

非热加工技术在水产蛋白加工中的应用研究进展

刘颖琳¹, 钟洪亮¹, 杨浩¹, 孙钦秀^{1,2}, 夏秋瑜^{1,2}, 王泽富^{1,2},
韩宗元^{1,2}, 刘阳^{1,2}, 刘书成^{1,2}, 魏帅^{1,2*}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋生物制品工程实验室,
广东省海洋食品工程技术研究中心, 水产品深加工广东普通高等学校重点实验室, 湛江 524088;
2. 大连工业大学, 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 大连 116034)

摘要: 近年来, 非热加工技术在水产品加工领域受到广泛关注。非热加工技术可对水产蛋白进行改性处理, 改善其功能特性, 提高其利用率, 实现其高值化利用, 并可减少热敏性营养物质的损失。与传统热加工相比, 非热加工技术在保障食品安全、保持食品原有的营养和品质等方面表现出了更好的应用前景。本文综述了超声波、超高压、高密度 CO₂、冷等离子体、辐照等非热加工技术在水产蛋白加工中的应用, 并阐述了各种非热加工技术对水产蛋白的高级结构及功能特性的影响, 可为拓宽水产蛋白的加工利用途径提供理论支撑。但是新兴的非热加工技术目前仍处于开发研究阶段, 大规模的工业应用仍需要更多和更深入的研究。

关键词: 非热加工; 超声波; 超高压; 高密度 CO₂; 冷等离子体; 辐照; 水产品; 蛋白质

Research progress on applications of non-thermal processing technologies in aquatic protein processing

LIU Ying-Lin¹, ZHONG Hong-Liang¹, YANG Hao¹, SUN Qin-Xiu^{1,2}, XIA Qiu-Yu^{1,2},
WANG Ze-Fu^{1,2}, HAN Zong-Yuan^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, LIU Shu-Cheng^{1,2}, WEI Shuai^{1,2*}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution, Zhanjiang 524088, China; 2. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

ABSTRACT: In recent years, the applications of non-thermal processing technology have received extensive attention in the field of aquatic product processing. Non-thermal processing technologies have been used to modify aquatic protein, improve its functional characteristics, increase its utilization rate, achieve its high value utilization, and reduce the loss of heat sensitive nutrients. Compared with traditional thermal processing, non-thermal processing technology shows a better application prospect in guaranteeing food safety and maintaining the original nutrition and quality of food. This paper summarized the applications of non-thermal processing technologies in the processing of aquatic protein such as ultrasonic, ultra-high pressure, high-density CO₂, cold plasma, and irradiation, and described

基金项目: 国家自然科学基金项目(32272245)、广东省普通高校重点领域专项(2022ZDZX4014)、国家虾蟹产业技术体系项目(CARS-48)、广东海洋大学博士科研启动项目(R20048)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32272245), the Special Program for Key Field of Guangdong Colleges (2022ZDZX4014), the China Agriculture Research System (CARS-48), and the Doctoral Research Project of Guangdong Ocean University (R20048)

***通信作者:** 魏帅, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋食品保鲜与加工。E-mail: weishuaiws@126.com

***Corresponding author:** WEI Shuai, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China. E-mail: weishuaiws@126.com

the influence of advanced structural and functional properties of non-thermal processing methods on aquatic protein, which would provide theoretical support for expanding the processing and utilization of aquatic protein. However, the emerging non-thermal processing technologies are still in the development or research stage, and large-scale industrial applications still need more in-depth research.

KEY WORDS: non-thermal processing; ultrasonic; ultra-high pressure; dense phase carbon dioxide; cold plasma; irradiation; aquatic products; protein

0 引言

海洋为人类提供了优质蛋白,随着海洋经济和食品加工工业的快速发展,更多的优质水产蛋白被生产加工并利用。鱼、虾、贝等水产品含有人体所必需的氨基酸,易消化,是高价值蛋白质生产的可靠原料^[1-2]。水产蛋白加工方法按原理可分为物理加工、化学修饰和生物处理,其中物理加工方法成本低廉,可广泛应用于食品加工业中,受到较多关注。物理加工方法分为热加工法和非热加工法,热加工法采用热能从高温物体传递到低温物体的原理,使食品逐渐受热。但长时间的热处理会破坏蛋白质并引起食品营养、风味及理化性质等的不利变化^[3]。因此,找寻较低温度的加工方式如非热加工技术,在减少食品自身品质和风味等损失的同时,实现食品加工,已成为新的研究热点^[4]。

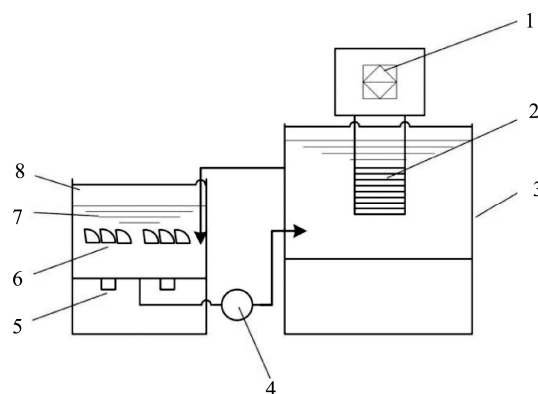
近年来,超声波、超高压、高密度 CO₂、冷等离子体、辐照等非热加工技术被用于食品加工^[5]。与传统加工技术相比,非热加工技术可以在温和的条件下起到杀菌、钝酶、降低水产蛋白致敏性等作用,而且可最大限度保持食品的色、香、味等感官特性和食用品质^[6-8]。另外,非热加工技术还可实现对水产蛋白的改性,改善其功能特性,提高其利用率,实现其高值化利用^[9-10]。已有报道从物理方法、酶法和化学法等方面对水产蛋白结构和功能特性进行论述^[11-12],尚缺少关于新型食品非热加工技术在水产蛋白领域的综述。因此,本文从超声波、超高压、高密度 CO₂、冷等离子体、辐照等非热加工技术切入,综述以上技术在加工过程中对水产蛋白结构及性能的影响,分析非热加工方法在水产蛋白中的应用现状及前景,为拓宽水产蛋白的加工利用途径提供理论支撑,促进非热加工技术在水产蛋白加工中的更广泛应用。

1 超声波技术

1.1 超声波简介

超声波是指频率超过人类听觉阈值(20 kHz)的一种弹性机械波,它在弹性介质中传播时,具有频率高、波长短、功率大、穿透力强等特点。超声处理所产生的空化效应、剪切效应、热效应、微扰作用和机械作用等可引起生物结构的物理化学变化,已被用于食品工业中的杀菌、腌制、液体乳化和均质等过程^[13]。超声技术可改善物料的凝胶等

物理化学性质,提高产品质量并延长产品保存期^[14]。图 1 为动力超声设备系统示意图^[15]。超声设备简单、易于放大、安全性能高,具有能耗低等优点,在食品加工过程中有着化学处理和热处理无法替代的优势,如无需添加任何化学试剂或其他添加剂,具有良好辅助加工效果,有利于绿色食品工业发展等^[16]。



注: 1. 控制面板为超低温水浴; 2. 热交换器; 3. 超低温水浴;
4. 耐低温循环泵; 5. 超声波换能器; 6. 样品;
7. 冷却介质; 8. 超声波水箱。

图 1 动力超声设备系统^[15]

Fig.1 Power ultrasound equipment system^[15]

