

超高压技术在水产品贮藏加工应用中的研究进展

曹妍妍^{1,2}, 杨傅佳³, 吴靖娜², 陈晓婷², 刘智禹^{2*}, 许旻², 林河通^{1*}

- (1. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002; 2. 福建省水产研究所, 国家海水鱼类加工技术研发分中心(厦门), 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 厦门 361013;
3. 福州大学生物科学与工程学院, 福州 350108)

摘要: 超高压处理技术是当今热门的非热加工技术, 采用冷加工的纯物理方法, 处理方式简单快捷, 它通过常温或低温杀菌灭酶的方式延长水产品货架期, 保障水产品的质量安全, 且仅小幅度改变物料的色泽和香气, 保持食物固有的营养、品质、风味以及新鲜度。本文综述了超高压处理技术的原理, 对水产品中微生物、酶活的作用机制和影响, 以及超高压对水产品营养和物理性质等方面的影响, 结合目前国内外超高压技术在水产领域的应用和研究进展, 指出其存在的问题和未来的发展方向, 以期为该技术的深入研究提供参考。

关键词: 超高压; 水产品; 蛋白质变性; 抑菌

Research progress of ultra-high pressure technology in storage and processing of aquatic products

CAO Yan-Yan^{1,2}, YANG Fu-Jia³, WU Jing-Na², CHEN Xiao-Ting², LIU Zhi-Yu^{2*}, XU Min², LIN He-Tong^{1*}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fisheries Research Institute of Fujian, National Research and Development Center for Marine Fish Processing (Xiamen), Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Xiamen 361013, China; 3. College of Biological Sciences and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

ABSTRACT: Ultra-high pressure processing technology is today's popular non-thermal processing technology, using pure physical methods of cold processing, the processing method is simple and fast. It prolongs the shelf life of aquatic products by means of normal temperature or low temperature sterilization and enzyme elimination, guarantees the quality and safety of aquatic products, and only changes the color and aroma of the materials to a small extent, and maintains the inherent nutrition, quality, flavor and freshness of the food. This paper reviewed the principles of ultra-high pressure treatment technology, the mechanism and impact of microbial and enzyme activities in aquatic products, and the effects of ultra-high pressure on the nutritional and physical properties of aquatic products. Combined with the current application and research progress of ultra-high pressure technology in the field of aquatic

基金项目: 福建省海洋与渔业结构调整专项(2018HYJG02, 2017HYJG08), “十三五”海洋经济创新发展示范项目(FZHJ14)

Fund: Fujian province Marine and fishery structure adjustment project (2018HYJG02, 2017HYJG08), and “13th five-year” Marine economy innovation development demonstration project (FZHJ14)

***通讯作者:** 刘智禹, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为水产品加工与综合利用研究。E-mail: 13906008638@163.com

林河通, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: hetonglin@163.com

***Corresponding author:** LIU Zhi-Yu, Ph.D. Professor Level Senior Engineer. Fisheries Research Institute of Fujian, National Research and Development Center for Marine Fish Processing (Xiamen), Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Xiamen 361013, China. E-mail: 13906008638@163.com

LIN He-Tong, Ph.D. Professor, College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China. E-mail: hetonglin@163.com

products, the problems and future development directions were pointed out, in order to provide references for the in-depth study of this technology.

KEY WORDS: ultra-high pressure; aquatic products; protein denaturation; bacteriostatic

1 引言

水产品是海洋和淡水渔业生产的水产动植物产品及其加工产品的总称,通常具有低脂肪高蛋白的特点,营养价值高,含有人类膳食所需的成分,例如蛋白质、维生素 A 和 D 等脂溶性维生素、I、F、Ca、Cu、Zn、Fe 等微量元素,以及高度不饱和脂肪酸^[1],是人们摄取所需动物性蛋白质的重要来源。我国水产品种类繁多,其中鱼类约 3000 种,虾类约 300 种,蟹类 600 余种,软体动物约 700 种,头足类大约 90 种,藻类 1000 余种^[2]。据统计,2017 年全国水产品累计成交量 1145.12 万吨、成交额 2298.71 亿元,同比分别增长 4.69% 和 5.76%^[3],交易量巨大,且增幅明显。

