(Fe³⁺)的比例产生影响^[40],以及对这三种肌红蛋白的相对含量起到增减作用,从而影响其色泽。ESMERALDA 等^[41]通过研究高强度超声对贮藏后牛肉的物理、微观结构和感官特性的影响,发现超声处理后,牛肉 *L**值增加,*a**值降低,*b**值倾向黄橙色。由表 1 可知,陈胜^[33]在研究不同功率超声煮制对盐焗鸡的影响时,发现超声可降低 *a**值、*b**值,主要是由于空化效应对脂肪层

的氧化,使脂肪细胞破裂,油脂分散,脂肪含量降低,进而影响其色泽。刘功明等^[34]研究认为超声产生的空化作用使肉质组织层松散,水分子进入,色素流出,可对鸡肉肉质的亮度值 *L**值起到提升作用,并降低 *a**值和 *b**值,使肉质色泽明亮。ALVES 等^[42]在研究超声波不同处理时间(0、60、120 和 240 s)对牛半腱肌的理化性质时却发现,超声处理的牛肉没有产生明显的色泽变化。这可能是由于超声波产生的热量不足以使蛋白质和色素变性原因引起^[43]。但综合因素下,适宜的超声条件对食品色泽并无负面影响,还有可能带来积极作用。

2.2 超声波辅助煮制对畜禽肉制品质构特性的影响

1926 年, WARNER 发明了用于测量肉制品质构的仪器,人类对其测量从模糊感官发展到仪器化精准测量。此后随着计算机时代的迅速发展,质构的测量更加精准、迅速^[44]。食品中用来衡量产品的质构特性一般有几大指标,分别是硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性等。超声辅助煮制对畜禽肉制品质构特性影响的相关研究详情见表 2。

表 1 超声辅助煮制对畜禽肉制品色泽的影响

Table 1 Effect of ultrasound-assisted cooking on the colour of livestock and poultry meat products			
名称	工艺参数	色泽	参考文献
卤鸡	功率300 W; 频率20 kHz; 时间0、30、60、90、120 min	随着超声时间的延长, <i>L</i> *值先下降后上升,且在90 min时 <i>L</i> *值降至最低; 超声0~60 min内 <i>a</i> *值和 <i>b</i> *值显著上升,60 min后二者显著下降; 超声波的空化效应降低 <i>L</i> *值。	周唯伊 ^[32]
盐焗鸡	超声温度85 ℃; 频率20 kHz; 功率0、200、400、600、800、1000 W	超声波辅助煮制促进了盐焗鸡皮下脂肪氧化,油脂的分散,降低了皮下脂肪含量,而致 <i>a</i> 值和 <i>b</i> 值显著降低,并且随着超声功率的增大, <i>a</i> 值和 <i>b</i> 值也逐渐降低。	陈胜 ^[33]
鸡胸肉	功率300 W; 频率40 kHz; 温度80 ℃; 超声时间25 min	超声提高了鸡胸肉 <i>L</i> *值,降低了 <i>a</i> *值和 <i>b</i> *值,使肉色更为鲜亮; 超声使含水量增加, <i>b</i> *值和 <i>a</i> *值降低。	刘功明等 ^[34]
鸭心	功率300 W; 频率40 kHz; 温度80 ℃; 时间25 min	超声波处理使 <i>L</i> *值,亮度增加,降低 <i>a</i> *值、 <i>b</i> *值,肉质颜色明亮。	王雪梅等 ^[35]
蛋黄	功率160 W; 温度80 ℃; 时间40 min	超声辅助煮熟的蛋黄其 <i>a</i> *值、 <i>b</i> *值显著增加和 <i>L</i> *值显著减少。	WANG等 ^[36]

表 2 超声辅助煮制对畜禽肉制品质构特性的影响

Table 2 Effect of ultrasound-assisted cooking on the textural properties of livestock and poultry meat products			
名称	工艺参数	质构特性	参考文献
卤鸡	功率300 W; 频率20 kHz; 煮沸后,中心温度70、60 ℃恒温煮制; 时间0、30、60、90、120 min	硬度、咀嚼性、弹性、胶黏性与超声时间呈负相关; 超声时间的加长,粘附性先下降,而后上升,30 min时最低。	周唯伊等 ^[32]
盐焗鸡	超声温度85 ℃; 频率20 kHz; 功率0、200、400、600、800、1000 W	600 W时,盐焗鸡硬度和咀嚼性与功率呈负相关; 低功率对质构无明显影响,而较高功率下可提高鸡肉的质构特性,使其硬度、咀嚼性降低。	陈胜 ^[33]
猪五花肉	频率40 kHz; 功率250 W; 温度85 ℃; 炖煮2 h	脂肪层和肌肉层大部分质构特性无显著相关性,但脂肪和肌肉的弹性变化呈显著正相关。	雷辰 ^[45]
牛肉	频率20 kHz; 功率0、400、600、800、1000 W; 时间80、100、120 min	与对照组相比,当煮制时间为80 min时,超声波处理可以使酱卤牛肉的硬度显著升高; 不同超声功率之间差异不显著; 当煮制时间为120 min时,超声波处理使样品硬度以及咀嚼性显著低于对照组; 超声波处理对样品的弹性以及恢复性影响不大。	邹云鹤 ^[18]
卤蛋	温度65 ℃; 功率300 W; 时间30 min	超声低温预煮组,硬度与胶着性下降。这主要是因为蛋白网状结构遭到破坏,水分子渗入; 因卤蛋蛋黄高脂肪,超声高温预煮后,其内聚性和黏力较低,因而可形成松散、沙质质地。	刘静波等 ^[46]
蛋黄	温度80 ℃; 时间40 min; 功率160 W	超声波可以降低蛋黄的胶性、咀嚼性、弹性、硬度和内聚性,使蛋黄更柔软,光滑,沙软。	WANG等 ^[36]
猪肝	不同强度(90、108、126、144、162 W/m ²); 不同时间(5、10、15、20、25 min); 不同处理温度(60、65、70、75、80 ℃)	超声强度高,硬度、胶黏性低(负相关),咀嚼性高(正相关); 超声时间长,硬度低(负相关),弹性、咀嚼性、胶粘性高(正相关)。	丁捷等 ^[47]