1.2 超声波对水产蛋白高级结构的影响

蛋白质的二级结构主要包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲结构。在超声波作用过程中,空化效应产生的瞬时高温、高压可破坏蛋白分子间的相互作用力,使蛋白空间舒展,从而使蛋白质空间结构发生变化^[17-18]。YU 等^[19]将贻贝蛋白在 20 kHz, 200、400、600 W 条件下分别处理 18 min 和 36 min,发现蛋白的 α -螺旋含量升高, β -折叠和 β -转角的含量下降,表明超声波处理会引起贻贝蛋白二级结构的改变,呈现出从无序到有序的转变。DONG 等^[20]采用 20 kHz, 400 W 处理对虾原肌球蛋白,发现 α -螺旋和 β -折叠含量升高, β -转角含量降低。LI 等^[21]采用超声处理(100、300 和 500 W, 20 kHz, 60 min 振幅 60%)对虾肌原纤维蛋白,也发现 β -折叠含量显著提高, β -转角和无规则卷曲结构没有明显的变化趋势,但 α -螺旋含量显著降低。超声过程中机械作用产生的剪切力破坏了蛋白质分子之间的相互作用,影响了蛋白质分子内部结构,引起的二级结构

含量变化的差异可能与蛋白质的种类和超声波的处理条件有关^[22]。MA 等^[23]采用超声(400、600、800、950、60 W, 2 kHz, 2 min)预处理鳕鱼蛋白, 发现内部侧链暴露和蛋白质分子重新折叠暴露了更多的色氨酸残留物, 导致微环境的非极性增加, 诱导了蛋白质分子的构象变化。因此, 蛋白质二级结构可能受到超声强度、时间和频率的影响而发生不同的变化, 经空化诱导的超声处理后表现出更松散、更灵活的结构。二级结构是三级结构的基础, 若其发生变化, 三级结构可能也会受到影响。例如, 马涛等^[24]发现超声波处理三文鱼可使其过敏原蛋白分子由折叠到伸展, 导致其疏水区域产生和暴露, 在超声波处理下蛋白质的三级结构有不同程度的改变。

1.3 超声波对水产蛋白功能特性影响

超声波具有绿色、耗能低、效率高等优点, 能有效改善水产蛋白的功能特性, 其在水产蛋白领域中的研究和应用备受关注。一些研究显示超声波处理可以有效提高水产蛋白的凝胶持水性、溶解性、乳化性、发泡性等(表 1)。分

析发现, 影响水产蛋白功能特性的因素主要有: (1)超声处理频率和功率; (2)处理时间; (3)处理温度; (4)水产蛋白种类; (5)能量输入; (6)是否与其他技术或物质协同作用。HAO 等^[25]发现随着超声波功率的增加, 肌原纤维蛋白凝胶持水性先增加后减少, 在 600 W 时达到峰值。李长乐^[26]也得出类似结论, 在 200~300 MPa 时肌原纤维蛋白的溶解度与乳化性出现最大值。为提高超声波对水产蛋白功能特性的影响效果, 许多研究者将其与保水剂、氯化钠、酸处理等方式联合。如 CHENG 等^[33]用不同功率超声辅助冷冻联合海藻酸钾(作为保水剂)处理大黄鱼, GAO 等^[34]探讨超声波与 NaCl 联合处理的鲢鱼肌球蛋白凝胶特性影响, 以及邹倩^[35]研究 400 W 超声波辅助不同添加量没食子酸对海鲈鱼肌原纤维蛋白的影响, 均表明联合处理可有效改善蛋白质功能特性。目前超声波技术在水产蛋白上的应用仍处于起步阶段, 为增强超声波对水产蛋白功能特性的有效影响, 需探索合适的处理条件或者与其他物质(技术)联合作用, 以提高水产蛋白深加工的附加价值和潜力。

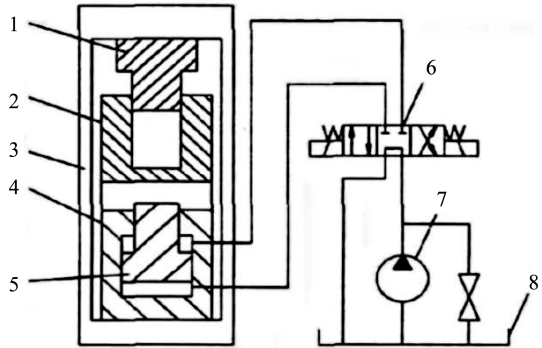
表 1 超声波对水产蛋白功能特性的影响
Table 1 Effects of ultrasound on aquatic protein functional properties

研究对象	处理条件	影响	参考文献
鳗鱼	0~1000 W	肌原纤维蛋白凝胶持水性、硬度和咀嚼性增加	[25]
鲤鱼	100、200、300、400、500 MPa, 0、3、6、9、12 min	肌原纤维蛋白的溶解度与乳化性显著提高	[26]
鲢鱼	120~240 W, 0~30 min, 0~3.0%盐	肌球蛋白溶解度的增加, 持水能力显著提高, 减少鱼糜凝胶的蒸煮损失	[27]
南美白对虾	20 kHz, 400 W, 5、10、15、10 min	肌原纤维蛋白凝胶强度和持水能力逐渐增强	[28]
贻贝	0、150、300、450、600 W	肌原纤维蛋白稳定乳液 Zeta 电位升高, 稳定性提高	[29]
扇贝	0、100、125、150、175、200 W	肌原纤维蛋白的硬度、咀嚼性、弹性增加	[30]
鱿鱼	20 kHz, 20%、40%振幅, 0、1、3、5 min	鱿鱼蛋白黏度增加, 进而增加了发泡性能	[31]
海鲈鱼	320 W, -20℃	肌原纤维蛋白溶解度提高	[32]

2 超高压技术

2.1 超高压简介

超高压技术是一种纯物理冷加工技术, 指把诸如鱼肉之类的材料放入耐高压的铸铁容器中, 以液体介质(如甘油、水等)作为传压介质, 施加压力并保持一定的时间, 使蛋白质等高分子结构的非共价键发生改变, 从而使水产蛋白改性。超高压技术具有耗能少、操作简单、耗时短等优点, 在食品品质、安全、营养等方面发挥重要作用^[36]。图 2 为超高压设备简图^[37], 在加工过程中物料受压均匀, 可用于加工不同大小形状的物料^[38]。



注: 1. 高压缸盖; 2. 灭菌缸; 3. 承压框架; 4. 增压缸; 5. 增压活塞; 6. 换向阀; 7. 液压泵; 8. 油箱。

图 2 分体式内部加压装置
Fig.2 Split internal pressurizing device

2.2 超高压对水产蛋白高级结构的影响

超高压处理可以解离、破坏水产蛋白质的离子键、氢键、疏水键等非共价键，从而改变蛋白质的二级结构，其三、四级结构在受到力的作用下也会发生改变，进而影响蛋白质的功能性质^[39]。蛋白质结构与超高压处理压力有关，在压力的作用下，蛋白质受到挤压，分子间的相互作用力或非共价键受到破坏， α -螺旋结构相对含量减少， β -折叠、 β -转角和无规则卷曲结构增加，导致蛋白质结构发生变化^[40-41]。有研究显示，在压力大于 100 MPa 时，扇贝内收肌蛋白的 α -螺旋中的氢键被打开，转化为 β -折叠，导致二级结构变化^[42]，而在 200 MPa 时，对虾肌原纤维蛋白结构却尚未发生变化^[43]。因此，引起水产蛋白二级结构变化的可能与蛋白质的种类或压力大小有关。蛋白质的三级结构是在二级结构的基础上，氨基酸侧链相互作用形成的构象，主要依靠次级键，包括氢键、疏水键和范德华力^[44]。有一些还依靠二硫键来维持构象。荧光强度和表面疏水性变化可反映蛋白质三级结构的变化，在压力作用下，表面疏水性升高，荧光强度发生变化。ZHANG 等^[45]用超高压技术处理养殖大黄花鱼可导致其小清蛋白的表面疏水性增加，而内源性荧光光谱的红移降低了荧光强度，即经超高压处理后蛋白质粒径减小，形成聚集体，导致三级结构展开。除了非极性共价键力外，共价键力的二硫键在维持蛋白质构象也发挥一定作用。金婧或等^[46]研究发现，在超高压作用下，疏基暴露出来，被氧化成二硫键，进一步改变了蛋白质构象。贺兴禹等^[47]等用超高压处理牡蛎肌原纤维蛋白也得到类似结论。蛋白质的四级结构主要通过疏水相互作用力来维持稳定，而疏水相互作用力对压力比较敏感，超高压处理也会导