新鲜的水产品,水分含量较高,质地柔嫩,拥有鲜美的风味,但是肌肉中的大量水分、自由氨基酸以及高度不饱和的脂质混合物易发生氧化,容易引起感官和营养质量损失,腐败变质,因此其贮藏保质期通常较短^[4,5]。水产品捕获后,体内开始进行一系列的物理、化学和生理上的变化,被认为是最易腐烂的食品之一^[6],为了保证水产品的鲜和食用安全,需要在捕获或收获后快速有效地进行加工和贮藏。

水产品的贮藏应用方法有物理技术(如低温贮藏、气调保鲜、超高压技术、干燥法、玻璃化转移技术等)、化学法(即通过添加试剂,以达到延长水产品保存期的目的,可分为盐藏、烟熏、添加食品添加剂、生物保鲜剂等)^[7]。食品非热加工技术是食品领域关注的热点,目前,国内外研究者已开发了许多创新型非热加工技术用于贮藏和延长水产食品货架期,例如脉冲电场^[8]、紫外线辐射^[9]、振荡磁场^[10]和超高压技术^[11]等。其中超高压技术属于最低限度加工且无添加剂的处理方式,更易被消费者接受^[12],在众多冷加工处理方式中最先得到美国农业部-食品安全检查服务部(United States Department of Agriculture-FSIS)的认定,是食品工业中最具潜力和发展前景的重点开发技术之一^[13]。

超高压技术,即高静压技术(high hydrostatic pressure, HHP),又称高压加工技术(high pressure processing, HPP)或超高压处理(ultra-high pressure),是一种冷加工的纯物理技术,将食品物料密封于耐高压的铸铁容器中,以水、油等液体作为传压介质,施加压力并保压合适的时间,以改变食品物料特性^[14]。在此过程中,压力是均匀、直接的传递到容器中的物料,跟物料的大小、形状没有太大的关系^[12]。超高压有钝化内源性酶和抑制微生物种群生长的作用,从而延长水产产品的货架期。本文从超高压技术的作用原理,结合

目前该技术的应用情况,阐述其在水产品加工及贮藏方面的影响,以期为该技术的深入研究提供参考。

2 超高压技术在水产品贮藏应用的基本原理

超高压技术遵循勒夏特列原理(Le Chatelier)^[15-17]和帕斯卡原理(Pascal)^[1,18]:改变维持化学平衡状态的因素,平衡会自动向减弱外来影响的方向移动,在密闭的容器中,压力通过液体介质总是垂直于任何受作用的表面,以相等的强度快速均匀地传递给处理物料的各个部位。超高压传压速度快,无压力梯度,使得处理过程更加简单便利。经过超高压处理之后,水产品物料的微生物被大量杀死,酶失活,与此同时,超高压不会对有机化合物的共价键起作用,因此可以较好地保持物料原有的品质特性、营养价值和风味。

2.1 超高压对水产品中微生物的影响

水产品是易腐食品,品质和货架期在很大的程度上都取决于微生物对其污染的程度^[19]。因此,微生物的控制是保证水产品质量和安全的重要手段。超高压灭菌的机制的主要表现为以下几个方面:蛋白质变性和酶失活、破坏微生物细胞的形态和膜通透性、基因组成发生变化、菌体内物质泄漏、生化反应等^[19],从而影响微生物原有的生理机能,当损伤超过细胞自身修复能力,甚至使原有功能被破坏或者发生不可逆转的变化时,细胞便死亡。周敏^[20]研究发现,超高压 250 MPa 处理 10 min 可以完全灭活水产品中副溶血性弧菌 D 及其耐压菌株 NYD,扫描电镜可以观察到 2 种菌株细胞结构的严重变化,且菌液离心上清液中核酸物质和蛋白质流失量达到最大;随着处理压力的增加,分离得到的蛋白含量和总硫基含量下降,证实超高压技术灭活副溶血性弧菌是通过超高压处理导致细胞内外形态学损伤并破坏细胞膜完整性,细胞壁破裂,膜蛋白质降解。

