超声波处理技术在水产品加工中的应用研究进展

蓝蔚青[1,2]，赵家欣[1]，谢晶[1,2]
（1.上海海洋大学 食品学院，上海 201306；2.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心 食品科学与工程国家级实验教学示范中心（上海海洋大学），上海 201306）

摘要：目的 对超声波在水产品加工中的应用研究进展进行总结，为后续研究提供理论参考。**方法** 在介绍超声波特点和原理的基础上，对超声波处理技术在水产品灭菌、钝酶、蛋白质改性和传热传质性能等方面的应用研究进展进行阐述，提出存在的问题和解决方法。**结果** 超声波处理技术可进行水产品的杀菌前处理，并能钝化内源酶，从而提高水产品在结晶、提取和腌制等方面的加工效率，并减缓水产品在解冻时造成的品质劣化。超声波处理技术在设备条件和加工效率上还存在不足之处，需与其他处理方式联合使用。**结论** 超声波处理技术在水产品加工中显现出一定优势，且能结合其他处理方式，进一步增强水产品在杀菌、提取、干燥与品质保持等方面的加工效率。

关键词：超声波处理技术；水产品；加工；研究进展
中图分类号：S985 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2022)11-0132-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.11.017

Research Progress on the Applications of Ultrasound Treatment Technology in the Processing of Aquatic Products

LAN Wei-qing[1,2], *ZHAO Jia-xin*[1], *XIE Jing*[1,2]
(1. College of Food Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The paper aims to summarize the research progress on the applications of ultrasonic in aquatic product processing and provide the theoretical references for subsequent research. Based on the introduction of the characteristics and principle of ultrasonic, the application research progress of ultrasonic treatment technology in bacteria reduction, enzyme inactivation, protein modification, heat and mass transfer performance of aquatic products was described respectively, and the existing problems and solutions were also put forward. Ultrasonic treatment technology can retard bacterial growth, inactivate endogenous enzymes and reduce sensitization of aquatic products, improve the processing efficiency of aquatic products in crystallization, extraction and pickling, and slow down the quality deterioration of aquatic products during thawing. However, ultrasonic treatment technology still has some shortcomings in equipment conditions and processing efficiency, which needs to be combined with other processing methods. Ultrasonic treatment technology has some advantages in aquatic products processing, and can be combined with other processing methods to further enhance

收稿日期：2021–09–09
基金项目：国家现代农业产业技术体系资助项目（CARS–47）；“十三五”国家重点研发计划重点专项（2019YFD0901602）；上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心能力提升项目（19DZ2284000）
作者简介：蓝蔚青（1977—），男，博士，上海海洋大学高级工程师，主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。
通信作者：谢晶（1968—），女，博士，上海海洋大学教授，主要研究方向为食品保鲜技术。

the processing efficiency of aquatic products in sterilization, extraction, drying and quality maintenance.

KEY WORDS: ultrasound treatment technology; aquatic products; processing; research progress

我国是世界渔业大国，渔业作为传统产业之一，其经济价值可观。据统计，2020 年全国水产品总产量为 6 549.02 万 t，比上年增长了 1.06%；养殖量为 5 224.20 万 t，与上年相比增长了 2.86%[1]。水产品具有高蛋白、低脂肪、富含不饱和脂肪酸等优点，因而深受消费者青睐。目前，全国水产品人均占有量为 46.39 kg，用于加工的水产品总量为 2 477.16 万 t。随着当前科技的飞速发展和人们生活水平的稳步提高，消费者对食品营养与风味的需求也相应提升。为了达到规定的食用标准，通常会对水产品进行加工。传统的水产品加工方法一般通过高温加热杀灭微生物、消除天然毒素或其他有害成分，但热处理可能会导致营养物质的流失和有毒化合物的形成[2]。由此，为了保证水产品的食用安全性，延长其货架期，满足消费者对食品营养风味的追求，有必要开展水产品的“绿色”加工技术研究，实现高效利用。

超声波处理技术作为一种新兴的非热加工方式，具有一系列传统加工方式所不能及的优点，现已在食品加工领域中广泛应用。此外，超声波处理设备还可实现高度自动化，节省了人力成本，发展前景广阔。由于超声波处理技术存在一些缺点，因此文中在介绍其特点及工作原理的基础上，还介绍了超声波处理技术在水产品加工中的应用研究进展。针对超声波处理技术的缺点，提出与其他处理相结合的方式，阐述其在水产品加工领域中的可行性和应用前景，以期为水产品加工产业的发展提供理论参考。

1　超声波处理技术的特点及工作原理

新型非热加工技术对食品和环境的影响较小，在减小能源消耗、减少废物产生和增加副产品回收利用率等方面具有一定潜力[3]。近年来，超高压、脉冲电场、等离子体、紫外线和超声波等食品非热加工技术相继涌现，其核心是在加工过程中无需加热或处理温度低于 60 ℃，使用的能量更少、时间更短，在保证食品安全的同时，最大程度地保持了食品的营养与品质。新型非热加工技术的主要特点及应用实例见表 1[4-8]。