近年来,关于超声辅助煮制对质构特性影响的研究越来越多,尤其是国内学者研究报道较多。由表 2 可知,超声辅助煮制可明显改善产品的质构特性。超声时间、超声强度是影响质构特性的重要因素。邹云鹤^[18]发现超声煮制时间对硬度有显著影响,当超声煮制时间在 80 min 时,与传统方式相比,可提高牛肉硬度,但延长至 120 min 后,硬度下降,即随着超声时间的延长,硬度也随之下降,这与周唯伊等^[32]、丁捷等^[47]的研究结果相契合。造成硬度下降的原因可能是超声波的空化、机械等效应破坏了食物本身中蛋白质的网状结构,水分子进入,从而导致硬度下降^[32]。相对于超声时间,超声强度对质构的影响也较大。陈胜^[33]通过调整超声功率研究超声辅助煮制处理对盐焗鸡的影响,得出结论低功率对鸡肉质构无显著影响,高强度下肌纤维遭到显著破坏,硬度和咀嚼性显著下降。丁捷等^[47]通过研究不同功率对泡椒猪肝质构的影响,发现猪肝硬度与超声强度呈显著负相关,与咀嚼性呈正相关。SILVA 等^[48]对比传统、超声辅助等方式烹饪香肠,发现香肠在超声辅助后,储存 1~30 d,其咀嚼性显著升高,而传统方式则变化不大。综合分析,超声波对质构特性的影响是由于超声波的机械效应、热效应对组织结构产生振动、断裂,肌原纤维遭到破坏分解,内源酶蛋白得到释放,肌纤维的密度、完整性以及蛋白质结构得到改变、松动^[49-50],从而改善质构特性。

2.3 超声波辅助煮制对畜禽肉制品出品率/蒸煮损失的影响

蒸煮损失是指食品在加工过程中原料发生组织收缩、水分流失的情况,一般是由于蛋白质受热变性,肌纤维收缩失水所致^[51]。出品率则是食物原料加工后与加工前的质量之比。这两个指标在一定程度上反映着食品本身的质地、嫩度等品质特征。超声波辅助处理则可以利用其空化等作用,提高食品的持水力,降低蒸煮损失,提高出品率。表 3 为超声波辅助煮制对畜禽肉制品出品率/蒸煮损失的影响相关研究结果。

出品率在一定程度上与畜禽肉制品的保水性与水分吸收率^[27]相关联。由表 3 可以看出,超声辅助

煮制处理一些畜禽肉制品时,对出品率起到了提高的作用。周唯伊等^[32]在研究超声波辅助卤煮雪山鸡时发现,超声时间与出品率呈正相关,在煮制 90 min 时,出品率达到最高。这可能是由于超声波空化作用破坏肌原纤维组织结构,使其松弛,促进肌肉蛋白与水分子结合能力,减少加热过程中水分流失所致^[53]。邹云鹤^[18]在研究利用超声波蒸煮锅煮制牛肉时,得出了蒸煮损失与煮制时间呈正相关,但同一煮制时间下,超声可显著降低蒸煮损失。这与超声处理对食品的保水性有关。ZHAO 等^[54]认为超声波可以促进肌球蛋白降解,从而改变肉制品的微观网络结构,进而提高肉制品保水性。MCCLEMENTS 等和 TURANTA 等^[55-56]在整理超声在食品分析等作用进展时发现,有研究表明超声波振动产生的空化效应对肌原纤维结构的破坏有明显作用,使水分子进入肌纤维间并储存,从而提高肉制品保水性。因此,肌原纤维是影响肉质保水性、水合作用的重要因素,这不仅关系到蒸煮损失,也对肉质嫩度起到一定作用。

2.4 超声波辅助煮制对畜禽肉制品剪切力/嫩度的影响

嫩度是衡量肉类质量的主要因素之一。嫩度的准确含义尚未盖棺定论,一般是指饮食者的感觉器官对食物肌肉蛋白质质地的总体主观判断,一般包括食物对舌的柔软性、对牙齿的抵抗性以及咬断肌纤维的难易度和咀嚼度^[57]。在研究肉制品中,一般通过剪切力的大小作为衡量嫩度的指标。剪切力与嫩度呈反比,剪切力大,嫩度低^[58]。表 4 为超声波辅助煮制对畜禽肉制品嫩度影响的相关研究结果。

影响肉质嫩度的因素有很多,肌原纤维便是其中之一。它不仅影响着蒸煮损失、持水力,对嫩度也起着一定作用。有研究表明,肌纤维越细,肉质越嫩;肌纤维越粗,肉质越差^[57],且肌原纤维空间结构的改变会在一定程度上引起蛋白质功能特性的变化。超声波辅助煮制正是由于超声波对肌肉组织结构造成破坏,进而对嫩度起到影响。有研究表明,超声处理可以增加肌原纤维蛋白二级结构中 β -转角、无规则卷曲结构的含量,降低 α -螺旋结构的含量^[11, 59-60],这表明超声波对氢键起到了破坏作用,超声处理后,分