致四级结构发生变化^[48]。

2.3 超高压对水产蛋白功能特性影响

超高压技术作为一种绿色的非热加工技术，无需使食品升温即可有效改善水产蛋白的性能，被广泛应用于食品加工生产中。表 2 为超高压处理对鱼、虾、贝类等常见水产品蛋白质功能特性的影响，分析发现，水产蛋白质的类型、施加压力的程度、加工时间和处理温度是超高压过程中的决定性因素，会影响最终蛋白质功能特性。不同的蛋白质类型需采用不同的处理条件，蛋白质功能特性的改变程度也存在差异。例如，金线鲢的弹性在高于 450 MPa 时有所降低^[49]，而红沼泽小龙虾的弹性在大于 200 MPa 时便开始下降^[50]。YU 等^[51]研究发现，在 0~80 MPa 超高压处理下，随着蛋白质空间结构的展开，由于疏水基团的暴露使得贻贝肌原纤维蛋白和油更容易结合，增强了肌原纤维蛋白的乳化性；由于分子间作用力减少使得蛋白质黏弹性降低，发泡性逐渐提高。LIU 等^[56]发现 100 和 200 MPa 处理鲢鱼肌原纤维蛋白 15 min，其硬度和弹性达到最大值，而 300 MPa 时处理 3 min，其硬度和弹性即达到最大值。因此，将超高压技术应用于水产品加工过程中，应根据特定水产品选择相应的超高压处理参数。由表 2 可知超高压处理在水产蛋白的凝胶强度、消化率、保水性等多个方面具有优势，可应用于多种水产品。采用超高压技术处理水产品能有效保留鱼类、贝类等的营养品质并改善其功能特性，是保持水产品营养感官品质、改善水产品加工特性的一种有效的技术方法，在营养更丰富、品质更好的水产制品加工中具有巨大的应用潜力。

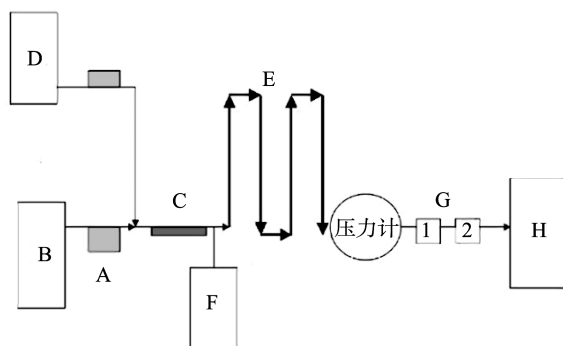
表 2 超高压对水产蛋白的影响
Table 2 Effect of ultra-high pressure on aquatic protein properties

研究对象	处理条件	影响	参考文献
金线鲢	150~600 MPa, 持续 5 min	肌球蛋白凝胶的保水性和结构性能增强，过量的超高压处理显著降低肌球蛋白溶液弹性，过高的压力(≥ 450 MPa)处理降低凝胶效果	[49]
红沼泽小龙虾	0、100、200、300、400 和 500 MPa, 5 min	随着处理压力的增加，肌肉蛋白质的硬度、弹性和咀嚼性值先急剧增加，后略有下降，但均高于对照	[50]
贻贝	0(对照)、20、40、60、80、100 MPa	80 MPa 时，肌原纤维蛋白的乳化活性指数、乳液稳定性指数、起泡能力和起泡稳定性分别提高 14.99 m ² /g, 4.3 min, 17.3% 和 29.7%。100 MPa 时，蛋白质溶解度和持油能力分别提高 7.4%和 1304.6%	[51]
金鲳鱼	100~300 MPa、300 s	随着处理压力增大，鱼肉硬度和弹性显著增加，到 300 MPa 时达到最大	[52]
鳕鱼	25℃下以 20 MPa/min 的速度处理 750 min	肌肉蛋白质的溶解度、消化率有所提高	[53]
扇贝	100~500 MPa, 5 min, (15 $\pm$ 1)℃	内收肌持水能力保持稳定，增加了硬度并降低了其弹性	[54]
南美白对虾	100~500 MPa, 5 min	肌肉的硬度、咀嚼性和回弹性显著提高	[55]
鲢鱼	100、200 和 300 MPa, 3、9、15 min	肌原纤维蛋白凝胶强度、持水能力、咀嚼性和硬度均有所提高	[56]

3 高密度 CO₂

3.1 高密度 CO₂ 简介

高密度 CO₂ (dense phase carbon dioxide, DPCD) 是一种新型的非热加工技术, 是指在间歇、半间歇或连续的设备中, 在 60℃ 以下 5~50 MPa 的压力下进行加工, 利用压力和 CO₂ 的分子效应, 形成高压和高酸环境, 可用于灭菌、钝酶, 能最大限度地保持营养、风味等食品质量特性^[57]。图 3 为连续型 DPCD 设备工作原理图^[58]。与传统热处理方式相比, 高密度 CO₂ 的工作条件较为温和, 具有耗能低、无毒害等优点, 对于热敏性的物质影响较小, 能够较好地保持食品原有品质^[59]。



注: A. 隔膜泵; B. 进样罐; C. 静态混合管道; D. CO₂ 罐;
E. 温控高压回路; F. 空气泵; G(1、2). 温控泄压区;
H. 处理样品出口。

图 3 连续型 DPCD 设备工作原理图

Fig.3 Schematic diagram of continuous DPCD processing

3.2 DPCD 对水产蛋白高级结构的影响

DPCD 处理后会在水产蛋白构象产生不同的影响, 其作用机制可以总结为以下 3 种: (1) CO₂ 分子效应。DPCD 作为疏水溶剂, 与蛋白质结构中疏水性基团反应, 导致疏水性基团暴露, 引起蛋白质结构改变。陈亚励^[60]分别从压力、温度和处理时间 3 方面研究 DPCD 处理对虾肌球蛋白的微观形貌变化, 发现在温度的诱导下, 随着压力的不断增强及压力下的 CO₂ 分子效应, 肌球蛋白展开, β -折叠含量增加, 蛋白质发生聚集, 形成蛋白质聚集体, 但在压力的作用下分子间相互作用力的稳定性下降, 聚集体解离, 导致蛋白质结构改变。(2) DPCD 诱导 pH 降低。DUAN 等^[61]研究发现 CO₂ 与水结合形成碳酸, 进一步解离产生氢离子, 降低蛋白溶液 pH, 通过氢键和质子化与蛋白质发生相互作用, 不耐酸的蛋白质通过氢键和静电斥力相互作用而聚集, 使蛋白质变性。(3) 水产蛋白分子间的相互作用力被破坏。在卸压过程中, CO₂ 的释放破坏了蛋白质与水分子之间非共价键结合的作用力,