超声波（Ultrasonic, US）指频率高于 20 kHz，超出人耳听觉上限的高频声波，其传播介质有气体、液体、固体、固熔体等。超声波主要通过机械、热和空化效应达到杀灭致病菌、腐败菌，使酶失活等目的。其中，空化效应被认为是超声发挥作用的主要效应。超声波作用于液体时会产生许多小气泡，气泡形成、增长和破裂时会产生局部的机械能和化学能，这个动力学过程即为空化效应。空化效应所产生的自由基和高温高压可对微生物、蛋白质等结构造成影响[9]。近年来，超声波辅助索氏提取、蒸馏、萃取、发酵等许多复合技术都是基于超声波原理的新型处理技术[10]。超声波处理技术的工作原理见图 1。

2　超声波处理技术在水产品加工中的应用研究进展

现有研究显示，超声波处理技术在各类食品加工中已得到广泛应用。在水产品加工中的应用主要体现在灭菌、钝酶、蛋白质改性和传热传质性能提升等方面。具体实例见表 2[11-27]。

2.1　灭菌

超声波能通过空化作用产生物理、机械和化学效应，达到破坏微生物的生物膜结构，延长水产品货架

表 1　新型水产品加工技术的主要特点及应用实例

Tab.1 Main characteristics and application examples of newly processing technologies in aquatic products

方法	超高压	脉冲电场	等离子体	紫外线	超声波
优点	杀菌高效、彻底，节能环保，安全性高，食品口感佳	效益高，节能，易普及	安全温和，无破坏性，成本低，易操作	污染小，易操作，能耗低，过程易控制	营养成分损失少、能效高、能耗低、实用性强、无污染、无残留
缺点	成本高，影响外观形态，部分食品会出现轻微熟食状态	加工不均匀，易引起食品物料温度的升高	穿透力弱，处理高脂质食品时易导致其氧化，引起酸败	穿透力弱，照射不均匀	杀菌不彻底，在空气中易衰减，功率要求高
应用实例	杀菌、钝酶、蛋白质改性、脱壳与提取[4]	肉类保鲜与嫩化处理，提高鱼类持水性和干燥效率[5]	抑制微生物，替代亚硝酸盐[6]	杀菌[7]	杀菌、冷冻、解冻、干燥、腌制、提取、起泡、乳化、切割、过滤等[8]

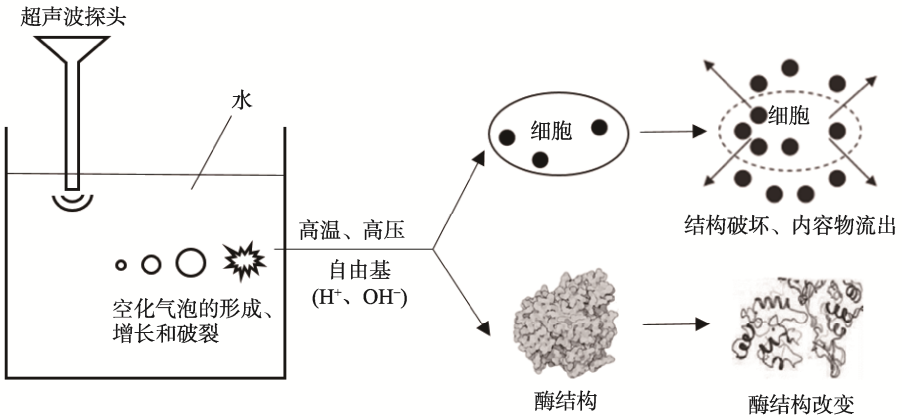

图 1　超声波处理技术工作原理

Fig.1 Reaction principle of ultrasound treatment technology

表 2　超声波处理技术在水产品加工中的应用

Tab.2 Application of ultrasonic treatment technology in aquatic products processing

作用对象	加工类型	加工条件	作用效果	参考文献
鲭鱼	灭菌	500 W，20 kHz	嗜冷细菌和嗜温细菌数量分别减少 0.32 和 0.30 个对数值	[11]
鲈鱼	灭菌	600 W，20 kHz	冷藏 8 d 时菌落总数仍低于 10^7	[12]
鲑鱼	灭菌	51 W/L，30 kHz	嗜冷细菌和嗜温细菌数量分别减少 1.5 和 1.1 个对数值	[13]
胰蛋白酶	钝酶	> 300 W	活力下降	[14]
内源酶	钝酶	440 ~ 600 W	活力下降	[15]
中性蛋白酶	钝酶	> 25 kHz	活力下降	[16]
鲤鱼	蛋白质改性	20 kHz，振幅 40%	溶解度和乳化性增强	[17]
草鱼	蛋白质改性	20 kHz，400~600 W	乳化性、起泡性和凝胶性增强	[18]
军曹鱼	蛋白质改性	4 W/mL，60 kHz	在 60、90 min 时达到最佳硬度	[19]
秀丽白虾	蛋白质改性	800 W，20 kHz	致敏性降低	[20]
南美白对虾	蛋白质改性	400 W，20 kHz	达到低致敏效果	[21]
鲤鱼	冷冻	175 W，30 kHz	冻结时间比浸泡冷冻缩短 15.8%	[22]
大黄鱼	冷冻	175 W，20、28、40 kHz	冰晶细小且分布均匀	[23]
鲛鳙鱼	提取	70 min	胶原蛋白提取率升高	[24]
草鱼	腌制	300 W，60 kHz	提升腌制速率	[25]
青鱼	腌制	240 W，40 kHz	促进 NaCl 进入鱼肉组织	[26]
小黄鱼	解冻	200 W，43 kHz	有效维持鱼肉品质	[27]

