

超高压技术在水产品加工中的应用

郝梦甄, 胡志和*

(天津市食品生物技术重点实验室, 天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134)

摘要: 超高压加工技术可用于食品杀菌、灭酶、保持自然风味与质构改善等, 是目前国际上最热门的食品加工技术之一。本文介绍了超高压加工的基本原理, 综述了超高压在杀灭水产品中微生物, 提高贮藏性能, 改善水产品品质, 提取色素等水产品加工中的应用。

关键词: 超高压; 水产品; 加工

Application of Ultra High-pressure Technology in Aquatic Product Processing

HAO Meng-zhen, HU Zhi-he*

(Tianjin Key Laboratory of Food and Biotechnology, College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Ultra high-pressure technology can be used for food sterilization, enzyme inactivation, natural flavor maintenance and texture improvement, which is one of the most popular technologies for food processing all over the world. In this paper, the basic working principle of ultra high-pressure technology and its application in the sterilization, improvement of storage properties and quality and extraction of color substances for aquatic products are introduced and discussed.

Key words: ultra high-pressure; aquatic product; processing

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)01-0298-07

水产品是人类重要的食物来源之一, 营养价值高, 其中鱼类含有丰富的蛋白质, 属于完全蛋白, 软体类(如牡蛎、扇贝、乌贼)含有的氨基酸全部为必需氨基酸^[1-3]。但传统水产品加工方法通过破坏非共价键使蛋白质变性, 同时也破坏了共价键使维生素、色素和风味物质等低分子物质发生质变, 使大量营养物质和生物活性成分流失还会产生不利吸收和健康的毒素^[4]。在海产品深加工的废水中含有大量鱼蛋白, 其中鱼糜加工厂废水中鱼蛋白含量最高, 造成了大量营养成分的流失^[5]。

超高压的应用研究由来已久, 1914年, 高压物理学家 Bridgman 首先发现, 超高压会使蛋白质凝固和酶失活, 还能杀死微生物^[6]。超高压在食品工业上的应用, 是由日本京都大学林立丸教授于1986年提出的。目前, 日本在超高压食品加工方面居于国际领先地位, 并且已拥有大量的食品超高压处理实验机械和生产设备。日本 MeidiYa 公司于1990年4月生产了第一个高压食品—果酱, 明治屋食品公司将草莓、猕猴桃、苹果酱软包装

后, 在室温下以400~600MPa的压力处理10~30min, 达到杀菌目的, 同时保持了果实原有的色香味, VC保留量也大大提高; 日本的松本正等人对5种小菜真空包装后以300~400MPa的压力处理, 杀死酵母菌, 提高了产品的保存性, 实现了腌菜向低盐化方向发展^[7]。

在美国及欧洲, 许多国家先后对高压食品加工的原理、方法、技术细节及应用前景进行了广泛的研究, 研究的深度和广度不断扩大^[8]。超高压处理技术被认为是生物制品与食品非热杀菌技术中最有潜力和发展前途的一种。目前, 高压加工在商业化水产品上应用还很少, 研究数据和资料很有限。

本文介绍了超高压定义及超高压处理的基本原理, 并对其在杀灭水产品中微生物, 延长水产品贮藏特性, 改善水产品品质, 藻类中虾青素的提取, 海虾过敏原的消除以及在水产脱壳中的应用进行了综述。随着近年来超高压技术在食品领域里的迅速发展以及超高压处理食品的显著优点, 超高压技术在水产品中尤其高附加值的水产品中的应用研究越来越深入。

收稿日期: 2011-09-26

作者简介: 郝梦甄(1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品生物技术。E-mail: shixian864L@163.com

* 通信作者: 胡志和(1962—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为专用功能食品。E-mail: hzhihe@tjcu.edu.cn

1 超高压杀灭水产品中微生物

水产品极易在其生长水域或食用加工中受到病原微生物的污染。来源于水产品中的致病菌通常可分为两组：一组是自身原有的细菌受水环境和气温的影响，如霍乱弧菌和副溶血性弧菌，一般见于海滨环境或温热带水域中的鱼体；另一组致病菌是水产品非自身原有细菌，例如沙门氏菌、大肠埃希氏菌、志贺氏菌、金黄色葡萄球菌等^[9]。戴昌芳等^[10]研究发现养殖水样品中病原菌检出率高达46.51%，生食水产品常见病原微生物检出率24.31%，非O1群霍乱弧菌占41.77%，副溶血性弧菌占3.80%，鲍氏志贺菌占1.27%，致病性大肠埃希菌占10.13%，侵袭性大肠埃希菌占13.92%，产毒性大肠埃希氏菌占8.86%和产志贺样毒素大肠埃希氏菌占20.25%。