表 3 超声波辅助煮制对畜禽肉制品出品率/蒸煮损失的影响

Table 3 Effect of ultrasonic assisted cooking on yield/cooking steaming losses of livestock and poultry meat products

名称	工艺参数	出品率/蒸煮损失	参考文献
鸡胸肉	功率300 W; 频率为40 kHz; 超声时间25 min	超声空化效应破坏肌原纤维结构,水分结合能力提高,可减少肉汁流出,降低蒸煮损失,提升出品率。	刘功明等 ^[34]
卤鸡	功率300 W; 频率20 kHz; 时间0、30、60、90、120 min	超声时间与出品率呈正相关。90 min时出品率最高。	周唯伊等 ^[32]
盐焗鸡	超声温度85 °C; 频率20 kHz; 功率0、200、400、600、800、1000 W	超声处理可显著降低蒸煮损失,提高出品率。	陈胜 ^[33]
盐水鸭	超声波辅助(24 kHz)传统加热方法煮制	超声波辅助煮制和用传统的方法炖煮鸭肉的蒸煮损失程度不同而差异显著,可降低其蒸煮损失。	钟赛意 ^[52]
牛肉	频率20 kHz; 0、400、600、800、1000 W; 煮制80、100、120 min	超声波处理可提高酱卤牛肉的保水性,降低牛肉的蒸煮损失和加压损失。	邹云鹤 ^[18]
鸭心	功率300 W; 频率40 kHz; 温度80 °C; 时间25 min	与传统方式相比,超声处理降低了13.8%的蒸煮损失,程度差异显著。	王雪梅等 ^[35]

表 4 超声波辅助煮制对畜禽肉制品嫩度的影响
Table 4 Effect of ultrasonic assisted cooking on the tenderness of livestock and poultry meat products

名称	工艺参数	剪切力/嫩度	参考文献
鸡胸肉	功率300 W; 频率为40 kHz; 时间25 min	与传统加热煮制相比, 煮制25 min时其剪切力降低了34.1%。	刘功明等 ^[34]
卤鸡	功率300 W; 频率20 kHz; 时间0、30、60、90、120 min	超声波其空化、机械效应使肉品蛋白质变性程度增加, 剪切力变小, 嫩度提高。	周唯伊等 ^[32]
盐焗鸡	超声温度85 ℃; 频率20 kHz; 功率0、200、40、600、800、1000 W	低功率的超声波对肌纤维结构的破坏程度较小, 对鸡肉嫩度没有显著性的影响; 较高功率的超声波处理会降低剪切力值。1000 W时, 鸡肉剪切力最低。	陈胜 ^[33]
盐水鸭	超声波辅助(24 kHz)传统加热方法煮制	超声辅助加热煮制的鸭肉剪切力值与传统加热煮制组程度差异显著, 使鸭肉的嫩度降低。	钟赛意 ^[52]
牛肉	频率20 kHz; 功率0、400、600、800、1000 W; 煮制80、100、120 min	与对照组相比, 煮制80 min时, 超声组剪切力显著降低; 煮制100 min时, 功率高于800 W的超声波使剪切力显著降低; 煮制120 min时, 超声波处理对剪切力影响效果不显著; 超声波辅助煮制处理可降低硬度以及剪切力, 起到嫩化作用。	邹云鹤 ^[18]
鸭心	功率300 W; 频率40 kHz; 温度80 ℃; 时间25 min	超声波处理组与传统加热煮制组的鸭心剪切力值相比, 降低了26.9%, 差异显著; 煮制过程中, 超声波处理能够显著提高鸭心的嫩度。	王雪梅等 ^[35]

子结构由有序状态转变为无序状态, 刚性结构减弱, 柔性结构增强^[11]。此外, 超声还可以改变蛋白质之间相互作用力, 超声的机械效应可能会破坏肌原纤维蛋白分子间相互作用(静电、疏水), 使疏水基团暴露出来, 增强表面疏水性^[61]。这些都表明超声波处理对肌原纤维起到至关重要的作用。邹云鹤^[18]研究表明, 超声波辅助煮制处理可明显破坏肌原纤维结构, 降低硬度及剪切力, 提高酱卤牛肉的嫩度。这是由于加热熟制过程中, 热效应破坏了肌原纤维完整性, 使肌原纤维表现出易断裂的状态, 肉的嫩度也因此相应提高^[49]。陈胜^[33]研究超声辅助煮制对盐焗鸡品质影响时发现, 低功率下鸡肉剪切力差异不显著, 高功率下可降低剪切力, 对肉质起到嫩化作用。JAYASOORIYA 等^[62]也认为超声处理可显著降低剪切力和硬度。这与 SMITH 等^[63]研究超声对于牛半腱肌剪切力的研究结果一致。但较低功率下对肌纤维结构的破坏程度较小, 剪切力值影响不大。LYNG 等和 POHLMAN 等^[64-65]研究表明超声波没有使肉类样品变嫩, 这或许是由于低强度的超声浴所致, 这与陈胜^[33]的结论相符。因此, 在超声波辅助处理肉制品时, 要保持合适的超声强度, 方可对其嫩度有积极影响。