期等目的[28]。其中，Zhao 等[11]研究发现，鲭鱼片经 550 W、25 kHz 超声波处理 10 min 后，其嗜冷细菌和嗜温细菌的数量分别减少了 0.32、0.30 个对数值；周大鹏等[12]研究表明，鲈鱼片经 600 W、20 kHz 超声波处理 10 min 后，其在冷藏贮藏 8 d 时的菌落总数仍低于 10^7；Pedrós–Garrido 等[13]使用频率为 30 kHz、功率密度为 51.41 W/L 的超声波处理鲑鱼 45 min，发现其嗜冷细菌和嗜温细菌的数量分别减少了 1.5、1.1 个对数值。超声波不仅具有杀菌作用，还能通过机械振动改变微生物被膜对水产品的黏附性，抑制微生物附着在水产品表面，达到灭菌的目的[29]。

2.2　钝酶

水产品具有丰富的内源酶，水产品死后无法对体内内源酶进行调控。生物膜破裂会导致酶的释放，使水产品中的蛋白质发生自溶，影响其肌肉组织结构，加速了水产品的腐败[30]。超声波导致水分子裂解所产生的自由基与氨基酸残基相互作用，可对酶活性造成影响[31]。其中，王军等[14]采用超声波辅助酶解鲶鱼肉时发现，当超声功率超过 300 W 时可破坏部分胰蛋

白酶的分子构象，使胰蛋白酶活力下降；田雅清等[15]研究发现，采用 440~600 W 超声波处理近江牡蛎 20 min 后，其内源酶活力呈下降趋势；黄湛媛等[16]利用超声波对竹节虾头进行处理时发现，当超声频率高于 25 kHz 时，中性蛋白酶构象会发生变化，导致酶活性降低。

2.3　蛋白质改性

超声波处理技术作为一种绿色、节能的新兴技术，能提高食品的功能特性和生物活性，在蛋白质领域的应用愈发广泛。研究表明，超声波处理所造成的高温高压能破坏蛋白质分子的氢键、二硫键或分子间的相互作用力，影响蛋白质的凝胶性、溶解性、起泡性、乳化性等功能特性[32]。李长乐等[17]研究表明，鲤鱼的肌原纤维蛋白经频率为 20 kHz、振幅为 40%的超声波处理 12 min 后，其溶解度从 4.54%增至 48.49%，乳化性也相应增强。常海霞[18]利用 20 kHz 超声波对草鱼肌原纤维蛋白进行处理，其乳化性在 480 W 下超声 20 min 时相对最佳，起泡性在 400 W 下超声 3 min 时提高了 35%，其凝胶强度在 600 W 下超声 12 min 时达到最大值。同时，空化效应产生的微射流和微湍流会导致肌内膜和肌束膜出现裂痕，破坏胶原纤维的物理结构，对改善肌肉嫩度具有积极影响[33]。Chang 等[19]将军曹鱼生鱼片置于 60 kHz、4 W/mL 超声波浴中进行嫩化处理，鱼片在 60 min 和 90 min 时硬度最佳。这种嫩化作用主要由肌原纤维蛋白结构的机械断裂、胶原大分子的断裂，以及蛋白质和其他化合物的迁移引起的[34]。此外，高强度超声波可改变水产品中过敏原的二级或三级结构，降低其致敏性。Zhang 等[20]采用 800 W、20 kHz 超声处理秀丽白虾 15 min 后发现，高强度超声波能诱导原肌球蛋白构象的变化，提高其消化率，并降低致敏性。Dong 等[21]研究表明，采用高强度超声波（400 W、20 kHz）处理南美白对虾 20 min 可达到低致敏效果，原肌球蛋白减少了 76%。由此可见，超声波可改善蛋白质的功能特性，提高水产品的附加值。