超高压能破坏氢键之类弱结合键，使非共价键断裂，在200MPa以上的压力下由疏水键和离子键维持的蛋白质的三级结构发生剧烈变化，产生蛋白质的压力凝固及酶的失活，破坏细胞膜使菌体内成分产生泄漏，引起细胞形态的改变，包括细胞拉长、细胞壁收缩和气孔的形成，细胞质壁分离以及气泡和液泡的收缩并对DNA的转录和复制产生影响^[11-12]。Smelt等^[13]已经通过压力阻力与膜流动性关系证实了细胞膜是压力使微生物失活的首要作用目标，细胞膜的改变可归因于流动的磷脂双分子层经高压变为紧密的凝胶状态。高压使与细胞膜有关的酶变性，经高压处理后细胞活性遭破坏使质子溶出，pH值改变从而令乳酸杆菌中的质膜异位F₁F₀ATP酶活性降低^[14]。高瑀琰等^[15]利用DPH标记和荧光偏振法测定大肠杆菌细胞膜流动性，随着压力的增大和保压时间的延长，大肠杆菌细胞膜荧光偏振度及微黏度增大，流动性降低，大肠杆菌死亡增加。当压力和保压时间增加到一定程度(350MPa, 15min)，荧光偏振度及微黏度达到相对稳定状态，此时大肠杆菌几乎全部死亡。

1.1 超高压在虾杀菌中的应用

宋吉昌等^[16]以新鲜海虾为对象，采用正交试验设计方法研究了重复加压对超高压灭菌效果的影响。实验结果表明，当处理压力为300~400MPa，保压时间为10~20min，加压2~3次时，对海虾中各种微生物杀灭作用显著。在重复3次加压，压力为400MPa，保压时间为15min的条件下，可以杀灭海虾中99.3%的微生物。结果表明，利用超高压技术在一定的压力范围保持一定时间可以有效杀灭海虾中的微生物，达到无菌可食状态。

谢乐生等^[17]通过不同的压力和保压时间处理接种菌浓度达到10⁷~10⁸个/mL的熟制凡纳滨对虾虾仁以此考察超高压的杀菌效果。实验发现压力是影响杀菌效果的主

要因素，当压力为600MPa，保压时间为20min时，虾仁中接种的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌和枯草芽孢杆菌总数分别下降7.1、7.0、7.2和4.3个数量级。结果表明枯草芽孢杆菌对高压最不敏感，对水产品中常见的致病菌大肠杆菌、沙门氏菌和金黄色葡萄球菌有显著的杀灭作用。López-Caballero等^[18]已证实高压处理后并真空包装可以有效抑制新鲜对虾贮藏期黑斑的出现和微生物的生长并使货架期达到20d。Montero等^[19]也证实超高压结合对虾黑病变抑制剂(抗坏血酸、柠檬酸、苯甲酸钠、曲酸和4-己基间苯二酚)可以防止对虾腐败并降低对虾黑病变的发生。

由于某些微生物对压力的要求比较高，要杀灭这样的微生物需要比较高的压力，导致设备成本昂贵，为此，考虑压力与温度的协调作用成了降低超高压成本的可行方法之一。谢慧明等^[20]借助于Box-Behnken试验设计方法，考察了不同温度和保压时间协同超高压对金黄色葡萄球菌的作用效果，建立了金黄色葡萄球菌超高压杀菌模型，并利用SPSS对数据进行相关性分析、验证，得出协同温度>55℃，保压时间>10.95min的情况下超高压压力只需大于343.24MPa就可以使淡水小龙虾中的金黄色葡萄球菌指标达到进出口卫生标准，即菌数<50CFU/g。通过温度协同作用在杀灭水产品微生物过程中较小压力就可以达到卫生标准，大大降低了超高压设备的成本和仪器损耗。