微生物对压力的敏感性与很多因素有关,诸如菌落种类、保压时间等。一般情况下 200~300 MPa 病毒灭活,300~400 MPa 霉菌、酵母菌灭活,300~600 MPa 细菌、致病菌灭活,800~1000 MPa 芽孢灭活。Arnaud 等^[21]在研究中发现,超高压对微生物的生长有明显抑制作用,鳕鱼和鲑鱼在 450 MPa 的压力处理下,有明显抑制菌落生长的效果,4 °C 冷藏 14 d 菌落总数仍未超过国际食品微生物标准,说明该方法有较好的延长贮藏保质期的作用。许多研究表明,革兰氏阴性菌是引起水产品腐败的主要微生物,且相比于革兰氏阳性菌对压力的敏感性更高,因此超高压技术对革兰氏阴性菌有很好的抑制作用。Calik 等^[22]研究表明,超高

压 345 MPa, 保压 90 s 处理牡蛎肉后, 基本上能够杀灭牡蛎中副溶血弧菌。Mengden 等^[23]研究显示经过不同压强、不同保压时间的超高压处理可杀灭烟熏虹鳟鱼鱼片和新鲜的欧洲鲱鱼鱼片中的大肠杆菌和李斯特菌, 且压强越大, 保压时间越长, 灭菌效果越好。因此, 超高压处理对水产品中微生物的控制作用明显, 有利于水产品的加工与贮藏发展。

2.2 超高压对酶活性的影响

酶是一种带有活性位点的特殊蛋白质, 在物理或化学作用下, 其特定的空间结构会遭到破坏, 蛋白质理化性质发生改变, 生物学活性丧失, 失去催化能力。超高压处理时, 压力较高会使酶失活, 压力较低可能会激活酶^[24]。此外, 酶活也会因保压方式的不同而受影响, 如间歇式高压处理可以提高酶的失活率, 即间歇式高压处理与连续式处理相比, 酶所保持的活力要低一些^[24,25]。有研究表明, 超高压处理主要通过影响酶蛋白的三级结构, 使酶活性中心的氨基酸组成发生改变, 从而改变酶的催化活性^[26]。Karel 等^[27]指出, 超高压处理不影响蛋白质的一级结构, 可影响二级结构共价键的稳定性。而蛋白质的三级结构是由氢键和离子键构成的, 这些弱结合键在压力超过 200 MPa 的条件下会断裂和崩溃。蛋白质的四级结构由弱共价键形成, 在相对较低的 150 MPa 压力条件下受到影响。

对压力较为敏感的酶包括胶原蛋白酶和组织蛋白酶, 还有一些酶的活性在压力作用下明显下降, 比如中性蛋白酶。Wang 等^[28]研究发现, 随着超高压处理压力的增加和处理时间的延长, α -螺旋和 β -折叠含量下降, 荧光强度急剧下降, 表明脂肪氧合酶(lipoxygenase, LOX)的二级和三级结构发生了很大变化, 脂肪氧合酶活性下降, 在 300 MPa 处理 20 min 条件下, 与未处理的样品相比, LOX 活性降低了 93.10%。Teixeira 等^[29]研究结果表明, 超高压处理鲈鱼鱼片与未处理的样品相比, 酸性磷酸酶活性在 400 MPa 下较低, 而对于组织蛋白酶 D, 在 100 和 400 MPa 下观察到较低的活性。此外, 随着压力强度和保压时间的增加, 降低了肌浆提取物中的蛋白质浓度、钙蛋白酶的活性。夏远景等^[30]研究了超高压处理对海参自溶酶活性的影响, 发现保压方式对自溶酶活性影响不大, 因此, 可以利用超高压控制压力对酶进行调节, 激活有益酶, 抑制有害酶。这个研究结论增加了利用超高压处理技术对加工食品中酶的研究控制方向及切入点。