2.5 超声波辅助煮制对畜禽肉制品风味物质的影响

风味是由人的味觉系统和嗅觉系统感受到的风味物质共同作用形成^[66]。食品中风味物质的产生, 一般是由风味前体物质在烹饪过程中经过转化产生, 前体物质本身并不具有风味^[67-68]。风味物质一般分为滋味和香味呈味物质。滋味呈味物质一般包括游离氨基酸、呈味核苷酸等物质; 香味呈味物质一般是烹饪过程中前体物质经过氧化还原反应、美拉德反应、脂质氧化分解等反应而产生的硫化物、不饱和烃类、醛类、烷类、酸类及其他杂环类化合物^[66]。目前, 超声波辅助煮制对食品风味影响显著, 目前在制作高汤中应用愈加广泛。表 5 为超声波辅助煮制对畜禽肉制品风味物质影响的相关研究结果。

2.5.1 超声辅助煮制对畜禽肉制品风味前体物质的

影响 游离氨基酸是蛋白质降解的产物。超声波辅助煮制可增加游离氨基酸、多肽的含量。雷辰^[45]研究发现超声煮制处理组的猪五花肉中游离氨基酸总量、TCA 溶解肽比传统水煮处理组高, 且超声可使肉质组织结构中肌肉蛋白变性, 促进其降解, 从而增加氨基酸含量。邹云鹤^[18]研究结果表明超声波辅助煮制使酱卤牛肉在煮制过程中受到水分子的高振荡裂解, 形成具有强氧化性的自由基, 促进蛋白质氧化降解, 而使核苷酸与游离氨基酸发生协同作用, 对风味起到显著影响。CICHOSKI 等^[71]研究则表明超声处理促进了蛋白的水解, 释放出肽和氨基酸, 同时增加了脂质氧化, 产生挥发性有机化合物。在液体食品(高汤)中, 戚军等^[72]研究发现随超声功率的上升, 鸡汤中游离脂肪酸初级氧化产物呈先上升后下降的趋势。这是由于在炖煮初级阶段, 肉中水溶性物质溶出并逐渐迁移到汤中, 呈上升趋势, 随着熬煮时间的增加, 游离脂肪酸不断氧化转化成风味物质, 最终逐渐氧化为挥发性风味物质而导致脂肪酸含量的下降。陈春梅^[73]发现超声处理后, 羊肉汤中游离脂肪酸的 SFA 的含量占比均在 50% 以上, UFA 在整个炖煮过程中不断发生着迁移和氧化, 促进羊肉汤风味的形成^[74]。超声时间对羊肉汤中甜味、鲜味、苦味游离氨基酸含量的影响呈上升趋势。孟倩^[26]研究发现 90 和 95 ℃ 超声组别中骨汤的鲜味氨基酸含量显著高于其他组。90 ℃ 超声辅助煮制有利于骨汤中鲜味氨基酸的保留, 同时较低的加热温度也有利于蛋白质发生有限水解。并且空化作用促进了 5'-核苷酸的溶出, 避免了高温引起的过度美拉德反应造成的 5'-核苷酸的损失。因此, 超声对风味前体物质有积极的改善作用, 可促进游离氨基酸、核苷酸类物质的溶出, 从而有利于风味的形成。

2.5.2 超声辅助煮制对畜禽肉制品挥发性风味物质的影响 大量研究均证明超声辅助煮制对提高畜禽肉制品中风味物质含量有积极作用。在对盐焗鸡处理时, 陈胜^[33]检测出的风味物质种类与含量高于传

表 5 超声波辅助煮制对畜禽肉制品风味物质的影响

Table 5 Effect of ultrasonic-assisted cooking on flavour substances in livestock and poultry meat products

名称	超声条件	风味	参考文献
卤鸡	功率300 W; 频率20 kHz; 时间0、30、60、90、120 min	与传统方式相比, 超声时间大于60 min, 其挥发性风味物质的种类和含量均得到明显程度上的提高。	周唯伊等 ^[32]
盐焗鸡	超声温度85 ℃; 频率20 kHz; 功率0、200、400、600、800、1000 W	盐焗鸡中的风味物质主要是烃类物质, 风味贡献最大的是醛类物质, 经超声波处理后盐焗鸡中的风味物质种类和含量显著高于传统方式。	陈胜 ^[33]
盐焗鸡	温度85 ℃; 频率25 kHz; 时间30 min; 功率0、200、400、600、800、1000 W	超声波的空化效应导致氨基酸降解、脂质氧化和挥发性风味化合物的增加; 随着超声波功率的增加, 醇类会被氧化成醛类, 醇类含量因此降低。	李素云等 ^[69]
盐水鸭	超声波辅助(24 kHz)传统加热方法煮制	传统工艺加工中检测出风味物质60种, 超声波工艺加工检测出62种; 与传统工艺相比, 超声组中醛类、酮类含量高, 醇类、酯类较低。其它种类化合物总量相差不大。	钟赛意 ^[52]
猪五花肉	频率40 kHz; 功率250 W; 以85 ℃炖煮2 h	与传统水煮处理相比, 超声水煮处理组的猪五花肉肉中游离氨基酸总量高; 超声处理促进蛋白质降解, 增加TCA溶解肽的含量; 传统工艺加工中检测出风味物质13种, 超声波工艺加工检测出9种; 与传统工艺相比, 超声组的醛类、柠檬烯等物质含量高; 有利于熟肉香气形成。	雷辰 ^[45]
牛肉	频率20 kHz; 功率0、400、600、800、1000 W; 煮制80、100、120 min	超声波处理使牛肉脂质氧化水平提升, 挥发性风味物质的种类和含量增加, 特别是醛类、醇类和酮类; 超声波辅助煮制功率为600 W时, 核苷酸含量最高; 适当功率的超声波辅助煮制酱卤牛肉可以提高样品中糖含量, 增强样品的甜味。	邹云鹤 ^[18, 70]
蛋黄	功率160 W; 温度80 ℃; 时间40 min	超声辅助煮制处理的蛋黄检测出25种具有良好气味的挥发物质。且物质不单一, 具有整体性。	WANG等 ^[36]
香肠	频率25 kHz; TUS100和TUS50; 分别使用100%(462 W)和50%(301 W)的振幅	超声蒸煮辅助加速脂质氧化, 提供了更多数量和种类的来自脂质氧化的挥发性化合物; 有效促进蛋白水解, 释放多肽和氨基酸。	CICHOSKI等 ^[71]
鸡汤	温度90 ℃; 时间2 h; 频率20 kHz; 功率0、250、500、750、1000 W	超声辅助煮制使汤中醛类物质含量下降, 醇类物质含量上升; 超声辅助煮制鸡汤减缓鸡汤中脂肪的脂质氧化。	戚军等 ^[72]
羊肉汤	温度85 ℃; 功率800 W; 超声时间105 min	超声波辅助炖煮促进羊肉中脂肪和蛋白质的相互氧化; 超声炖煮时间延长, 羊肉汤的脂肪氧化程度、蛋白质羰基含量、游离氨基酸含量、蛋白质浓度整体上升; 炖煮90 min汤中醛类化合物的种类及总含量最多; 炖煮60 min汤中烃类化合物的种类增多。	陈春梅 ^[73]
牛骨汤	功率480 W; 时间6 h; 温度80 ℃	超声辅助煮制有效促进脂肪快速溶出, 有利于低级醛类的产生和保留, 可改善骨汤的挥发性风味特征; 90 ℃超声有利于产生较为丰富的烯类、酯类和烷烃类。对鲜味氨基酸的很好的保留, 可促进5'-核苷酸的溶出以及避免其过度反应造成损失。	孟倩 ^[26]