导致蛋白质变性和聚集^[62]。根据上述 3 个作用机制, 可以推断由于 DPCD 与水产蛋白之间的相互作用(即氢键、静电斥力和疏水相互作用), 蛋白质的二级和三级结构变得松散, 使蛋白变性和内部疏水基团暴露, 最终导致水产蛋白分子发生聚集和交联。不同的 DPCD 处理条件对水产蛋白高级结构影响情况不同, 可能由一种或几种共同效应引起水产蛋白结构变化。目前 DPCD 技术对蛋白质的作用机制研究处于探索阶段, 其具体的作用模式仍需要进一步深入研究。

3.3 DPCD 对水产蛋白功能特性影响

DPCD 不仅能促进凝胶形成, 而且能有效提高水产蛋白的凝胶强度和持水性, 诱导水产肉糜形成良好的凝胶。ZHENG 等^[63]发现在 DPCD 处理压力为 30 MPa、温度为 55℃、时间为 60 min 时, 虾肉糜凝胶强度较高为 (197.35±2.02) N·mm。与热诱导相比, DPCD 减少虾肉糜凝胶的营养损失和重量损失, 提高了其凝胶的持水能力和凝胶强度。李茹等^[64]研究发现 DPCD 处理温度、压力和时间对金鲳鱼鱼糜凝胶强度有显著影响, 在温度 60℃、压力 30 MPa、处理时间 50 min 时, 鱼糜凝胶强度达到最大值为 128 N·mm。与传统热诱导相比, DPCD 可显著提高鱼糜凝胶的凝胶强度和持水性。孙钦秀等^[65]研究也发现经 DPCD 诱导的虾肉糜凝胶强度和保水性显著高于热诱导。采用 DPCD 处理虾肉糜、鱼肉糜等水产凝胶制品时, 处理的温度、压强、时间以及 CO₂ 浓度都会影响蛋白质的凝胶强度和持水性, 决定着水产蛋白凝胶形成的难易程度。不同的水产蛋白经过 DPCD 处理后, 其所需的处理最佳条件不同, 这与蛋白质种类密切相关。综上所述, 目前 DPCD 在以水产品为原料的凝胶制品加工领域中表现出了较好的应用效果, 但其对水产蛋白起泡性、乳化性等功能特性的研究较少。因此, 探寻不同水产蛋白的最佳 DPCD 处理条件及 DPCD 对水产蛋白除凝胶特性以外的功能特性的影响效果会更有利于 DPCD 在水产食品领域中的发展。

4 冷等离子体

4.1 冷等离子体简介

冷等离子体由诸如光子、离子和电子之类的反应性物质组成, 如正离子和负离子、自由基、中性和受激的分子、电子和电磁波的量子等。冷等离子体可以与食物成分(包括食物蛋白质)发生相互作用, 导致多种类型的反应, 例如氨基酸的二聚化、氧化、脱酰胺、硝化、亚硝化、脱氢和/或羟基化^[66-67]。图 4 为低温等离子体应用于水产蛋白加工的示意图^[68]。冷等离子体技术作为一种新型的食品加工方法, 已被用于加工过程中微生物净化和处理生物材料以及水产食品。

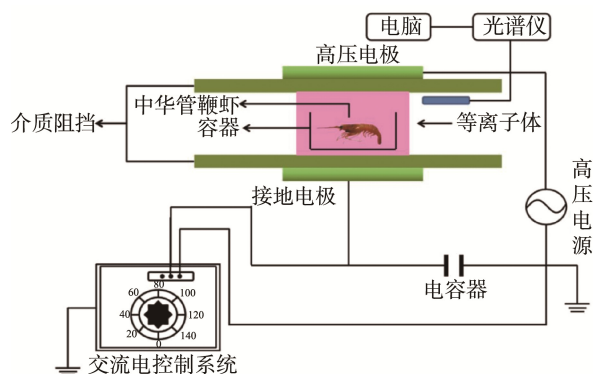


图 4 低温等离子体发生装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the low temperature plasma generator

4.2 冷等离子体对水产蛋白高级结构的影响

目前,冷等离子体技术对水产蛋白的作用机制仍处于探索阶段,但现有研究显示其对水产蛋白的空间结构、螺旋结构及分子结构均有一定的影响。冷等离子体技术中的活性氧、活性氮是蛋白质改性的关键成分,这些成分可以诱导蛋白质结构发生改变,如螺旋结构变化、氨基酸侧链氧化等^[69]。FLORA-GLAD^[70]研究发现,在冷等离子体活性氧和紫外线光子的激发下,pH下降,使凡纳滨对虾肌原纤维蛋白展开, α -螺旋含量开始下降,随着处理时间的增加, α -螺旋结构大量丢失甚至降解, β -结构重排,导致蛋白质二级结构降解。陈姑等^[71]改变低温等离子处理时间(0、1、2、3、4、5 min)和电压(40、50、60、70、80 kV)两个变量来处理罗非鱼,发现随着处理时间的延长和电压的升高,鱼肉 α -螺旋增加, β -转角和 β -折叠减少,无规卷曲无明显变化。罗非鱼肌原纤维蛋白的氧化程度增强,大量活性基团暴露,导致蛋白质的二、三级结构发生变化。由此可见,冷等离子体处理会使蛋白质展开,导致组织微观结构遭到破坏,最终降解成小分子蛋白,这也可能是冷等离子体处理使水产肌原纤维蛋白含量下降的内在原因^[72]。冷等离子体技术处理会导致蛋白质二级结构发生变化,但变化的程度存在差异,可能与蛋白质种类或自身结构特性有关。

4.3 冷等离子体对水产蛋白功能特性影响

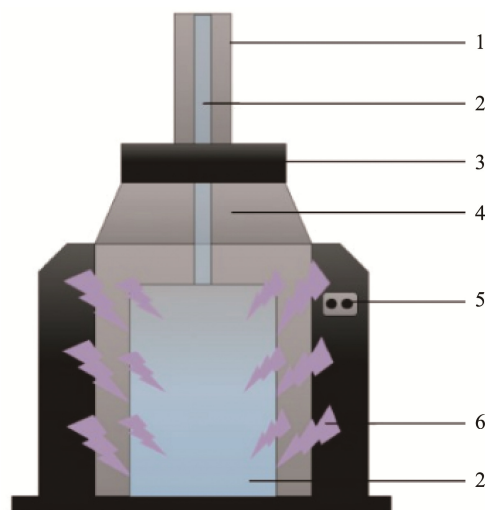
蛋白质的功能特性受内在因素如二级和三级结构、蛋白质表面的亲水/疏水特性和蛋白质的分子刚性/柔韧性和外在因素如pH、离子强度、温度等的影响。OLATUNDE^[73]等采用氩(90%)和氧(10%)混合产生的高压冷等离子体处理亚洲鲈鱼肌原纤维蛋白 5~15 min,发现肌原纤维蛋白总巯基含量增加,总巯基含量降低。其表面疏水性在处理 5 min 时开始增加,而后随着处理时间的增加而降低。经高压冷等离子体处理后的凝胶具有更为有序的纤维网络,处理 5 min 可以增强肌原纤维蛋白中蛋白质的交联,提高凝胶的弹性和强度。FLORA-GLAD^[70]研究了冷等离子体(以空气为