2.4　传热传质性能

超声波所产生的冲击波、声冲流会加快体系间的湍动和颗粒的冲撞，强化传质过程[35]。在辅助水产品冷冻时，超声波可利用其空化效应使溶液的微观混合时间缩短、传质速率增加及过饱和浓度降低，减少诱导时间，增加成核速率，缩小颗粒尺寸[36]。Sun 等[22]研究表明，采用 30 kHz 超声波冷冻处理鲤鱼 9 min 后发现，当超声功率为 175 W 时，鲤鱼的冻结时间比浸泡冷冻时间缩短了 15.8%，保持了鲤鱼肌肉组织的完整性。Ma 等[23]对大黄鱼进行超声波辅助冷冻处理后发现，多频超声辅助冷冻能显著加快大黄鱼的冷冻速度，其中三重超声（175 W，20、28、40 kHz）辅助冷冻的冻结速度相对最快，形成的冰晶细小且分布均匀，能较好地保持鱼的品质。采用超声波辅助提取时，物料细胞的破坏程度随着超声作用的增强而增加，促进了目标物质的释放和溶剂之间的传质，提高了提取效率[37]。王锡念等[24]在提取鲛鳙鱼皮胶原蛋白时采用超声波辅助技术，结果表明，胶原蛋白的提取率会随着超声时间的延长而升高，在超声时间为 70 min 时达到最大值。

在辅助腌制时，超声波可通过提高盐的扩散系数增强渗透过程中的传质作用，加快腌制速度[38]。高凯日等[25]研究表明，采用超声（300 W，60 kHz）腌制草鱼比干腌、湿腌等方式具有更快的腌制速度。王逸鑫等[26]采用超声（240 W，40 kHz）对青鱼进行辅助腌制时发现，当腌制时间为 90 min 时，鱼肉中 NaCl 的质量分数达到 2.45%，而普通腌制方法使鱼肉中 NaCl 的质量分数达到 2.5%需要 3 h。由此说明，超声波辅助腌制能促进 NaCl 进入鱼肉组织，提高其腌制速率。

解冻是一个耗时的过程，次优的解冻会加速水产品理化变化和微生物生长的进程，导致水产品的品质下降[39]。马翼飞等[27]研究发现，对于普通冻结和液体浸渍快速冻结处理的小黄鱼，采用超声波技术解冻能有效维持解冻后鱼肉的质构、色泽和保水性。由此可知，超声波可通过热效应促进传热过程，辅助冷冻水产品的解冻，提高解冻速率，改善解冻稳定性，并能减小水产品品质下降的程度。综上所述，超声波可通过促进传质或传热作用在水产品结晶、腌制、提取等方面表现出积极影响。

3　存在问题与解决方法

超声波处理技术在水产领域中已得到部分应用，但有研究显示，单独使用超声波处理技术难以达到理想的加工效果，且长时间对食品使用大功率超声波易受到空化效应引起的负面影响，导致营养物质的流失[40]。由此，研究超声波处理技术有必要集中在与其他处理方式进行优化组合方面。超声波处理与不同加工方法相结合，可减少各种加工操作所需时间，提高水产品的品质，提升加工效率，并延长水产品的货架期。

3.1　超声波组合处理增强杀菌效果

虽然超声波对水产品有一定的杀菌效果，但杀菌效果无法达到产业化程度。超声波协同热、高压或抑菌剂进行处理，能发挥自身空化效应与其他杀菌方式的作用机制，改变微生物细胞的完整性，提升杀菌效率，延长水产品的货架期。Condón–Abanto 等[41]对爱尔兰黄金蟹肉进行加压（100 kPa）、加热（35~95 ℃）和超声（2 000 W，20 kHz）处理时发现，采用三者

联合处理具有协同效应，能有效杀灭蟹肉中的产孢细菌。此外，臭氧[42]、壳聚糖[43]等抑菌剂协同超声波处理时可明显减缓细菌的生长速度。这是由于超声波的传质促进作用使抑菌剂加快了向水产品中扩散的速度。由此可见，超声波处理技术可作为一种辅助手段与其他杀菌方式联用，以增强杀菌效果，降低使用能耗。

3.2 超声波组合处理提升提取效率

超声波在辅助提取方面显示出良好的发展前景，但无论是超声浴还是探针型系统辅助提取，都需要较大的超声强度才能达到预期的提取效果，而高强度超声会导致换能器的劣化[44]，因此，有必要将研究转向提高工艺效率和空化程度上。目前，已有许多研究将超声波技术与其他处理技术联用，这不仅可弥补超声辅助提取的不足，还能避免高强度超声导致的空化程度降低。超声波组合技术在水产品提取领域中一般以超声波协同酶法[45]、有机溶剂[46]为主，均能促进目标产物的提取，证明其他处理方式能与超声波的作用机制表现出协同作用。此外，超声波结合微波辅助提取技术是一种快速有效的组合提取方式。超声波的空化效应对细胞壁的破坏可使样品中的可溶性化合物增强传质运动，同时整个样品被微波迅速加热，会触发溶解分子的运动，目标提取成分的含量也随之提升[47]。超声波也可协同静电场提取目标产物，减少能源消耗，强化空化效应[48]。上述 2 种组合提取方式多用于加快植物源提取物的提取速度，在水产品加工领域中鲜有报道。缺乏相关报道的原因可能是水产品结构较为复杂，可通过超声波作用机理，探究超声波处理技术结合其他处理方式的可行性。