3 超高压对水产品营养及物理性质的影响

3.1 超高压对蛋白质的影响

蛋白质依据溶解性不同可分为 3 类: 一是盐溶性的肌原纤维蛋白, 二是水溶性的肌浆蛋白, 三是不溶性的肌质蛋白。肌原纤维蛋白是鱼肉中最主要的蛋白, 占

60%~75%。天然状态的蛋白质通过共价键、二硫键、静电相互作用(离子对, 极性基团)、氢键和疏水相互作用稳定。压力处理可对蛋白质产生多种作用, 包括可逆或不可逆的结构修饰, 导致蛋白质变性, 聚集或凝胶形成^[31]。对于大多数水生物种, 100~300 MPa 范围内的压力导致可逆变性, 而压力大于 300 MPa 会导致不可逆变性^[32]。共价键不受压力处理的影响, 共价键具有较低的可压缩性, 并且通常不会在用于食品的压力范围内破裂, 因此, 蛋白质的一级结构几乎不会被压力改变。然而, 由于离子键、氢键以及疏水和静电相互作用的破裂, 蛋白质的二级、三级和四级结构将发生改变^[33]。超高压技术使蛋白质变性, 变性强度和可逆性在很大程度上取决于压力强度。因此, 合适的超高压压力强度, 可以灭活微生物、控制内源酶, 为水产品的加工和贮藏提供新思路。

超高压 100~200 MPa 处理下, 肌球蛋白发生变性, 部分水溶性蛋白不受压力影响, 通常不会使用超过 600 MPa 的压力来处理食品物料, 过高的压强处理会影响食品品质。刘书成等^[34]用 300、500 MPa 处理, 肌浆蛋白含量、肌原纤维蛋白含量下降, 虾仁蛋白质发生变性、肌球蛋白和肌动蛋白的热稳定性降低。随着压力增大和处理时间的延长, 虾仁肌原纤维排列变得紧实致密, 肌节严重收缩, 肌纤维之间空隙变模糊而呈现出絮状结构。闫春子等^[35]人在探究不同超高压条件对草鱼片肌原纤维蛋白结构的影响时发现, 随着压力的不断增大, 总巯基含量、 Ca^{2+} -ATPase 活性逐渐减小, 活性巯基先增加后减小, 表面疏水性持续增大, 肌原纤维蛋白二级结构改变, α -螺旋结构不断减少, β -折叠或无规则卷曲相应增加, 肌原纤维蛋白的三级结构也产生影响, 改变了色氨酸的微环境。

3.2 超高压对脂质的影响

含有多不饱和脂肪是水产品脂质的最大特点, 脂质氧化是贮藏和加工水产品中感官(即异味形成, 褐变发展)和营养质量损失的最重要机制之一^[36]。由于共价键不受压力处理的影响, 脂肪酸的一级结构不会改变^[37]。然而, 有研究认为受到无机和生物催化剂(例如金属离子和酶)的影响, 超高压处理可能诱导脂质氧化。孙艳辉等^[38]研究表示, 超高压处理会增加脂质氧化程度, 增加羰基化合物的产生, 但不会引起脂质酸败。唐梦等^[39]研究表明, 高压静电场处理不会加速冻罗非鱼片解冻过程中的脂肪氧化。关于超高压处理对水产品中脂质氧化的影响仍存在一定的争议, 还需日后加强该方面的研究加以验证。

3.3 超高压对糖类的影响

近年来关于水产品多糖的探究也日趋增多, 王成忠等^[40]研究发现, 超高压处理能够减少海参多糖的损失。有研究结果表明超高压对食品中糖类的影响不大, 在压力大

于 500 MPa 时还原糖低量增长。这可能是由于蛋白质和多糖分子之间静电相互作用,形成了构象稳定的静电蛋白聚糖复合物^[41]。超高压处理对于水产品多糖性质及功能的影响有所欠缺,还需要更多的研究证实。

3.4 超高压对水产品物理性质的影响

质构包括硬度、柔韧性、咀嚼性等,是评价水产品质量地好坏的重要指标,影响着消费者的判断。超高压处理改变了水产品的生物大分子结构以及蛋白质的构型,水产品自身存在的水解蛋白酶会失活,进而导致水产品质量特性发生变化。孙忱等^[42]经不同超高压强度处理草鱼,其鱼肉硬度、弹性和咀嚼性较新鲜组均有提升。Pita-Calvo 等^[43]的研究结果表明,冷冻前的超高压处理增加了生冷鲑鱼的硬度,粘附性和弹性,煮熟的样品也受到超高压处理的影响,超高压改善了其质构品质。对比而言,超高压对硬度的影响较小,对食物嫩度的改善也有一定作用,因此超高压可应用于调节食物硬化和口感,在水产食品的加工领域发挥作用。

pH 主要是由食品中的氢离子和氢氧根离子浓度决定的,在水产品保藏前期 pH 值通常呈现下降趋势,可能是糖原的酵解作用导致的,糖原分解后产生了乳酸、磷酸肌酸等物质,导致 pH 值的下降。在保藏后期,蛋白质降解产生挥发性碱性含氮物使 pH 值上升^[44,45]。Rode 等^[46]研究得到,超高压能抑制酶活性,杀灭微生物,减少酶分解物料产生的酸碱性物质,使保藏期内 pH 维持在较稳定的范围内。