统处理方式, 贡献作用最大的是醛类物质, 含量最多的是烃类物质; 李素云等^[69]研究超声煮制对盐焗鸡风味影响时发现含量最高的为烃类物质, 而烃类可以提升肉的整体风味。超声波空化效应导致氨基酸与脂肪发生氧化降解, 易于挥发性风味化合物的有效溶出。钟赛意^[52]在对盐水鸭进行超声处理时发现, 与传统方式相比, 化合物总量只高出 2 种, 且超声组中醛类、酮类含量高, 醇类、酯类较低, 其它种类化合物总量相差不大。雷辰^[45]处理五花肉, 结果表明超声组的醛类、柠檬烯等对猪肉风味贡献大的风味物质含量均高于传统组, 这是由于超声促进了脂肪氧化, 其中己醛含量超出传统组 87.4%; 但其超声的空化循环降解崩塌与热效应结合后, 抑制了酯类的产生, 因此在超声组并没有检出酯类。在利用超声辅助煮制高汤中, 戚军等^[72]研究发现超声辅助煮制鸡汤中, 醇类物质含量上升; 陈春梅^[73]发现煮制 90 min 汤中醛类化合物的种类及总含量最多; 60 min 羊肉汤中烃类化合物的种类增多, 认为超声波辅助炖煮能够促进羊肉汤良好风味的形成。综上, 超声辅助煮制对于风味物质影响主要是利用其空化、热效应对蛋白质、脂肪的氧化降解, 同时使原料小分子间的空隙增大, 易于物质溶出与滋味渗入。可见, 相较于传统煮制技术, 超声辅助煮制技术可对其风味物质种类及含量提升, 改善食品风味。

3 总结与展望

众多研究结果表明, 超声辅助煮制工艺对畜禽

肉制品在质构、色泽、嫩度、风味等方面均呈现良好效果, 通过优化超声时间、超声强度等工艺参数, 在传统煮制工艺的基础上, 超声波对肉质进行优化提升。这是由于超声波空化、机械及热效应, 对食物的蛋白质、脂肪起到氧化、降解作用, 同时使畜禽肉制品中分子间空隙增大, 促进风味物质溶出。相对于传统方式, 超声辅助煮制高频率、高速度、高能量的特点可在短时间内达到传统长时煮制的效果, 减少能耗、提升质量。本文总结了近年国内外各研究者对超声辅助煮制对于畜禽肉制品在质构、色泽、嫩度、风味等方面影响的研究成果, 为日后食品工业化、健康饮食研究提供一定的理论基础, 为后续未来食品的新方向发挥引导作用。但目前, 超声辅助煮制也面临着一系列挑战: 一方面方便快捷的超声辅助煮制装置设备较少, 一款优化参数的设备仍在呼之欲出, 这为未来工业化发展带来了巨大挑战; 另一反面, 超声辅助也存在一定弊端, 不当操作(如超声辅助过度加热)会使肉质发生质变。因此, 需要综合考虑超声辅助煮制设备的全过程开发, 实现从研究结果到成果转化的有效蜕变, 为未来食品的发展奠定基础。

参考文献

[1] 钟赛意, 姜梅, 王善荣. 超声辅助传统加热方式煮制肉品的可行性研究[J]. 食品工业科技, 2007, 29(11): 114-116. [ZHONG S Y, JIANG M, WANG S R. Study on the feasibility of ultrasonic assisted traditional heating for meat cooking[J]. Food Industry Science and Technology, 2007, 29(11): 114-116.]