1.2 超高压在牡蛎杀菌中的应用

牡蛎是一种营养价值很高的珍贵海产品，干肉中含有蛋白质45%~52%，脂肪7%~11%，总糖19%~38%，此外，还含有丰富的VA、VB₁、VB₂和VD等，含碘量比牛乳或蛋黄高200倍^[21]。牡蛎是一种滤食性海洋生物，易被细菌侵入肌体，而且细菌组成较为复杂。大量微生物的存在直接影响到牡蛎的食用安全性。在广州市售生蚝中菌落总数和大肠杆菌的最高带菌量分别达到1.3×10⁶CFU/g和2.9×10³MPN/100g，弧菌的检出率高达90%^[22]。在各地的市售鲜牡蛎中副溶血性弧菌的检查率均较高^[23-24]。

张晓敏等^[25]以新鲜牡蛎为原料，研究了不同处理压力、保压时间、加压次数对牡蛎灭菌效果的影响。当处理压力为400MPa，保压时间20min，加压2次时对牡蛎中微生物的灭菌效果最好并且压力大小是影响杀菌效果的主要因素，保压时间次之，加压次数影响最小。陶晶^[26]也发现超高压对于牡蛎中微生物的瞬时杀灭效果很好，300MPa处理10min可以使总菌数下降近5个对数周期，400MPa以上微生物未检出。

夏远景等^[27]实验发现压力、保压时间对灭菌效果影响显著，随着压力的增大和时间的延长，细菌的灭活率增大。温度、施压方式等因素对牡蛎中菌群总数的

灭活率影响不大,在处理压力 350MPa,保压时间 20min 时,牡蛎中菌落总数的灭活率已经达到 89.5%。

牡蛎中存在的创伤弧菌和副溶血弧菌对压力比较敏感分别在 260MPa 处理 3min 和 345MPa 处理 90s 数量会显著减少^[28-29]。Kural 等^[30-31]通过对牡蛎接种创伤弧菌和副溶血弧菌研究了高压对两者的灭活效果以及温度对高压灭菌的影响,发现温度 < 20℃ 或 > 30℃ 可以提高高压灭活创伤弧菌的效率,在 -2℃ 和 40℃, 150MPa 处理接种过的牡蛎可使创伤弧菌数量降低 4.7 和 2.8 个对数周期,而 20℃ 同样处理只降低了 0.5 个对数周期。在 -2℃ 和 1℃ 研究了压力和时间对创伤弧菌的影响,压力 ≥ 250MPa, 时间 ≥ 4min 时可使其数量降低 5 个对数周期。而要使副溶血弧菌的数量降低 5 个对数周期需要在 1~35℃, ≥ 350MPa 的压力处理 2min 或 40℃, ≥ 300MPa 处理 2min。

目前,高压加工作为一项提供越来越普及的安全且新鲜的牡蛎产品加工技术,正在促进一个新的行业的产生,可以生产一些即食食品等方便食品。

1.3 超高压在毛蚶杀菌中的应用

毛蚶是一种生长在海湾泥沙中的软体动物,不但肉味鲜美,富含蛋白质、脂肪、碳水化合物,并含核黄素、尼克酸、VE 以及多种微量元素。毛蚶整体入药,能补血温中,健脾和胃,适用于血虚脾弱之症^[32]。生食毛蚶曾一度风靡,但毛蚶中存在大量微生物且多为致病菌,并对常用抗生素有抗性。1988 年在上海 30 多万人因食用生毛蚶感染甲肝。因此,寻求一种既能有效保留毛蚶营养成分和纤维物质又能杀灭其中的致病菌的新技术势在必行。

王瑞等^[33]以生食毛蚶为研究对象,利用正交试验设计方法研究了不同压力、温度和保压时间对生食毛蚶中微生物(细菌、霉菌、酵母菌)存活率的影响,确定了生食毛蚶超高压杀菌工艺条件,当温度为 20~40℃,保压时间为 5~15min 时,压力在 300~500MPa 范围内对生食毛蚶中各种微生物杀灭作用显著($P < 0.01$)。最终确定压力 500MPa、温度 40℃、保压时间 5min 为生食毛蚶超高压杀菌工艺。实验结果表明,超高压技术能够杀灭毛蚶中的微生物,确保了生食毛蚶的安全性,同时为进一步开拓毛蚶市场提供了有效依据。

2 超高压改善水产品贮藏特性的应用

众所周知,水产品是极易腐败变质的物品,而且一旦鲜度变差其价值下降很多,甚至可能完全丧失其食用价值并造成重大的经济损失。盐藏和冷藏是水产品保藏最常用的方法,但许多水产品经过盐藏、冷藏以后在色泽、风味、质地、新鲜程度上都远不及新鲜产品。