3.3 超声波组合处理缩短干燥时间

由于大规模工业化干燥设备的缺乏，因此超声波辅助干燥仍处于实验阶段。超声波结合热风、热泵、真空冷冻、渗透脱水等处理方式表现出明显的强化作用，对工业化应用的发展具有推动意义[49]。相关研究显示，采用超声波协同热处理能有效节约能耗，而与渗透方式结合能增加物料表面微孔的数量，促进物料内部自由水的迁移和扩散[50]。目前，对超声波干燥水产品的研究主要集中在与热处理的结合上。其中，Olvera–Ríos 等[51]利用超声波结合热风处理对罗非鱼进行脱水，发现超声波（130 W、40 kHz）处理 15、30 min 后分别使其在风速为 1.3 m/s、温度为 35 ℃条件下的脱水时间减少了 18.7%、19.2%；Bantle 等[52]研究表明，采用超声波（25 W/kg）与热泵联合处理，在 20 ℃下干燥挪威鳕鱼可减少其与干燥空气间的传质阻力，增加扩散特性，使干燥时间缩短 43%。由此可见，超声波与其他处理方式的协同作用能加快干燥进程，减少干燥过程对超声设备的依赖性。

3.4 超声波组合处理保持食品品质

尽管超声波辅助冷冻能缩短冷冻时间，但随着超声功率的增大和作用时间的延长，热效应反而会使食品的冻结速率减慢，晶体体积增大，从而降低食品的品质[53]。侯睿[54]发现，将水溶性大豆多糖添加至超声波（300 W）冻藏的草鱼鱼糜中能进一步减少蛋白质的变性现象。Rodriguez–Turienzo 等[55]研究发现，超声波（820 W、35 kHz）冷冻大西洋鲑鱼再经乳清蛋白涂抹后，其脂肪的氧化速率明显下降。对超声波功率要求较高的问题也影响着超声波的产业化应用，而多频超声波或其他处理方式与超声波结合可有效保持水产品的品质，进一步解决超声波单一处理时功率要求较高的问题。其中，Cai 等[56]利用超声波（400 W、40 kHz）分别结合微波（300 W、2.45 kHz）和远红外（300 W）解冻红姑鱼时发现，2 种组合的解冻方式均能保持肌肉蛋白质的稳定性，保留肌肉的纤维结构，较好地保持鱼片的品质。Zhao 等[57]采用超声波处理大黄鱼的结果显示，与单频（20 kHz）或三频（20、28、40 kHz）超声波相比，双频（20、28 kHz）超声波能更好地保持大黄鱼在冷藏（4 ℃）期间的质地特性和水分含量，pH 值和总挥发性盐基氮（TVB–N）值的含量也较低。由此可见，超声波与其他加工方式的协同作用可解决超声波工艺参数设置过高所造成的水产品品质下降等问题。

4 结语

超声波处理技术能充分保留水产品的营养成分，具有效率高、能耗低等优点，符合消费者追求无污染、高质量食品的消费理念。此外，超声波处理技术不仅能节约人力、物力，还不受天气、地域等因素的影响，因此该技术在水产品加工领域中的发展前景广阔。

目前，由于超声波处理技术尚处于起步阶段，未形成系统的加工理论体系，对水产品的相关研究也有所欠缺，因此应加大对超声波处理技术的研究力度，通过研究超声波与其他加工技术的优化组合，综合评价其对水产品特性的影响。相信在不久的将来，随着科研人员对超声波处理技术的持续研究，将有助于促进水产品加工技术的可持续发展，进一步推动我国水产加工业的长效进步。

参考文献：

[1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2021 年中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社, 2021: 17-21.
Bureau of Fishery Administration. 2021 China Fisheries Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 17-21.

[2] 郝可心. 小麦中肽组分及其在加工过程中变化规律研

究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018: 7-8.
HAO Ke-xin. Study of Peptide Components in Wheat and the Change during Processing[D]. Tianjing: Tianjin University of Science and Technology, 2018: 7-8.

[3] CHAKKA A K, SRIRAKSHA M S, RAVISHANKAR C N. Sustainability of Emerging Green Non-Thermal Technologies in the Food Industry with Food Safety Perspective[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112140.

[4] 李立, 孙智慧, 苗卿华, 等. 超高压加工技术在食品工业中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 337-342.
LI Li, SUN Zhi-hui, MIAO Qing-hua, et al. New Research Progress of High Pressure Processing Technology in Food Industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 337-342.

[5] GÓMEZ B, MUNEKATA P E S, GAVAHIAN M, et al. Application of Pulsed Electric Fields in Meat and Fish Processing Industries: An Overview[J]. Food Research International, 2019, 123: 95-102.

[6] 韩格, 陈倩, 孔保华. 低温等离子体技术在肉品保藏及加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 286-292.
HAN Ge, CHEN Qian, KONG Bao-hua. Recent Advances of Application of Cold Plasma Technology in Meat Preservation and Processing[J]. Food Science, 2019, 40(3): 286-292.