- [2] 张坤,王道营,张森,等. 高强度超声对鹅胸肉嫩度及品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(15): 122-127. [ZHANG K, WANG D Y, ZHANG M, et al. Effect of high-intensity ultrasonic treatment on goose tenderness and meat quality[J]. *Food Science*, 2018, 39(15): 122-127.]
- [3] 刘瑞,李雅洁,陆欣怡,等. 超声波技术在肉制品腌制加工中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 445-453. [LIU R, LI Y J, LU X Y, et al. Recent advances in the application of ultrasonic technology in the curing of meat products[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(24): 445-453.]
- [4] 刘二蒙,冯拓,高献礼,等. 超声波加速液态发酵食品风味成熟研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(17): 283-289. [LIU E M, FENG T, GAO X L, et al. Research advances of flavor maturation of fermented liquid foods accelerated by sonication[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(17): 283-289.]
- [5] POHLMAN F W, DIKEMAN M E, KROPF D H. Effects of high intensity ultrasound treatment, storage time and cooking method on shear, sensory, instrumental color and cooking properties of packaged and unpackaged beef pectoralis muscle[J]. *Meat Science*, 1997, 46(1): 89-100.
- [6] BHARGAVA N, MOR R S, KUMAR K, et al. Advances in application of ultrasound in food processing: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105293.
- [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 Q N, LIU H T, CHEN Q, et al. Inhibition of microbial biofilm contamination by ultrasonic technology: Mechanism, influential factors and application to meat and meat products[J]. *Meat Research*, 2021, 35(5): 50-59.]
- [8] SUSLIC K, KENNETH S. The chemical effects of ultrasound[J]. *Sci Am*, 1989, 260(2): 80-86.
- [9] 吕瑞玲. 超声波技术灭活蜡样芽胞杆菌芽胞机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [LYU R L. Effect and mechanism of ultrasound in the inactivation of *Bacillus cereus* spore[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
- [10] KNORR D, FROEHLING A, JAEGER H, et al. Emerging technologies in food processing[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2011, 2(1): 203-235.
- [11] 韩格,孔保华. 功率超声对肌原纤维蛋白功能特性及肉品品质的影响研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(13): 361-369. [HAN G, KONG B H. Effect of power ultrasound on the functional properties of myofibrillar protein and meat quality: A review[J]. *Food Science*, 2022, 43(13): 361-369.]
- [12] ANTTI G, PENTTI P, HANNA K. Ultrasonic degradation of aqueous carboxymethylcellulose: Effect of viscosity, molecular mass, and concentration[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, 15(4): 644-648.
- [13] 余德洋,刘宝林,吕福扣. 超声波辅助马铃薯冻结的实验研究[J]. *声学技术*, 2014, 33(1): 21-24. [YU D Y, LIU B L, LYU F K. An experimental study of ultrasound assisted freezing of potato[J]. *Acoustical Technology*, 2014, 33(1): 21-24.]
- [14] PANDIT A B, JOSHI J B. Hydrolysis of fatty oils: Effect of cavitation[J]. *Chemical Engineering Science*, 1993, 48(19): 3440-3442.
- [15] 黄永春,高海芳,吴修超,等. 水力空化强化糖液亚硫酸法脱色的研究[J]. *食品与机械*, 2014, 30(3): 5-7. [HUANG Y C, GAO H F, WU X C, et al. Study on enhancing decolorization of sugarcane juice with sulfitation acid method by hydrodynamic cavitation[J]. *Food and Machinery*, 2014, 30(3): 5-7.]
- [16] 黄永春,熊叶,吴修超,等. 水力空化强化亚硫酸钙吸附糖液中非糖分的研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(15): 229-231. [HUANG Y C, XIONG Y, WU X C, et al. Effect of hydrodynamic cavitation on adsorption of non-sugar components on calcium sulfite[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(15): 229-231.]
- [17] 李佳麒. 超声波辅助腌制对牛肉干制品嫩度的影响及其机制探讨[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021. [LI J Q. Effect of ultrasonic-assisted pickling on tenderness of beef jerky products and its Mechanism[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.]
- [18] 邹云鹤. 超声波辅助煮制对酱卤牛肉品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018. [ZOU Y H. Effect of ultrasound assisted cooking on the quality of spiced beef[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.]
- [19] GAMBUTEANU C, ALEXE P. Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological, chemical and technological properties of unpackaged pork *Longissimus dorsi*[J]. *Annals of the University Dunarea De Jos of Galati*, 2013, 37(1): 98-107.
- [20] SHORE D, WOODS M O, MILES C A. Attenuation of ultrasound in post rigor bovine skeletal muscle[J]. *Ultrasonics*, 1986, 24(2): 81-87.
- [21] KALICHEVSKY M T, KNORR D, LILLFORD P J. Potential applications of high-pressure effects on ice-water transitions[J]. *Trends in Food Ence & Technology*, 1995, 6(8): 253-259.
- [22] HONG G P, CHUN J Y, JO Y J, et al. Effects of water or brine immersion thawing combined with ultrasound on quality attributes of frozen pork loin[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2014, 34(1): 115-121.
- [23] LI B, SUN D W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods-A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 54(3): 175-182.
- [24] THOMPSON L H, DORAISWAMY L K. Sonochemistry: Science and engineering[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1999, 38(4): 1215-1249.
- [25] 张培智. 正交超声波场和多频超声波场对马铃薯块冷冻效率和品质的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [ZHANG P Z. Effects of orthogonal ultrasonic field and multi-frequency ultrasonic field on potato freezing efficiency and quality[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]
- [26] 孟倩. 超声辅助熬煮用于改善牛骨汤加工工艺的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [MENG Q. Study on improving processing technology of beefbone soup by ultrasonic assisted boiling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]
- [27] 王艳. 超声波辅助油炸对肉丸品质的影响及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019. [WANG Y. Study on the effect and mechnism of ultrasound assisted frying on the quality of meatballs[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.]