影响水产品贮藏性的因素主要有三方面:一是水产

品自身从水体中携带的微生物,这些特有腐败微生物往往导致水产品产生三甲胺(TMA)、硫化氢以及硫化物甘蓝样臭味和有异味的挥发性硫化物^[34];二是由于水产品的脂肪中富含不饱和脂肪酸,在一般的加工贮藏条件下,容易发生氧化反应产生过氧化物,并进一步氧化分解产生醛和酮,这些化合物具有强烈的油哈喇味;三是水产品中的自溶酶作用。

高压处理不仅能杀灭水产品中的腐败菌并且能够使与海产品腐败有关的酶失活。酶的化学本质是蛋白质,蛋白质的二级和三级结构的改变与体积变化有关,而超高压有利于体积减小的反应发生,因此酶活性会受到高压的影响。每种酶都存在最低失活压力,低于这个压力酶就不会失活,在特定时间内当压力超过这个值时酶失活速度会加速直到完全失活^[35]。Ludikhuyze 等^[36]、Broeck 等^[37]对超高压下的动力学研究得出,各类酶的超高压灭活酶模型主要符合一级反应动力学模型($A = A_0 e^{-Kt}$, A 为 t 时间内酶活力; A_0 为初始酶活力; K 为温度和压力的失活速率常数 / min^{-1} , 假定 $n = 1$; t 为时间 / min)。恒温恒压条件下 K 的获得都采用 Eyring 理论和 Arrhenius 理论^[38]。

高压应用于鱼类肌肉组织时引起促氧化效应^[39]。但也有研究指出在较低压力下不会引起鱼类中脂质的氧化,只有超过一定压力范围会引起脂质氧化。在 7℃, 200MPa 处理 15min 的鲑鱼和金枪鱼生鱼片中脂质氧化并不比未高压处理的多,但在 250~300MPa 的压力范围脂质氧化明显^[40]。超高压处理高脂肪含量的鲑鱼时其绝对氧化值比金枪鱼中的低,是由于其肌肉组织中高含量的类胡萝卜素作为内源性抗氧化系统防止其脂质氧化^[41]。有研究表明在高压下高精度的脂肪和油对氧化作用来说相对较稳定。当用 506MPa 流体静压处理萃取的沙丁鱼油 60min 时,氧化指示剂、过氧化值(POV)和硫代巴比妥酸(TBA)都没有改变^[42]。

2.1 超高压在腌鱼保藏中的应用

腌制是传统食品保藏的方法之一,其特点是生产设备简单,防止腐败,便于短时间内处理大量鱼货,但对于鱼中丰富的不饱和脂肪酸的氧化却不能有效抑制。

章银良等^[43]以淡腌海鳗为对象采用 200、400、600MPa 处理 15min,通过挥发性盐基氮(TVB-N)、TMA、总活菌数、TBA 和 pH 值等在保藏过程的变化考察超高压对腌鱼保藏的影响。结果表明,600MPa 处理可以极大地抑制微生物生长和脂肪氧化,降低 TVB-N、TMA。说明超高压是一种较好的适合腌鱼保藏的冷杀菌技术。

硫代巴比妥酸反应物(TBARS)含量在 1~2mg MDA/kg 为消费者可接受范围,超过此范围会产生不可接受的气味和味道^[44]。Montiel 等^[45]用 TBARS 作为脂肪氧化测定

指标发现在超高压处理与处理后贮藏期间烟熏鳕鱼的脂肪氧化情况没有差别, 400MPa, 10min 和 500MPa, 5min 处理烟熏鳕鱼能抑制微生物的再次生长, 保护产品贮藏期间不受病原菌的二次污染, 使其货架期达到 60d。超高压可提高烟熏鳕鱼的 *L* 值和 *b* 值, 降低 *a* 值, 赋予其明亮的外观, 并使其硬度和剪切力增加, 而未高压处理样品在冷藏期间硬度和剪切力均减弱。

2.2 超高压在海参保藏中的应用

海参的营养价值和药用价值很高, 是高蛋白、低胆固醇、低脂肪、富含多种生理活性物质的营养保健佳品, 具有抗肿瘤、降血压及抗凝血的作用, 传统加工方法海参只能制作成干参或盐渍参, 大量的活性成分在加工过程中流失。