[7] 李子龙. 紫外杀菌对猕猴桃汁品质的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014: 3-7.
LI Zi-long. The Effects of Ultraviolet Sterilization on Quality of Kiwifruit Juice[D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014: 3-7.

[8] 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.

[9] LSORIA A C, VILLAMIEL M. Effects of Ultrasound on the Technological Properties and Bioactivity of Food: A Review[J]. Trends in Food Science and Technology, 2010, 21(7): 323-331.

[10] KHADHRAOUI B, UMMAT V, TIWARI B K, et al. Review of Ultrasound Combinations with Hybrid and Innovative Techniques for Extraction and Processing of Food and Natural Products[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105625.

[11] ZHAO Yi-ming, OLIVEIRA M, BURGESS C M, et al. Combined Effects of Ultrasound, Plasma-Activated Water, and Peracetic Acid on Decontamination of Mackerel Fillets[J]. LWT-Food science and technology, 2021, 150: 111957.

[12] 周大鹏, 蓝蔚青, 莫雅娴, 等.超声前处理对冷藏海鲈鱼品质及蛋白质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 204-211.
ZHOU Da-peng, LAN Wei-qing, MO Ya-xian, et al. Effects of Ultrasound Pretreatment on the Quality and Protein Characteristics in Japanese Sea Bass (*Lateolabrax Japonicas*) during Refrigeration[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 204-211.

[13] PEDRÓS-GARRIDO S, CONDÓN-ABANTO S, BELTRÁN J A, et al. Assessment of High Intensity Ultrasound for Surface Decontamination of Salmon (*S Salar*), Mackerel (*S Scombrus*), Cod (*G Morhua*) and Hake (*M Merluccius*) Fillets, and Its Impact on Fish Quality[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 41(5): 64-70.

[14] 王军, 王忠合, 王晓丽. 超声波辅助酶解鲶鱼肉制备抗氧化肽及其活性评定[J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 197-201.
WANG Jun, WANG Zhong-he, WANG Xiao-li. Preparation of Antioxidant Peptides from Catfish Flesh by Ultrasonic-Assisted Enzymatic Hydrolysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(21): 197-201.

[15] 田雅清, 郑华, 林捷, 等. 近江牡蛎的超声波辅助自溶及酶解条件研究[J]. 水产科学, 2015, 34(7): 438-443.
TIAN Ya-qing, ZHENG Hua, LIN Jie, et al. Optimization of Ultrasound-Assisted Autolysis and Exogenous Hydrolysis in Jinjiang Oyster (*Crassostrea Rivularis*)[J]. Fisheries Science, 2015, 34(7): 438-443.

[16] 黄湛媛, 李丽, 熊宇飞, 等. 超声辅助竹节虾头酶解及抗氧化肽分离研究[J]. 核农学报, 2017, 31(8): 1556-1566.
HUANG Zhan-yuan, LI Li, XIONG Yu-fei, et al. Study on Ultrasound-Assisted Enzymatic Hydrolysis of *Penaeus Japonicus* Head and Separation of the Antioxidant Peptides[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(8): 1556-1566.

[17] 李长乐, 王琛, 郭全友, 等. 超声波、超高压处理对鲣鱼肌原纤维蛋白功能性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(7): 96-101.
LI Chang-le, WANG Chen, GUO Quan-you, et al. Effect of Ultrasonic and Ultrahigh Pressure on the Functional Properties of Skipjack Myofibrillar Protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(7): 96-101.

[18] 常海霞. 超声波技术对草鱼肌原纤维蛋白营养和结构性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2015: 20-56.
CHANG Hai-xia. Effect of Ultrasound Pre-treatment on the Nutrition and Structure Properties of Myofibrillar Protein[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015: 20-56.

[19] CHANG H C, WONG R X. Textural and Biochemical Properties of Cobia (*Rachycentron Canadum*) Sashimi Tenderized with the Ultrasonic Water Bath[J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1340-1345.

[20] ZHANG Zi-ye, ZHANG Xiao-feng, CHEN Wei, et al. Conformation Stability, in Vitro Digestibility and Allergenicity of Tropomyosin from Shrimp (*Exopalaemon Modestus*) as Affected by High Intensity Ultrasound[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 997-1009.

[21] DONG Xin, WANG Jin, RAGHAVAN V. Effects of High-Intensity Ultrasound Processing on the Physio-

chemical and Allergenic Properties of Shrimp[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020, 65: 102441.

[22] SUN Qin-xiu, ZHAO Xin-xin, ZHANG Chao, et al. Ultrasound-Assisted Immersion Freezing Accelerates the Freezing Process and Improves the Quality of Common Carp (*Cyprinus Carpio*) at Different Power Levels[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108: 106-112.

[23] MA Xuan, MEI Jun, XIE Jing. Effects of Multi-Frequency Ultrasound on the Freezing Rates, Quality Properties and Structural Characteristics of Cultured Large Yellow Croaker (*Larimichthys Crocea*)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105657.