- [28] DICKENS J A, LYON C E, WILSON R L. Effect of ultrasonic radiation on some physical characteristics of broiler breast muscle and cooked meat[J]. *Poultry Science*, 1991, 70(2): 389–396.
- [29] IQBAL A, VALOUS N A, MENDOZA F, et al. Classification of pre-sliced pork and turkey ham qualities based on image colour and textural features and their relationships with consumer responses[J]. *Meat Science*, 2010, 84(3): 455–465.
- [30] 郑海波. 高压下加热处理对鸡肉糜凝胶品质的影响及机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018. [ZHENG H B. Effects of heating under pressure on the gelation of chicken batters and its mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.]
- [31] FRANCO PEDRESCHI A, JORGE LEÓN A, DOMINGO MERY B, et al. Development of a computer vision system to measure the color of potato chips[J]. *Food Research International*, 2006, 39(10): 1092–1098.
- [32] 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 W Y, LU X Y, DAI J N, et al. Effects of ultrasonic-assisted stewing on the quality and flavor of marinated Xueshan chicken[J]. *Meat Research*, 2021, 35(10): 33–40.]
- [33] 陈胜. 盐焗鸡加工工艺优化及其品质特性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019. [CHEN S. Study on processing technology optimization and quality characteristics of baked chicken in salt[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.]
- [34] 刘功明, 张方刚, 郭光平, 等. 超声波促渗在鸡胸肉蒸煮工艺中的应用[J]. *肉类研究*, 2015, 29(4): 1–5. [LIU G M, ZHANG W G, GUO G P, et al. Ultrasonic-enhanced penetration used in the cooking process of chicken breast meat[J]. *Meat Research*, 2015, 29(4): 1–5.]
- [35] 王雪梅, 刘功明, 王宝维, 等. 超声波促渗对蒸煮鸭心食用品质的影响[J]. *食品科技*, 2015, 40(8): 132–136. [WANG X M, LIU G M, WANG B W, et al. Effects of ultrasonic penetration enhancing on eating quality of cooking duck heart meat[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(8): 132–136.]
- [36] WANG X, HUANG Y, ZHOU B, et al. Improvement of quality and flavor of salted egg yolks by ultrasonic assisted cooking[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 75: 105579.
- [37] GÓMEZ-SALAZAR J A, OCHOA-MONTES D A, CERÓN-GARCÍA A, et al. Effect of acid marination assisted by power ultrasound on the quality of rabbit meat[J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 2018: 1–6.
- [38] KUTLU N, PANDISELVAM R, KAMILOGLU A, et al. Impact of ultrasonication applications on color profile of foods[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022: 89.
- [39] STADNIK J, DOLATOWSKI Z J. Influence of sonication on warner-bratzler shear force, colour and myoglobin of beef (m. *Semimembranosus*) [J]. *European Food Research & Technology*, 2011, 233(4): 553–559.
- [40] MASUDA T, INAI M, MIURA Y, et al. Effect of polyphenols on oxymyoglobin oxidation: Prooxidant activity of polyphenols *in vitro* and inhibition by amino acids[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2013, 61(5): 1097–1104.
- [41] ESMERALDA PEA-GONZALEZ A, ALMA DELIA ALARCON-ROJO A, IVAN GARCIA-GALICIA A, et al. Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 53: 134–141.
- [42] ALVES L L, RAMPELOTTO C, SILVA M S, et al. The effect of cold storage on physicochemical and microbiological properties of beef semitendinosus muscle subjected to ultrasonic treatment in different systems (bath or probe) [J]. *International Food Research Journal*, 2018, 25(2): 504–514.
- [43] SIKES A L, MAWSON R, STARK J, et al. Quality properties of pre-and post-rigor beef muscle after interventions with high frequency ultrasound[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(6): 2138–2143.
- [44] 董庆利, 罗欣. 肉制品的质构测定及国内外研究现状[J]. *食品工业科技*, 2004, 26(7): 134–135. [DONG Q L, LUO X. Texture determination of meat products and its research status at home and abroad[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2004, 26(7): 134–135.]
- [45] 雷辰. 超声辅助熟化猪五花肉对营养及质构特征的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016. [LEI C. Effects of ultrasound-assisted heating on the nutritional and texture properties of pork belly[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.]
- [46] 刘静波, 程懂坤, 赵颂宁, 等. 预煮方式对卤蛋加工过程中理化性质的影响[J]. *肉类工业*, 2021(6): 25–30. [LIU J B, CHENG D K, ZHAO S N, et al. Effect of pre-cooking methods on physicochemical property of halogen egg during processing[J]. *Meat Industry*, 2021(6): 25–30.]
- [47] 丁捷, 任政伟, 卢雪松, 等. 超声波热处理对真空包装泡椒猪肝质构特性的影响[J]. *肉类研究*, 2016, 30(11): 22–27. [DING J, REN Z W, LU X S, et al. Effects of combined ultrasonic and heat treatments on texture characteristics of vacuum-packed pig liver with pickled pepper[J]. *Meat Research*, 2016, 30(11): 22–27.]
- [48] SILVA J S de, VOSS M, MENEZES C R de, et al. Is it possible to reduce the cooking time of mortadellas using ultrasound without affecting their oxidative and microbiological quality? [J]. *Meat Science*, 2020, 159(C): 107947.
- [49] CHEN L, ZHOU G H, ZHANG W G. Effects of high oxygen packaging on tenderness and water holding capacity of pork through protein oxidation[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 91(2): 353–362.
- [50] ALI S, ZHANG W, RAJPUT N, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat[J]. *Food Chemistry*, 2015, 173(15): 808–814.