邓记松^[46]研究了超高压对海参保藏期间的微生物变化以及高压对海参自溶酶的钝化。实验中对海参 250MPa 处理试样在前 5d 内菌落生长受到抑制, 第 5 天后开始出现增长; 经过 300MPa 以上压力处理菌落的再生长受到的抑制作用更为明显。在对海参自溶酶的研究中发现由于残存细胞碎片的存在有一定量的自溶酶处于附着状态, 当处理压力、保压时间低于某一值时, 海参中自溶酶活性不减反增, 只有当处理压力、保压时间超过此值, 自溶酶活性才会随处理压力和保压时间的增大而减小。实验中将这两者的临界值分别设定为 250MPa, 15min。在考察压力作用下温度对海参自溶酶的影响时发现在 400MPa, 20min 的处理条件下, 海参自溶酶活性随温度升高先上升, 于 40℃ 左右达到最高值, 随后下降。从钝酶的角度看, 超高压处理时室温 24℃ 或 60℃ 以上钝酶效果较好, 其中 60℃ 以上钝酶效果好于室温。在对保藏期间海参自溶酶残存活性的研究中发现: 在 4℃, 450、500、550MPa 处理 20min 后对海参自溶酶跟踪检测的 20d 内其残存活性变化不大。实验结果充分说明了超高压可以应用于海参的保藏中, 并能有效延长新鲜海参的保藏期。

2.3 超高压对海水鱼保藏品质的影响

Campus 等^[47]通过应力松弛实验对超高压处理的海鲷贮藏期间的流变学变化进行了测定, 发现 300MPa 和 400MPa 处理的海鲷在贮藏过程中鱼肉弹力和硬度得到有效保留, 相反 200MPa 处理样品在贮藏期间弹力降低, 并且发现海鲷背部肌肉的持水能力随着处理压力增加而降低。利用免疫印迹分析了超高压对结构蛋白的影响, 发现 400MPa 压力可防止肌间线蛋白在海鲷贮藏期间的降解, 可能由于压力使肌间线蛋白降解酶失活。Ojagh 等^[48]研究了超高压处理对于鲑鱼片蛋白的影响发现超高压能降低蛋白聚合使蛋白伸展。对蛋白质的 0.8mol/L NaCl 溶液进行聚丙烯酰胺凝胶电泳发现肌球蛋白和 α -辅肌动蛋白是 40℃ 高压处理主要的变性蛋白, 而

5℃ 处理时辅肌动蛋白变性比较多。5℃ 条件下超高压结合明胶木质素能保护鱼片的红嫩, 最大限度地防止蛋白质变性和氧化。在 7℃, 300MPa 处理 15min 发现鲑鱼片的 TBARS 值在贮藏 23d 后显著提高, 但结合明胶木质素可以使其升高最小化。超高压处理的全部样品的 TVB-N 值均降低。超高压能提高海产鱼的贮藏性, 结合其他处理可获得更显著的结果。

3 超高压对水产品感官品质的改善

超高压处理可使蛋白质分子中二硫键部分断裂, 巯基含量增加, 使蛋白质凝胶性能改善, 研究发现在 200MPa 压力处理牛血清蛋白、大豆蛋白、牡蛎蛋白时其巯基都有激增, 而海参蛋白在处理压力为 100MPa 时巯基有激增^[49]。由加热或超高压而变性的鱼肉蛋白质, 都会在加盐等一定条件下凝固或凝胶化。超高压一般对食品原有的味道及特有的风味没有影响, 对食品的色泽会有改变, 但有些色素(例如类胡萝卜素、叶绿素、花青素等)对超高压有抵抗能力^[50]。

3.1 超高压对对虾品质的影响

浙江工商大学的张蕾等^[51]通过微结构的观察研究超高压对对虾结构的影响。实验发现, 随处理压力和保压时间的增大, 对虾的颜色变淡, *L* 值明显增大, 虾肉颜色逐渐变白, 呈不透明状, 但对红度和黄度并无明显影响, 出现轻微类似蒸煮的成熟风味; 其质构也发生了明显的变化, 硬度随之增大, 弹性先在低压区域出现下降的趋势, 继而随着压力的增大和保压时间的延长弹性也增大。在压力 500MPa, 保压时间 25min 时, 虾肉的显微组织结构变化明显, 虾肉肌纤维的网状结构的间隙变小。处理前的样品肌肉纤维组织疏松, 网状结构均匀, 处理后肌肉纤维明显变粗, 变致密。这可能由于超高压引起肌肉蛋白质的变性, 使得虾肉中的肌肉纤维聚集在一起造成的。超高压处理过的对虾的空间间隙明显因受压而挤在一起, 而且其基本框架也相对于热加工的更粗, 这可能跟超高压过程中的蛋白质交联网络结构的形成有关系。