气源)处理时间(0、2、4、6、8、10 min)对南美白对虾肌纤维蛋白的影响,发现冷等离子体处理会使 pH 降低,肌原纤维蛋白的两级和三级结构都发生了变化,蛋白质溶解度下降,粒径增大,浊度增加,起泡能力增强。斯兴开等^[74]用低温等离子体处理草鱼鱼肉,发现与对照组相比,40 kV 处理组蛋白质空间网状结构发生变化,硬度、咀嚼性以及弹性显著提高,黏度和持水性变化不大。低温等离子体处理既保留了草鱼鱼肉的鲜味,又不破坏鱼肉品质。因此,冷等离子体改善水产蛋白的凝胶强度、弹性、起泡性等功能特性的同时能最大程度地避免水产品品质下降。不同的冷等离子体处理类型和处理条件对水产蛋白的影响存在差异,想要获得理想的效果,仍需不断探索不同处理条件对不同水产蛋白的影响效果,进而为实际应用提供可靠的理论依据。

5 食品辐照技术

5.1 食品辐照技术简介

食品辐照技术(food irradiation)是指利用⁶⁰Co、¹³⁷Cs等放射源产生的 γ 射线,或高能电子束和X-射线等电离辐射和紫外线、红外线等非电离辐射处理食品的技术^[75]。图5为 γ -射线装置^[76]。辐射在对食物进行杀菌的过程中,食物温度保持不变,因此食品辐照技术被称为“冷巴氏杀菌”。自20世纪60年代以来,人们对食品的辐照进行了广泛的研究,世界卫生组织、联合国粮食及农业组织和美国农业部等都认为它是安全的^[77]。



注: 1. 装样器; 2. 样品溶液; 3. 屏蔽挡圈; 4. 屏蔽源罐;
5. 样品装载传动按钮; 6. γ -射线。

图 5 γ -射线装置Fig.5 γ -ray device

5.2 食品辐照技术对水产蛋白高级结构的影响

辐照技术利用 γ 射线、电子束射线和X射线等对水产

品进行电离辐射, 由于水产蛋白螺旋结构的变化, 对其空间结构产生主要影响。经过 γ 射线辐照时, 水产蛋白质的非共价键的数量会发生变化, 其肽链也会舒展, 大量活性基团暴露在空间中, 产生大量自由基, 进而对其二级结构产生影响。张晗等^[78]采用不同剂量(1、3、5、7 kGy)的电子束辐照鲈鱼肉, 发现随着辐照剂量的增加, 肌原纤维蛋白的 α -螺旋含量下降, β -折叠含量增加, 辐照剂量越高, 肌原纤维蛋白中的 α -螺旋转化成 β -折叠的速度越快, 致使蛋白质二级结构发生变化。经过辐照后, 肌原纤维蛋白肽链舒展, 包埋在分子内部的活性基团被暴露, 继续增加辐照剂量, 产生的自由基使肌原纤维蛋白氧化加速。除此之外, 也有研究发现 γ 射线辐照处理会使蛋白质凝聚, 形成不溶性的凝聚体, 进而破坏蛋白质空间结构。例如, 李飞^[79]用 ^{60}Co - γ 射线辐照烤鳗, 蛋白质发生凝聚作用, 产生不溶性凝聚体, 导致了蛋白质空间结构发生改变。

5.3 食品辐照技术对水产蛋白功能特性影响

食品辐照技术能够通过改变生物分子的空间构象降低水产蛋白过敏原的稳定性, 可用于加工低敏水产制品。刘光明等^[80]对三疣梭子蟹和中华绒螯蟹的主要过敏原(原肌球蛋白)进行辐照处理, 十二烷基磺酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳结果显示, 部分纯化的蟹类原肌球蛋白经 7 kGy 辐照处理后出现明显降解, 10 kGy 辐照处理后能完全降解。牟慧^[81]采用辐照技术处理虾过敏原, 发现 10 kGy 辐照处理比 7 kGy 辐照处理能够更好地降低其免疫原性, 且辐照与加热综合作用时, 脱敏效果更明显。虽然辐照技术能有效降低水产蛋白过敏原致敏性, 但仍需在国家相关标准规定下使用。目前, 有研究表明高剂量辐照会促使脂肪氧化降解, 产生脂质过氧化物(lipid peroxides, LPO)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)等有害物质, 而高剂量辐照对蛋白质的影响并不明确, 其对水产致敏原蛋白的作用机制还需进一步深入研究^[82]。

辐照技术还能改善水产蛋白的凝胶特性。PANG 等^[83]采用紫外辐照鱼糜凝胶, 与对照相比, 辐照组均表现出致密的微观结构, 凝胶强度和持水能力均有所提高。杨镭等^[84]研究发现电子束辐照有利于提高鱼糜凝胶强度和保水性, 电子束辐照会影响带鱼鱼糜内源性转谷氨酰胺酶的二级结构和活力, 5 kGy 辐照会显著提高转谷氨酰胺酶的活力。电子束辐照可以在不引起有害影响的情况下, 有效提高鱼糜的凝胶性和保水性, 但对于鱼糜的其他功能特性影响尚不清楚, 未来研究工作者可在已有基础上, 不断探究辐照技术对鱼糜功能特性的影响, 拓宽辐照技术在鱼糜食品加工中的应用。

6 结束语

非热加工技术作为一种新型的食品加工技术, 在水

产蛋白加工方面具有一定的优势。非热加工技术可对水产蛋白进行改性处理, 改善其功能特性, 提高水产蛋白的利用率, 提高水产蛋白的高值化利用, 而且可以极大程度抑制维生素等营养物质的损失。目前已经证实了超声波、超高压、高密度 CO_2 、冷等离子体、食品辐照技术等非热处理方法可以有效改性水产蛋白, 达到水产蛋白增值的效果。然而, 这些新兴的非热加工技术尚未完全投入到水产蛋白加工的实际生产应用中, 相关研究的广度和深度都亟待发展, 为非热加工技术在水产蛋白的应用提供更多的理论依据, 例如:

(1) 目前国内外的许多非热加工技术运用于水产蛋白大规模加工仍未实现, 超高压、高密度 CO_2 等非热加工设备仍需要根据蛋白质特性、种类等实际因素进行升级。

(2) 国内外关于单一非热加工技术处理水产蛋白的研究较多, 对联合技术的研究仍在不断探索中。将不同的非热加工方式运用栅栏技术有机地结合, 能最大限度地发挥不同加工技术的优势特点, 从而达到更好的效果。因此需要不断探讨更多不同技术联合应用, 以实现水产蛋白的高值化利用。

(3) 食品辐照和低温等离子体等非热加工技术在水产品中应用的安全性仍需深入研究, 相关产物的安全性评价是未来辐照和低温等离子体等在实际应用中必须解决的问题。

(4) 现有研究结果并不完全一致, 不同的处理条件对水产蛋白的作用机制和功能特性影响存在差异, 需要深入分析各非热加工技术的处理参数, 建立规范的技术标准, 以实现精确高效的工业化生产。

参考文献

- [1] 林善婷, 胡晓, 李来好, 等. 水产蛋白源生物活性肽研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(5): 775-785.
LIN ST, HU X, LI LH, *et al.* Research progress on bioactive peptides derived from fishery proteins: A review [J]. J Dalian Ocean Univ, 2020, 35(5): 775-785.
- [2] 钟洪亮, 黄欣欣, 刘颖琳, 等. 微酸性电解水在肉品及水产品杀菌保鲜中技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 348-355.
ZHONG HL, HUANG XX, LIU YL, *et al.* Research progress of slightly acid electrolyzed water in sterilization and preservation of meat and seafood products [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(9): 348-355.
- [3] HEMANDEZ-HEMANDEZ HM, MORENO-VILET L, VILLANUEVA-RODRIGUEZ SJ. Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel non-thermal processing [J]. Innov Food Sci Emerg, 2019, 58: 102233.
- [4] REZEK JA, DONSI F, PANIWNKY L, *et al.* Impact of novel nonthermal processing on food quality: Sustainability, modelling, and negative aspects [J]. J Food Qual, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2171375>
- [5] EKEZIE F, CHENG JH, SUN DW. Effects of nonthermal food processing technologies on food allergens: A review of recent research advances [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 74: 12-25.