- [51] 张唐伟, 贺继峰, 余耀斌, 等. 岗巴羊羊肉营养品质及其因子分析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(8): 279–284. [ZHANG T W, HE J F, YU Y B, et al. Mutton quality and its factor analysis of gangba sheep[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2018, 39(8): 279–284.]
- [52] 钟赛意. 超声波在盐水鸭加工中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007. [ZHONG S Y. Study on the application of ultrasonic in salting processing of salted duck[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.]
- [53] 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]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 59: 104735.
- [54] ZHAO Y Y, WANG P, ZOU Y F, et al. Effect of pre-emulsification of plant lipid treated by pulsed ultrasound on the functional properties of chicken breast myofibrillar protein composite gel[J]. *Food Research International*, 2014, 58: 98–104.
- [55] MCCLEMENTS D J. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing[Z]. Oxford: Elsevier Ltd, 1995, 6: 293–299.
- [56] TURANTA F, K L G B, K L B. Ultrasound in the meat industry: General applications and decontamination efficiency[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 198: 59–69.
- [57] 孙红霞, 黄峰, 张春江, 等. 肉品嫩度的影响因素以及传统炖煮方式对肉制品嫩度的影响[J]. *食品科技*, 2016, 41(11): 94–98.
- [SUN H X, HUANG F, ZHANG C J, et al. Influence of stewing processing on the tenderness of meat products[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(11): 94–98.]
- [58] 胡斐斐, 钱书意, 李侠, 等. 低压静电场辅助冷藏对牛肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 132–138.
- [HU F F, QIAN S Y, LI X, et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted chilling storage on quality of beef[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 132–138.]
- [59] WANG J Y, YANG Y L, TANG X Z, et al. Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar protein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 225–233.
- [60] FAN D, HUANG L, LI B, et al. Acoustic intensity in ultrasound field and ultrasound-assisted gelling of surimi[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 75: 497–504.
- [61] LI K, FU L, ZHAO Y Y, 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 Hydrocolloids*, 2020, 98: 105271–105275.
- [62] JAYASOORIYA S D, TORLEY P J, D'ARCY B R, et al. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine *Semitendinosus* and *Longissimus* muscles[J]. *Meat Science*, 2007, 75(4): 628–639.
- [63] SMITH N B, CANNON J E, NOVAKOFSKI J E, et al. Tenderization of semitendinosus muscle using high intensity ultrasound: IEEE Ultrasonics Symposium, 1991[C].
- [64] LYNG J G, ALLEN P, MCKENNA B M. The influence of high intensity ultrasound baths on aspects of beef tenderness[J]. *Journal of Muscle Foods*, 1997, 8(3): 237–249.
- [65] POHLMAN F W, DIKEMAN M E, ZAYAS J F. The effect of low-intensity ultrasound treatment on shear properties, color stability and shelf-life of vacuum-packaged beef semitendinosus and biceps femoris muscles[J]. *Meat Sci*, 1997, 45(3): 329–337.
- [66] 孔园园, 张雪莹, 李发弟, 等. 羊肉主要风味前体物质与羊肉风味的关系及影响因素的研究进展[J]. *农业生物技术学报*, 2021, 29(8): 1612–1621.
- [KONG Y Y, ZHANG X Y, LI F D, et al. Research progress on the relationship between mutton flavor precursor substance and mutton flavor and influencing factors[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2021, 9(8): 1612–1621.]
- [67] 李敬, 杨媛媛, 赵青余, 等. 肉风味前体物质与风味品质的关系研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(11): 1–7.
- [LI J, YANG Y Y, ZHAO Q Y, et al. Research progress on the relationship between meat flavor precursors and flavor[J]. *Chinese Journal of Animal Husbandry*, 2019, 55(11): 1–7.]
- [68] 刁小琴, 孙薇婷, 徐筱君, 等. 肉制品风味物质分析及其在加工中变化的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 2991–2999.
- [DIAO X Q, SUN W T, XU X J, et al. Research progress on analysis of flavor compounds in meat products and their changes during processing[J]. *Journal of Food Safety and quality Inspection*, 2021, 12(8): 2991–2999.]
- [69] 李素云, 郭舒阳, 陈胜, 等. 不同超声波功率煮制对盐焗鸡品质的影响[J]. *肉类工业*, 2021, 42(8): 26–31.
- [LI S Y, GUO S Y, CHEN S, et al. Effect of different ultrasonic power cooking on the quality of salt-baked chicken[J]. *Meat Industry*, 2021, 42(8): 26–31.]
- [70] 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]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 46: 36.
- [71] CICHOSKI A J, DA SILVA J S, LEÃES Y S V, et al. Effects of ultrasonic-assisted cooking on the volatile compounds, oxidative stability, and sensory quality of mortadella[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 72: 105443.
- [72] 戚军, 陈亚, 徐颖, 等. 超声辅助炖制对黄羽鸡汤香味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 153–158.
- [QI J, CHEN Y, XU Y, et al. Effect of ultrasonic assisted with stewing on aroma of broth prepared with yellow-feathered chickens[J]. *Food and fermentation Industry*, 2021, 47(4): 153–158.]
- [73] 陈春梅. 超声波辅助炖煮羊肉汤的工艺优化及风味分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [CHEN C M. Optimization of the technology and flavor analysis of the stewed sheep meat soup with ultrasonic-assisted[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.]
- [74] VASTA V, ALESSANDRO A D, PRIOLO A, et al. Volatile compound profile of ewe's milk and meat of their suckling lambs in relation to pasture vs. indoor feeding system[J]. *Small Ruminant Research*, 2012, 105(1–3): 16–21.