[24] 王锡念, 徐志善, 孙钦军, 等. 超声波辅助酶解提取鲛鳙鱼皮胶原蛋白的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 175-180.
WANG Xi-nian, XU Zhi-shan, SUN Qin-jun. Optimization of Ultrasonic Assisted Enzymatic Extraction of Collagen from Fish Skin of *Lophiiformes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 175-180.

[25] 高凯日, 林琳, 陆剑锋, 等. 不同腌制处理对草鱼肉理化性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(18): 21-28.
GAO Kai-ri, LIN Lin, LU Jian-feng, et al. Effects of Different Curing Treatments on Physical and Chemical Properties of Grass Carp Meat[J]. Food Research and Development, 2020, 41(18): 21-28.

[26] 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.
WANG Yi-xin, WU Han, HUANG Hai-yuan, et al. Effect of Ultrasonic-Assisted Pickling on the Quality of Black Carp (*Mylopharyngodon Piceus*) Picked Products[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22): 142-146.

[27] 马翼飞, 刘欢, 单钱艺, 等. 不同解冻方式对小黄鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 222-228.
MA Yi-fei, LIU Huan, SHAN Qian-yi, et al. Effect of Different Thawing Methods on the Quality of Little Yellow Croaker[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(1): 222-228.

[28] JOYCE E, PHULL S S, LORIMER J P, et al. The Development and Evaluation of Ultrasound for the Treatment of Bacterial Suspensions. A Study of Frequency, Power and Sonication Time on Cultured *Bacillus* Species[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(6): 315-318.

[29] YU Hang, LIU Yang, LI Lu, et al. Ultrasound-Involved Emerging Strategies for Controlling Foodborne Microbial Biofilms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 91-101.

[30] 赵誉焜. 多糖衍生物合成及在水产品保水保鲜应用[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019: 9-11.
ZHAO Yu-kun. Synthesis of Polysaccharide Derivatives and the Application in Aquatic Product Preservation[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019: 9-11.

[31] ISLAM M N, ZHANG M, ADHIKARI B. The Inactivation of Enzymes by Ultrasound-A Review of Potential Mechanisms[J]. Food Reviews International, 2014, 30(1): 1-21.

[32] 荆卉, 孙俊, 牟瑶瑶, 等. 超声波物化效应及其对蛋白质改性的应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 321-330.
JING Hui, SUN Jun, MU Yao-yao, et al. Research Advance in Physicochemical Effect of Ultrasonic and Its Application in Protein Modification[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 321-330.

[33] PEÑA-GONZALEZ E, ALARCON-ROJO A D, GARCIA-GALICIA I, et al. Ultrasound as a Potential Process to Tenderize Beef: Sensory and Technological Parameters[J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2019, 53: 134-141.

[34] STADNIK J, DOLATOWSKI Z J, BARANOWSKA H M. Effect of Ultrasound Treatment on Water Holding Properties and Microstructure of Beef (*M Semimembranosus*) during Ageing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 41(10): 2151-2158.

[35] 张孟磊, 宋浩, 郑成航, 等. 超声强化浸出废加氢催化剂中的有价金属研究[J]. 应用化工, 2021, 50(7): 1747-1750.
ZHANG Meng-lei, SONG Hao, ZHENG Cheng-hang, et al. Ultrasound Assisted Enhancement in Leaching of Valuable Metals from Spent Hydrogenation Catalyst[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(7): 1747-1750.

[36] PRASAD R, DALVI S V. Sonocrystallization: Monitoring and Controlling Crystallization Using Ultrasound[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 226: 115911.

[37] 张明, 马飞跃, 杜丽清, 等. 澳洲坚果青皮总酚的超声辅助提取及纯化[J]. 热带作物学报, 2021, 42(7): 2043-2051.
ZHANG Ming, MA Fei-yue, DU Li-qing, et al. Ultrasonic Assisted Extraction and Purification of Total Phenols from Macadamia Green Peel[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(7): 2043-2051.

[38] 刘芝君. 川味腊肉制作中脂肪氧化酶的作用及微胶囊抗氧化研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020: 1-2.
LIU Zhi-jun. Study on Effect of Lipoxygenase and Microcapsule Antioxidation in the Production of Sichuan Bacon[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020: 1-2.

[39] KIM T H, CHOI J H, CHOI Y S, et al. Physicochemical Properties of Thawed Chicken Breast as Affected by Microwave Power Levels[J]. Food Science and Biotechnology, 2011, 20(4): 971-977.

[40] YUAN Shao-feng, LI Chang-jian, ZHANG Yi-chi, et al. Ultrasound as an Emerging Technology for the Elimination of Chemical Contaminants in Food: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109:

374-385.

[41] CONDÓN-ABANTO S, ARROYO C, ÁLVAREZ I, et al. Application of Ultrasound in Combination with Heat and Pressure for the Inactivation of Spore Forming Bacteria Isolated from Edible Crab (*Cancer Pagurus*)[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 223: 9-16.