水分对食品多汁饱满的口感起到了关键的作用,保水性通常可以由持水率和汁液流失率作为衡量指标进行探究。有研究表明,超高压有利于减小水产食品的汁液损失,提升持水率。汁液损失率和处理压力的关系一般为先上升后下降的趋势^[47]。超高压对物料色差影响明显。Kaur 等^[48]研究高压处理黑斑对虾结果得知,随着压力增大,虾肌更白,其亮度值 L^* 更高,可能是由于活性色素和蛋白质凝固损失,改变了表面特性,增加了光反射并产生了白色外观。Otero 等^[49]在超高压应用于延长冷藏鲑鱼货架期的实验中发现,超高压处理提高了鱼肉的亮度值和黄蓝度。大量研究表明,亮度值(L^*)和黄蓝度(b^*)随压力的增加有明显的上升,这可能与超高压处理使肌红蛋白变性影响吸光率有关。红绿度(a^*)对压力反应敏感,主要是由于压力破坏肌红蛋白结构并加快其氧化速度, L^* 值的升高和 a^* 值的降低都会使颜色变浅。超高压对于水产品物料的色差变化影响较明显。

4 超高压在水产中的应用

水产品腐败最主要的因素就是由于其自身存在的内源酶、微生物及不饱和脂肪酸氧化引起,发生的一系列化学、物理变化都决定着水产品可接受程度。超高压处理可

以杀菌、钝酶,能够在水产品贮藏中发挥作用。赵宏强等^[50]在研究中发现,250 MPa、9 min 超高压处理后综合效果相对较好,能使鱼片的冷藏货架期至少延长 4 d。同时,超高压处理对水产品的凝胶特性也有重要的影响。蛋白质的凝胶化是由蛋白质间的疏水相互作用导致乳状液的凝胶态网络结构形成,再通过氢键稳定凝胶结构。戴慧敏等^[51]发现,超高压处理能够有效改善低盐鱼糜的凝胶特性,处理后凝胶内聚性、回复性均显著增加,肌球蛋白重链条带强度变弱,且形成的凝胶网络结构也更致密均匀,鱼糜凝胶化会直接影响食品的质感和外观。除了延长水产品货架期及品质改良以外,超高压处理技术还具有其他优点,孙忱等^[42]研究发现超高压处理能够提高草鱼片的食用品质及可消化性,相比冷冻处理更具有广阔的应用前景。

5 总结与展望

超高压处理是近年来研究的热点技术,该技术能够杀灭水产品中大多数微生物,钝化其内源酶的活性,有效延长贮藏期,并且能够较好地保持水产品质量特性及营养成分,在食品安全日益严峻的今天,其安全卫生的特点,迎合了消费者的心理需求,市场前景广阔。但超高压技术依然存在不足之处,我国对于超高压的技术的开发和应用仍处在起步阶段,由于超高压食品技术使用的设备成本较高体积较大、设备密封且受到处理体积的限制和压力强度要求高等局限性,因此大部分研究仍停留在理论实验阶段,亟待市场的接受和应用;在单独使用超高压处理食品过程中耗能较大,可以通过在水产品应用中结合冷处理或热处理等辅助加工方式,拓展超高压的应用范围,目前,国内消费市场尚未出现超高压加工的水产商品,随着科研工作者的不断探索创新,相信超高压在水产品中的应用将逐渐深入,带动我国贮藏加工领域的更进一步发展。