- [6] 朱克庆, 邓奎力, 郁莉萍. 食品非热加工技术在面制主食品中的应用[J]. 粮食加工, 2017, 42(5): 16–18.
ZHU KQ, DENG KL, YU LP. The application of non thermal processing technology in flour food [J]. Grain Process, 2017, 42(5): 16–18.
- [7] 王新, 张焕兰, 邱惠, 等. 对虾原肌球蛋白致敏性消减技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 297–304.
WANG X, ZHANG HL, QIU H, *et al.* Research progress of allergenicity reduction methods targeting shrimp tropomyosin [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(1): 297–304.
- [8] 陈林林, 宋佳琪, 李伟, 等. 非热加工技术对淀粉结构特性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 380–393.
CHEN LL, SONG JQ, LI W, *et al.* Research progress on the effect of non-thermal processing technology on the structural properties of starch [J]. Food Sci, 2023, 44(7): 380–393.
- [9] XUAN XT, CUI Y, LIN XD, *et al.* Impact of high hydrostatic pressure on the shelling efficacy, physicochemical properties, and microstructure of fresh razor clam (*Sinonovacula constricta*) [J]. J Food Sci, 2018, 83(2): 284–293.
- [10] 陈林昀, 李汴生, 阮征, 等. 超高压处理不同水产品的感官品质变化研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(2): 1–7, 36.
CHEN LY, LI BS, RUAN Z, *et al.* Study on sensory quality changes of different aquatic products treated with ultra-high pressure [J]. Chin Cond, 2021, 46(2): 1–7, 36.
- [11] 姜昕, 王锡昌, 潘凤涛, 等. 物理法改善鱼肉蛋白功能特性研究概述[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 288–295.
JIANG X, WANG XC, PAN FT, *et al.* Research progress of physical methods on modifying functional properties of fish meat protein [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(5): 288–295.
- [12] HE S, FRANCO C, ZHANG W. Functions, applications and production of protein hydrolysates from fish processing co-products (FPCP) [J]. Food Res Int, 2013, 50(1): 289–297.
- [13] 王娟娟, 周昌瑜, 王冲, 等. 超声波技术在肉品加工中的应用以及对肉品风味前体物质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 320–323, 335.
WANG JJ, ZHOU CY, WANG C, *et al.* The application of ultrasonic technology in meat processing and its influence on flavor precursors [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(16): 320–323, 335.
- [14] 熊瑶, 李倩如, 刘云祯, 等. 超声波在鱼糜制品中的应用进展[J]. 农产品加工, 2019, (6): 55–58, 61.
XIONG Y, LI QR, LIU YY, *et al.* A review of the effect of ultrasound on the surimi products [J]. Farm Prod Process, 2019, (6): 55–58, 61.
- [15] SHI Z, ZHONG S, YAN W, *et al.* The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. LWT, 2019, 111: 301–308.
- [16] 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 YJ, LU XY, *et al.* Recent advances in the application of ultrasonic technology in the curing of meat products [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(24): 445–453.
- [17] 王思雨. 浅析超声波技术对大豆蛋白改性的影响[J]. 当代化工研究, 2019, 40(4): 19–21.
WANG SY. Influence of ultrasonic technology on modification of soybean protein [J]. Mod Chem Res, 2019, 40(4): 19–21.
- [18] 荆卉, 孙俊, 牟瑶瑶, 等. 超声波物理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 H, SUN J, MU YY, *et al.* Research advance in physicochemical effect of ultrasonic and its application in protein [J]. Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(6): 321–330.
- [19] YU C, WU F, CHA Y, *et al.* Effects of ultrasound on structure and functional properties of mussel (*Mytilus edulis*) protein isolates [J]. J Food Process Pres, 2018, 42(8): e13690.
- [20] DONG X, WANG J, RAGHAVAN V. Effects of high-intensity ultrasound processing on the physicochemical and allergenic properties of shrimp [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2020, 65: 102441.
- [21] LI N, ZHANG KX, DU JY, *et al.* High-intensity ultrasound improved the physicochemical and gelling properties of *Litopenaeus vannamei* myofibrillar protein [J]. Ultrason Sonochem, 2022, 90: 106217.
- [22] YANG X, LI Y, LI S, *et al.* Effects of ultrasound pretreatment with different frequencies and working modes on the enzymolysis and the structure characterization of rice protein [J]. Ultrason Sonochem, 2017, 38: 19–28.
- [23] MA W, WANG J, XU X, *et al.* Ultrasound treatment improved the physicochemical characteristics of cod protein and enhanced the stability of oil-in-water emulsion [J]. Food Res Int, 2019, 121: 247–256.
- [24] 马涛, 王一侠, 刘艳, 等. 超声处理对三文鱼小清蛋白构象及致敏活性的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 160–163.
MA T, WANG YX, LIU Y, *et al.* Effect of ultrasonic treatment on the antigenicity and conformation of salmon parvalbumin [J]. Food Ind, 2017, 38(3): 160–163.
- [25] HAO G, LIN S, JIANG Y, *et al.* Enhancing processed quality of roasted eel with ultrasound treatment: Effect on texture, taste, and flavor [J]. J Food Process Pres, 2022: e16641.
- [26] 李长乐. 不同处理方式对鲑鱼肌原纤维蛋白性质与结构的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
LI CL. The effects of different treatments on myofibrillar protein properties and structure of skipjack [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [27] GAO X, YOU J, YIN T, *et al.* Simultaneous effect of high intensity ultrasound power, time, and salt contents on gelling properties of silver carp surimi [J]. Food Chem, 2023, 403: 134478.
- [28] LI J, DAI Z, CHEN Z, *et al.* Improved gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from frozen shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by high-intensity ultrasound [J]. Food Hydrocolloid, 2023, 135: 108188.
- [29] YU C, LI S, SUN S, *et al.* Modification of emulsifying properties of mussel myofibrillar proteins by high-intensity ultrasonication treatment and the stability of O/W emulsion [J]. Colloid Surface A, 2022, 641: 128511.
- [30] LIU B, LIAO YL, JIANG LL, *et al.* Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the protein structure, physicochemical properties and muscle quality of the bay scallop (*Argopecten irradians*) during frozen storage [J]. Foods, 2022, 11(20): 3247.
- [31] ARREDONDO-PARADA I, TORRES-ARREOLA W, SUAREZ-JIMENEZ GM, *et al.* Effect of ultrasound on physicochemical and foaming properties of a protein concentrate from giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle [J]. LWT, 2020, 121: 108954.
- [32] 孙协军, 时广源, 魏雅静, 等. 超声波辅助冷冻对海鲈鱼肌原纤维蛋白理化性质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(4): 20–24.
SUN XJ, SHI GY, WEI YJ, *et al.* Effect of ultrasonic assisted freezing on physicochemical properties of sea bass myofibrin [J]. Food Ferment Sci Technol, 2022, 58(4): 20–24.
- [33] CHENG H, BIAN C, YU H, *et al.* Effect of ultrasound-assisted freezing combined with potassium alginate on the quality attributes and myofibril structure of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. LWT, 2022, 167: 113869.
- [34] GAO X, YANG S, YOU J, *et al.* Changes in gelation properties of silver carp