[42] WANG Lan, SHI Liu, JIAO Chun-hai, et al. Effect of Ultrasound Combined with Ozone Water Pretreatment on the Bacterial Communities and the Physicochemical Properties of Red Swamp Crayfish Meat (*Procambarus Clarkii*)[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(10): 1778-1790.

[43] YU Da-wei, ZHAO Wen-yu, YANG Fang, et al. A Strategy of Ultrasound-Assisted Processing to Improve the Performance of Bio-Based Coating Preservation for Refrigerated Carp Fillets (*Ctenopharyngodon Idellus*)[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128862.

[44] WEN Le, ZHANG Zhi-hang, SUN Da-wen, et al. Combination of Emerging Technologies for the Extraction of Bioactive Compounds[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(11): 1826-1841.

[45] 万丽娟，熊磊，李敏，等. 超声辅助酶提鳙鱼鱼鳞胶原蛋白的工艺和表征[J]. 食品工业，2017，38(11): 9-13.
WAN Li-juan, XIONG Lei, LI Min, et al. Process and Characterizations of Collagen Extracted from *Aristichthys Nobilis* Scales by Ultrasonic-Assisted Enzymatic Hhydrolysis[J]. Food Industry, 2017, 38(11): 9-13.

[46] 张莉莉，温淑媚，高静.超声辅助双连续型离子液体微乳液提取南极磷虾壳中的虾青素[J]. 中国食品学报，2021, 21(9): 130-141.
ZHANG Li-li, WEN Shu-mei, GAO Jing. Extraction of Astaxanthin in Antarctic Krill Shell by Ultrasonic-Assisted Bicontinuous Ionic-Liquid-Based Microemulsion[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 130-141.

[47] SINGLA M, SIT N. Application of Ultrasound in Combination with Other Technologies in Food Processing: A Review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105506.

[48] 耿琳琳. 超声协同静电场提取黄花菜中总黄酮的研究[D]. 广州：华南理工大学, 2017: 7-8.
GENG Lin-lin. Ultrasound-Synergized Electrostatic Field Extraction of Total Flavonoids from *Hemerocallis Citrina Baroni*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 7-8.

[49] 罗登林，苏孟开，杨日福，等. 超声在食品干燥领域中的研究进展[J]. 中国粮油学报，2020，35(5): 188-196.
LUO Deng-lin, SU Meng-kai, YANG Ri-fu, et al. Progress of Food Drying Assisted by Ultrasound[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(5): 188-196.

[50] 万芳新，罗燕，李武强，等. 不同预处理方式对枸杞子远红外干燥特性和品质的影响[J]. 中草药，2020, 51(16): 4183-4190.
WAN Fang-xin, LUO Yan, LI Wu-qiang. Effect of Different Pretreatment Methods on Far-Infrared Drying Characteristics and Polysaccharides of Lycium Barbarum[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs[J]. 2020, 51(16): 4183-4190.

[51] OLVERA-RÍOS Y A, ARMANDO-ULLOA J, ROSAS-ULLOA P, et al, Effect of Ultrasound Treatment on Dehydration Kinetics and Physicochemical, Microbiological, Structural and Rehydration Characteristics of Tilapia[J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 31-42.

[52] BANTLE M, EIKEVIK T M. A Study of the Energy Efficiency of Convective Drying Systems Assisted by Ultrasound in the Production of Clipfish[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 217-223.

[53] 吴宇桐，崔梦晗，王宇琦，等. 超声辅助冷冻技术的作用机制及其对食品品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 275-280.
WU Yu-tong, CUI Meng-han, WANG Yu-qi, et al. Mechanism of Ultrasonic-Assisted Freezing Technique and Its Effect on the Quality of Frozen Foods: A Review[J]. Food Science, 2018, 39(17): 275-280.

[54] 侯睿. 水溶性大豆多糖与超声波辅助冷冻协同改善草鱼鱼糜品质的研究[D]. 广州：华南理工大学，2018: 54-67.
HOU Rui. Synergistic Effects of Soluble Soybean Polysaccharide and Ultrasound on Frozen Surimi from Grass Carp[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 54-67.

[55] RODRIGUEZ-TURIENZO L, COBOS A, DIAZ O. Effects of Edible Coatings Based on Ultrasound-treated Whey Proteins in Quality Attributes of Frozen Atlantic Salmon (*Salmo Salar*)[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 14: 92-98.

[56] CAI Lu-yun, ZHANG Wen-di, CAO Ai-ling, et al. Effects of Ultrasonics Combined with Far Infrared or Microwave Thawing on Protein Denaturation and Moisture Migration of Red Drum (*Sciaenops Ocellatus*)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 96-104.

[57] ZHAO Xin-yu, LAN Wei-qing, ZHAI Yu-ting, et al. Multi-Frequency Ultrasound: A Potential Method to Improve the Effects of Surface Decontamination and Structural Characteristics on Large Yellow Croaker (*Pseudosciaena Crocea*) during Refrigerated Storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 79: 105787.

责任编辑：彭颋