参考文献

- [1] Aubourg SP. Impact of high-pressure processing on chemical constituents and nutritional properties in aquatic foods: A review [J]. Int J Food Sci Technol, 2017, 53(4): 873–891.
- [2] Li JR, Lu HX, Zhu JL, et al. Aquatic products processing industry in China: Challenges and outlook [J]. Trend Food Sci Technol, 2009, 20(2): 73–77.
- [3] 邱亢铖, 陈述平, 刘景景. 2017 年全国水产品市场成交量额双增[J]. 中国水产, 2018, (10): 24–28.
- Qiu KC, Chen SP, Liu JJ. In 2017, the volume of aquatic products market increased in China [J]. China Fisher, 2018, (10): 24–28.
- [4] 王春华. 水产品的加工和储藏[J]. 科学种养, 2016, (7): 59.
- Wang CH. Processing and storage of aquatic products [J]. Sci Farm, 2016, (7): 59.
- [5] Yang XY, Liu Y, Xu CH, et al. Extraction and analysis of volatiles flavor compounds of aquatic products: Review [J]. Oikos, 2015, 123(2): 248–256.

- [6] 史策, 钱建平, 韩帅, 等. 水产品货架期预测模型的研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 294–301.
Shi C, Qian JP, Han S, *et al.* Progress in shelf life prediction models for aquatic products [J]. Food Sci, 2017, 38(15): 294–301.
- [7] 杨忠敏. 水产品常见典型的保鲜技术[J]. 渔业致富指南, 2017, (19): 38–39.
Yang ZM. Common and typical fresh-keeping techniques for aquatic products [J]. Guidelin Fisher Prosper, 2017, (19): 38–39.
- [8] 张雪颖. 浅谈食品加工过程中的脉冲电场处理[J]. 食品安全导刊, 2018, (9): 124.
Zhang XY. Discussion on pulsed electric field treatment in food processing [J]. Food Saf Guid, 2018, (9): 124.
- [9] 周强, 谢诚山, 刘蒙佳, 等. 减菌化处理在草鱼冷藏保鲜中的应用研究[J]. 食品工业, 2017, (1): 108.
Zhou Q, Xie CS, Liu MJ, *et al.* Application of bacteria number reducing treatment in grass carp quality control during cold storage [J]. Food Ind, 2017, (1): 108.
- [10] 金亚美. 交变磁场对食品体系在开路和闭路状态下的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
Jin MY. Response of different foodstuff system to varying magnetic flux at open and closed states [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [11] 孙成. 水产品加工中超高压技术的应用探究[J]. 南方农业, 2018, (11): 151–153.
Sun C. Research on the application of ultra-high pressure technology in aquatic products processing [J]. Southern Agric, 2018, (11): 151–153.
- [12] Li YT, Zhong CB. Factors driving consumption behavior for green aquatic products: Empirical research from Ningbo, China [J]. Brit Food J, 2017, 119(7): 110–114.
- [13] 张瑜. 超高压对脂肪酶活性的影响及其机制初探[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
Zhang Y. The effect of ultra high pressure on the lipase activity and preliminary studies on the mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [14] Ucak I. Utilization of high hydrostatic pressure in seafood processing and preservation [J]. J Limnol Freshwat Fisher Res, 2018, 4(1): 47–57.
- [15] Augusto PED, Tribst M, Cristianini. Chapter 20—High hydrostatic pressure and high-pressure homogenization processing of fruit juices [J]. Fruit Juic, 2018, (1): 393–421.
- [16] Guillou S, Lerasle M, Simonin H, *et al.* High-pressure processing of meat and meat products [EB/OL]. 2017. <https://www.researchgate.net/publication>.
- [17] 柏晟. 用平衡常数来解析勒夏特列原理[J]. 中外交流, 2017, (16): 124.
Bai S. Le chatelier's principle analyzed by equilibrium constant [J]. Sino-for Exchange, 2017, (16): 124.
- [18] 王璉. 超高压处理生鲜金枪鱼片保鲜研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