- myosin treated by combination of high intensity ultrasound and NaCl [J]. Foods, 2022, 11(23): 3830.
- [35] 邹倩. 超声波辅助没食子酸对海鲈鱼肌原纤维蛋白理化性质与凝胶性能的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
- ZOU Q. Effect of gallic acid by ultrasound on physicochemical properties and gel properties of lateolabrax japonicus myofibrillar protein [D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [36] PATRIGNANI F, LANCIOTTI R. Applications of high and ultra high pressure homogenization for food safety [J]. Front Microbiol, 2016, 7: 1132.
- [37] 徐圣捷, 赵东, 高祥, 等. 超高压食品加工设备现状及发展趋势[J]. 食品工业, 2019, 40(12): 222–225.
- XU SJ, ZHAO D, GAO X, *et al.* Application research of ultra-pressure food processing equipment in food industry [J]. Food Ind, 2019, 40(12): 222–225.
- [38] 曹妍妍, 杨傅佳, 吴靖娜, 等. 超高压技术在水产品贮藏加工应用中的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(18): 6143–6148.
- CAO YY, YANG FJ, WU JN, *et al.* Research progress of ultra-high pressure technology in storage and processing of aquatic products [J]. J Food Saf Food Qual, 2019, 10(18): 6143–6148.
- [39] 郭超凡, 王云阳. 蛋白质物理改性的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(2): 428–433.
- GUO CF, WANG YY. Research progress on physical modification methods of protein [J]. J Food Saf Food Qual, 2017, 8(2): 428–433.
- [40] 李正龙. 超高压技术对鳗鱼原肌球蛋白结构与功能及鱼丸品质的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- LI ZL. Studies on the structure and function of tropomyosin and eel balls quality treated with ultrahigh pressure technology [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.
- [41] 巩雪, 常江, 李丹婷, 等. 超高压对扇贝界面闭壳肌结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 87–93.
- GONG X, CHANG J, LI DT, *et al.* Effect of ultrahigh pressure on the structure of scallop adductor muscle [J]. Food Sci, 2021, 42(13): 87–93.
- [42] GONG X, CHANG J, ZHANG Y, *et al.* Structural changes of the interface material of scallop adductor under ultra-high pressure [J]. Processes, 2023, 11(2): 521.
- [43] ZHU C, CHEN L, ZENG X, *et al.* Effects of ultra high pressure-magnetic field treatment on protein properties and quality characteristics of stored shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) [J]. LWT, 2022, 170: 114070.
- [44] SMITH E, CONDUCT L, ASHTON J, *et al.* Molecular interactions between soybean glycinin (11S) and genistein using spectroscopic and in silico analyses [J]. Food Hydrocolloid, 2023, 139: 108523.
- [45] ZHANG H, LIAO H, LU Y, *et al.* Effects of high hydrostatic pressure on the structural characteristics of parvalbumin of cultured large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. J Food Process Preserv, 2020, 44(12): e14911.
- [46] 金婧璇, 王颖, 吴紫荷, 等. 超高压处理对海湾扇贝柱冷藏保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(2): 16, 36.
- JIN JY, WANG J, WU ZT, *et al.* Effect of ultra-high pressure treatment on chill storage of Argopecten irradians adductor muscle [J]. Food Res Dev, 2023, 44(2): 16, 36.
- [47] 贺兴禹, 沈建, 欧阳杰, 等. 超高压对牡蛎开壳效果及品质变化的影响[J/OL]. 渔业现代化: 1–7. [2023-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1737.S.20230417.0951.006.html>
- HE XY, SHEN J, OU YJ, *et al.* Effects of ultra- high pressure on efficiency and quality of oyster [J/OL]. Fish Mod: 1–7. [2023-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1737.S.20230417.0951.006.html>
- [48] CHEN M, WANG L, XIE B, *et al.* Effects of high-pressure treatments (ultra-high hydrostatic pressure and high-pressure homogenization) on bighead carp (*Aristichthys nobilis*) myofibrillar protein native state and its hydrolysate [J]. Food Bioprocess Technol, 2022, 15(10): 2252–2266.
- [49] WANG J, LI Z, ZHENG B, *et al.* Effect of ultra-high pressure on the structure and gelling properties of low salt golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myosin [J]. LWT, 2019, 100(3): 81–90.
- [50] SHAO Y, XIONG G, LING J, *et al.* Effect of ultra-high pressure treatment on shucking and meat properties of red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*) [J]. LWT, 2018, 87: 234–240.
- [51] YU C, WU F, CHA Y, *et al.* Effects of high-pressure homogenization on functional properties and structure of mussel (*Mytilus edulis*) myofibrillar proteins [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 118: 741–746.
- [52] 张铁涛, 武天明, 徐云升. 超高压处理对金鲳鱼肉品质的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(04): 142–146.
- ZHANG TT, WU TM, XU YS. Effects of ultrahigh pressure on the quality of golden pomfret meat [J]. Food Ind, 2022, 43(04): 142–146.
- [53] ZHANG Y, BI Y, WANG Q, *et al.* Application of high pressure processing to improve digestibility, reduce allergenicity, and avoid protein oxidation in cod (*Gadus morhua*) [J]. Food Chem, 2019, 298(15): 125087.
- [54] ZENG X, JIAO D, YU X, *et al.* Effect of ultra-high pressure on the relationship between endogenous proteases and protein degradation of yesso scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) adductor muscle during iced storage [J]. Food Chem: X, 2022: 100438.
- [55] ZHU C, JIAO D, SUN Y, *et al.* Effects of ultra-high pressure on endogenous enzyme activities, protein properties, and quality characteristics of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during iced storage [J]. Molecules, 2022, 27(19): 6302.
- [56] LIU Q, LIN Z, CHEN X, *et al.* Characterization of structures and gel properties of ultra-high-pressure treated-myofibrillar protein extracted from mud carp (*Cirrhinus molitorella*) and quality characteristics of heat-induced sausage products [J]. LWT, 2022, 165: 113691.
- [57] 周学府, 郑远荣, 刘振民, 等. 高密度二氧化碳对食品中蛋白质结构及其加工特性影响研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2020, 43(1): 39–44.
- ZHOU XF, ZHENG YR, LIU ZM, *et al.* A review of recent research on the effect of dense phase carbon dioxide on protein structure and processing characteristics in foods [J]. J Dairy Sci Technol, 2020, 43(1): 39–44.
- [58] GUNES G, BLUM LK, HOTCHKISS JH. Inactivation of yeasts in grape juice using a continuous dense phase carbon dioxide processing system [J]. J Sci Food Agric, 2010, 85(14): 2362–2368.
- [59] 屈小娟. 高密度 CO₂ 对凡纳滨对虾肌肉品质和蛋白质特性的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
- QU XJ. Effects of dense phase carbon dioxide on muscle qualities and protein characteristics of *Litopenaens vannamei* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.
- [60] 陈亚励. 高密度 CO₂ 对凡纳滨对虾肌球蛋白物理特性的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- CHEN YL. Effect of dense phase carbon dioxide on physical properties of *Litopenaens vannamei* myosin [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.
- [61] DUAN W, QIU H, HTWE KK, *et al.* Correlation between water characteristics and gel strength in the gel formation of golden pompano surimi induced by dense phase carbon dioxide [J]. Foods, 2023, 12: 1090.
- [62] LIU S, LIU Y, LUO S, *et al.* Molecular dynamics simulation of the interaction between dense-phase carbon dioxide and the myosin heavy chain [J]. J CO₂ Util, 2017, 21: 270–279.
- [63] ZHENG O, SUN Q, DONG A, *et al.* Gelation process optimization of shrimp surimi induced by dense phase carbon dioxide and quality