Wang J. Study on the shelf-life of sliced raw tuna fish using high-hydrostatic pressure technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [19] Fonberg-Broczek M, Windyga B, Szczawiński J, *et al.* High pressure processing for food safety [J]. Acta Biochim Pol, 2005, 52(3): 721–724.
- [20] 周敏. 超高压处理对水产品源副溶血性弧菌及其耐压菌株的影响[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
Zhou M. Effects of ultra-high pressure treatment on vibrio parahaemolyticus and its pressure-resistant strains from aquatic products [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017.
- [21] Arnaud C, Lamballerie MD, Pottier L. Effect of high pressure processing on the preservation of frozen and re-thawed sliced cod (*Gadus morhua*) and salmon (*Salmo salar*) fillets [J]. High Press Res, 2017, (3): 1–18.
- [22] Calik H, Morrissey MT, Reno PW, *et al.* Effect of high-pressure processing on vibrio parahaemolyticus strains in pure culture and pacific oysters [J]. J Food Sci, 2010, 67(4): 1506–1510.
- [23] Mengden R, Röhner A, Sudhaus N, *et al.* High-pressure processing of mild smoked rainbow trout fillets (*Oncorhynchus mykiss*) and fresh European catfish fillets (*Silurus glanis*) [J]. Innov Food Sci Emerg, 2015, (32): 10–20.
- [24] Serment-Moreno V, Barbosa-Cánovas G, Torres JA, *et al.* High-pressure processing: kinetic models for microbial and enzyme inactivation [J]. Food Eng Rev, 2014, 6(3): 56–88.
- [25] 江波, 李赞高, 缪铭, 等. 超高压调节酶催化功能及其作用机制[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(6): 561–568.
Jiang B, Li YG, Miao M, *et al.* The catalytic function of enzyme and its mechanism are regulated by ultrahigh pressure [J]. J Food Biotechnol, 2015, 34(6): 561–568.
- [26] Edwin B, Martínez G, Bernadette C, *et al.* High pressure treatment in foods [J]. Foods, 2014, 3(3): 476–490.
- [27] Karel M, Fennema OR, Lund DB. Principles of food science. Part II. Physical principles of food preservation [M]. New York: New York (USA) Dekker, 1975.
- [28] Wang BG, Yu ZY, Lin L, *et al.* Effect of Ultrasonic wave and ultra high pressure treatment on conformation and enzyme activity of lipoxigenase in silver carp muscle [J]. Food Sci, 2018, (3): 23–29.
- [29] Teixeira B, Fidalgo L, Mendes R, *et al.* Changes of enzymes activity and protein profiles caused by high-pressure processing in sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(11): 2851–2860.
- [30] 夏远景, 刘志军, 李宁, 等. 超高压处理对海参自溶酶活性影响的研究[J]. 高压物理学报, 2009, (5): 377–383.
Xia YJ, Liu ZJ, Li N, *et al.* Effects of ultra-high pressure treatment on autolysin activity of sea cucumber [J]. J High Press Physic, 2009, (5): 377–383.
- [31] 李明月, 杜钰, 姚晓玲, 等. 超高压处理对蛋白质功能特性的影响[J]. 食品科技, 2018, (1): 50–54.
Li MY, Du Y, Yao XL, *et al.* Effects of ultrahigh pressure treatment on functional properties of proteins [J]. Food Sci Technol, 2018, (1): 50–54.
- [32] Shimada S, Andou M, Naito N, *et al.* Effects of hydrostatic pressure on the ultrastructure and leakage of internal substances in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Appl Microbiol Bio, 1993, 40(1): 123–131.
- [33] Campus M. High pressure processing of meat, meat products and seafood [J]. Food Eng Rev, 2010, 2(4): 256–273.
- [34] 刘书成, 邓倩琳, 黄万有, 等. 超高压处理对凡纳滨对虾虾仁蛋白质和微观结构的影响[J]. 水产学报, 2017, (6): 330–335.
Liu SC, Deng QL, Huang WY, *et al.* Effects of ultrahigh pressure treatment on protein and microstructure of shrimp meat from *Litopenaeus vannameus* [J]. J Fisher China, 2017, (6): 330–335..

- [35] 闫春子, 夏文水, 许艳顺. 超高压对草鱼肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(217): 94-98.
Yan CZ, Xia WS, Xu YS. Effects of ultrahigh pressure on myofibrin structure in grass carp [J]. J Food Biotechnol, 2018, 37(217): 94-98.
- [36] Logan A, Pan X, Nienaber U. Lipid oxidation: Challenges in food systems [R]. 2013.
- [37] Medina-Meza IG, Barnaba C, Barbosa-Cánovas, *et al.* Effects of high pressure processing on lipid oxidation: A review [J]. Innov Food Sci Emerg, 2014, (22): 1-10.
- [38] 孙艳辉. 铁盐与超高压协同调控肉制品中脂质氧化度[J]. 安徽农业科学, 2014, (1): 231-233.
Sun YH. Iron salt and ultra-high pressure synergistic regulation of lipid oxidation in meat products [J]. J Anhui Agric Sci, 2014, (1): 231-233.
- [39] 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻对冻罗非鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, (13): 1-6.
Tang M, Ceng JW, Li LH, *et al.* Effects of high voltage electrostatic field thawing on the quality of frozen tilapia fillets [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, (13): 1-6.
- [40] 王成忠, 夏敏敏. 超高压对刺参泡发及其品质的影响[J]. 现代食品科技, 2013, (9): 2081-2085.
Wang CZ, Xia MM. Effect of ultrahigh pressure on the bubble hair and its quality of ginseng [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, (9): 2081-2085.
- [41] 姜元荣, 张晖, 姚惠源. 蛋白聚糖的结构和功能特性[J]. 食品科学, 2002, 23(12): 129-132.
Jiang YR, Zhang H, Yao HY. Structure and functional properties of proteoglycan [J]. Food Sci, 2002, 23(12): 129-132.
- [42] 孙忱, 潘见, 李颖, 等. 超高压和冻藏对草鱼食用品质及可消化性的研究[J]. 食品工业, 2018, (10): 1-8.
Sun C, Pan J, Li Y, *et al.* Study on the edible quality and digestibility of grass carp under ultra-high pressure and frozen storage [J]. Food Ind, 2018, (10): 1-8.
- [43] Consuelo PC, Guerra-Rodríguez E, Saraiva JA, *et al.* Effect of high-pressure processing pretreatment on the physical properties and colour assessment of frozen European hake (*Merluccius merluccius*) during long term storage [J]. Food Res Int, 2018, (112): 233-240.
- [44] 刘彩华, 邱恒恒, 朱新荣, 等. 冷藏温度对白斑狗鱼肌肉质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(12): 12-16.
Liu CH, Qiu HH, Zhu XR, *et al.* Effect of cold storage temperature on muscle texture characteristics of white pike [J]. Food Ferm Ind, 2017, 43(12): 12-16.
- [45] 王拥军, 张家松, 毛瑞鑫. pH 值对白斑狗鱼蛋白酶活性的影响[J]. 水产养殖, 2018, 39(7): 11-14.
Wang YJ, Zhang JS, Mao RX. Effect of pH value on protease activity of white spot pike [J]. Aquaculture, 2018, 39(7): 11-14.
- [46] Rode TM, Hovda MB. High pressure processing extend the shelf life of fresh salmon, cod and mackerel [J]. Food Contr, 2016, (70): 242-248.
- [47] Kumar K. High pressure processing (HPP) as emerging technology in food preservation. in national conference on food processing and technology: Current status and future prospectS [R]. 2016.
- [48] Kaur BP, Rao PS. Effect of storage temperature and packaging on quality and shelf-life of high pressure processed black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. J Food Proc Pres, 2017, 42(4): 48-58.
- [49] Otero L, Pérez-Mateos M, Holgado F, *et al.* Hyperbaric cold storage: Pressure as an effective tool for extending the shelf-life of refrigerated mackerel (*Scomber scombrus* L.) [J]. Innov Food Sci Emerg, 2019, (45): 41-50.
- [50] 赵宏强, 吴金鑫, 张苑怡, 等. 超高压处理对冷藏鲈鱼片品质及组织结构变化的影响[J]. 高压物理学报, 2017, (4): 145-155.
Zhao HQ, Wu JX, Zhang YY, *et al.* Effects of ultra-high pressure treatment on the quality and structure changes of frozen bass [J]. J High Press Phys, 2017, (4): 145-155.
- [51] 戴慧敏, 叶韬, 林琳, 等. 低盐白鲢鱼糜凝胶超高压制备工艺优化及凝胶特性[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 201-208.
Dai HM, Ye T, Lin L, *et al.* Process optimization and gel characteristics of low-salt silver carp surimi gel under ultra-high pressure [J]. Food Mach, 2018, 34(8): 201-208.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介



曹妍妍, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: 630645820@qq.com



刘智禹, 教授级高工, 主要研究方向为水产品加工与综合利用。
E-mail: 13906008638@163.com



林河通, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。
E-mail: hetonglin@163.com