- evaluation of gel [J]. Foods, 2022, 11: 3807.
- [64] 李茹, 刘阳, 朱永康, 等. 响应面优化高密度 CO₂ 诱导金鲷鱼鱼糜凝胶化的工艺[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 198–204.
- LI R, LIU Y, ZHU YK, *et al.* Optimization of gelation process of surimi from *Trachinotus ovatus* induced by dense phase carbon dioxide using response surface methodology [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(13): 198–204.
- [65] 孙钦秀, 董安迪, 侯倩, 等. 高密度 CO₂ 溶解和扩散方式对虾肉糜凝胶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 26–33.
- SUN QX, DONG AND, HOU Q, *et al.* Effect of high-density carbon dioxide dissolution and diffusion mode on the quality of shrimp surimi gels [J]. Food Ferment Ind, 2022, 48(22): 26–33.
- [66] TAKAI E, KITAMURA T, KUWABARA J, *et al.* Chemical modification of amino acids by atmospheric-pressure cold plasma in aqueous solution [J]. J Phys D-Appl Phys, 2014, 47(28): 285403.
- [67] PEREZ-ANDRES JM, ALVAREZ C, CULLEN PJ, *et al.* Effect of cold plasma on the techno-functional properties of animal protein food ingredients [J]. Innov Food Sci Emerg, 2019, 58: 102205.
- [68] 胡晓梦, 陈静, 邓尚贵, 等. 低温等离子体对中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)菌相变化及品质特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 141–147.
- HU XM, CHEN J, DENG SG, *et al.* Effect of atmospheric cold plasma on microflora and quality characteristics of *Solenocera crassicornis* [J]. Food Sci, 2021, 42(19): 141–147.
- [69] 樊润泽, 祁苗, 张新颖, 等. 冷等离子体对肉蛋白的影响及其在肉品保藏加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 250–259.
- FAN RZ, QI M, ZHANG XY, *et al.* Effect of cold plasma on the meat protein and its applications in meat processing and storage: A comprehensive review [J]. Food Sci, 2023, 44(7): 250–259.
- [70] FLORA-GLAD CHIZOBA EKEZIE. 冷等离子体处理对凡纳滨对虾蛋白功能特性和致敏性的影响[D]. 湛江: 华南理工大学, 2019.
- FLORA-GLAD CE. Functionality and allergenicity response of king prawn (*Litopenaeus vannamei*) proteins following modification by cold plasma [D]. Zhanjiang: South China University of Technology, 2019.
- [71] 陈姑, 姜竹茂, 位正鹏, 等. 低温等离子体处理加速罗非鱼肌原纤维蛋白的氧化及结构改变[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 88–95.
- CHEN G, JIANG ZM, WEI ZP, *et al.* Cold plasma treatment accelerated the oxidation and structural changes of myofibrillar in tilapia [J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(4): 88–95.
- [72] 唐玲玲, 严金红, 徐慧倩, 等. 低温等离子体对南美白对虾肌肉蛋白质性质和结构的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3083–3089.
- TANG LL, YAN JH, XU HQ, *et al.* Effects of cold atmospheric plasma on protein properties and structure of *Penaeus vannamei* [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(10): 3083–3089.
- [73] OLATUNDE OO, SINGH A, SHIEKH KA, *et al.* Effect of high voltage cold plasma on oxidation, physicochemical, and gelling properties of myofibrillar protein isolate from asian sea bass (*Lates calcarifer*) [J]. Foods, 2021, 10(2): 326.
- [74] 斯兴开, 杨惠琳, 韦翔, 等. 低温等离子体对草鱼鱼肉品质的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 180–185.
- SI XK, YANG HL, WEI X, *et al.* Effect of low temperature plasma on the quality of grass carp [J]. Food Sci Technol, 2018, 43(10): 180–185.
- [75] 邓超, 邹朝晖. 辐照对食品营养成分的影响研究[J]. 食品安全导刊, 2022, (2): 128–130.
- DENG C, ZOU ZH. Study on the effect of irradiation on the nutrient composition of food [J]. China Food Saf Magaz, 2022, (2): 128–130.
- [76] 郭颖希, 王满生, 成军虎, 等. 非热加工技术消减食物过敏原研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 219–223, 230.
- GUO YX, WANG MS, CHENG JH, *et al.* A review on elimination of food allergens by non-thermal processing technologies [J]. Food Mach, 2019, 35(5): 219–223, 230.
- [77] PILLAI SD, SHAYANFAR S. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry [J]. Top Curr Chem, 2017, 375(1): 6.
- [78] 张晗, 高星, 宣仕芬, 等. 电子束辐照对鲈鱼肌肉原纤维蛋白生化特性及其构象的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 81–86.
- ZHANG H, GAO X, XUAN SF, *et al.* Effect of electron beam irradiation on biochemical properties and structure of myofibrillar protein from *Lateolabrax japonicus* meat [J]. Food Sci, 2019, 40(13): 81–86.
- [79] 李飞. 辐照处理对烤鳗品质的影响及其安全风险评估的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- LI F. Study on effect of irradiation on quality of roast eel and its risk assessment [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [80] 刘光明, 王玉松, 黄园园, 等. 辐照处理对蟹类过敏原(原肌球蛋白)性质的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2009, 48(2): 287–292.
- LIU GM, WANG YS, HUANG YY, *et al.* The effects of irradiation on the allergenicity of crab tropomyosins [J]. J Xiamen Univ (Nat Sci), 2009, 48(2): 287–292.
- [81] 牟慧. 虾过敏原表位在辐照与热处理中免疫原性的变化及表位氨基酸分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- MOU H. Immunoreactivity variation of epitopes in shrimp allergen under irradiation and heat treatment and analysis on amino acid of epitopes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [82] 郑读, 白焯, 熊光权, 等. ⁶⁰Co-γ 射线辐照对鳙鱼品质及挥发性物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2457–2464.
- ZHENG D, BAI C, XIONG GQ, *et al.* Effects of ⁶⁰Co-γ radiation on quality and volatile substances of *Monopterus albus* [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(8): 2457–2464.
- [83] PANG S, WANG Y, HAO R, *et al.* UV irradiation improved gel properties and chill-stored stability of surimi gel [J]. Int J Food Sci Technol, 2022, 57(9): 5973–5981.
- [84] 杨镔, 徐安琪, 朱煜康, 等. 辐照对带鱼鱼糜内源性转谷氨酰胺酶及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 71–76.
- YANG R, XU ANQ, ZHU YK, *et al.* Effect of irradiation on endogenous transglutaminase and gel properties of hairtail surimi [J]. Food Sci, 2020, 41(11): 71–76.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



刘颖琳, 主要研究方向为食品科学与工程

E-mail: 13431790832@163.com



魏帅, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋食品保鲜与加工。

E-mail: weishuaiws@126.com