3.2 超高压对鱼糜品质的影响

淡水鱼鱼糜是一种以淡水鱼鱼肉为主要原料, 绞碎后加入食盐及各种辅料擂溃成鱼浆, 经成型、加热凝固后, 以淡水鱼肌原纤维为主要成分的肉食品。鱼糜中最重要的性质是它的凝胶特性, 指鱼糜中肌球蛋白在一定浓度、温度、压力、pH 值、离子强度、添加剂和酶等条件下形成三维网状交联体聚合物的能力, 鱼肉蛋白弹性凝胶体凝胶强度的高低, 是决定淡水鱼鱼糜及其制品质量优劣的关键因素^[52]。

鱼糜经超高压处理后, 有利于蛋白质分子间的交联, 改变蛋白质空间结构, 形成网络结构, 导致蛋白

质变性、聚集、凝胶化^[53-54]。胡飞华^[55]通过正交试验确定了梅鱼鱼糜超高压加工的最优条件为压力 300MPa、保压时间 15min、温度 20℃, 所得梅鱼鱼糜凝胶强度为 363.15g·cm、硬度 156.59g、弹性 1.58、内聚性 0.81、咀嚼性 191.54g, 单纯超高压处理得到的凝胶内聚性明显高于热处理样品。表明高压使得样品蛋白体积缩小, 结构紧凑, 有利于内部键的架构, 形成的凝胶比热处理更致密, 内部键强度更大。阮征等^[56]以凝胶强度和质构特性(TPA)为指标, 对罗非鱼的超高压凝胶化工艺进行了优化。优选方案为: 样品初温 4℃, 在 300MPa 保压处理 20min, 随后再用 90℃ 热处理 30min。经验证, 该工艺明显优于相应的单纯加热(二段法)和单纯加压(300MPa, 20min)处理, 优选方案获得的凝胶强度分别是单纯加热和加压的 1.96 和 1.24 倍, 而耐咀嚼性是单纯加热和加压的 1.35 和 1.85 倍。回复性和内聚性也明显大于单独加热的样品($P < 0.05$)。Hwang 等^[57]也发现经超高压处理的罗非鱼鱼糜凝胶强度和破断力比未处理样品显著提高。这是由于传统方法加工凝胶是由共价键形成的, 而经超高压处理的鱼糜通过形成共价键和非共价键增强凝胶结构, 同时高压处理能防止蛋白热变性从而形成具有一定黏性的鱼糜产品。实验充分表明, 超高压能增强鱼糜凝胶强度, 为鱼糜市场的进一步开发提供了可靠依据。

4 超高压在雨生红球藻虾青素提取中的应用

虾青素即 3,3'-二羟基 4,4'-二酮基- β , β' 胡萝卜素, 属于类胡萝卜素, 呈鲜红色, 是一种优质色素和超级抗氧化剂。在食品工业中, 不仅能有效起到保鲜、保色、保味、保质等作用, 而且能为多类食品着色, 增加食品的色泽美感, 虾青素还具有抑制肿瘤发生、增强免疫功能等多方面的生理作用^[58]。

雨生红球藻是一种生活在淡水中的单细胞绿藻, 在环境不利条件下形成厚壁孢子积累大量的类胡萝卜素(可达干质量的 2%~5%), 其中 80% 以上为虾青素及其酯类^[59]。郭文晶等^[60]利用超高压结合提取溶剂对从雨生红球藻中提取虾青素的工艺条件进行了研究, 确定了最优工艺条件: 提取压力 300MPa, 保压时间 1s, 提取溶剂为体积比 1:1 的乙酸乙酯、乙醇混合溶剂, 提取 2 次, 液固比分别为 100:1 和 50:1。在此工艺条件下, 雨生红球藻中虾青素转移率可达到 98%, 并通过体视显微镜观察发现红球藻细胞在超高压处理后没有破裂, 但颜色发生了显著变化, 细胞由鲜红色变成了浅灰色或者无色透明, 说明红球藻细胞中的虾青素基本被提取完全。万庆家等^[61]也研究了利用超高压提取雨生红球藻中虾青素的工艺, 确定最优工艺条件为: 提取溶剂为红花籽油, 提取压力 200MPa, 提取温度 4℃, 提取 2 次, 液固比

分别为 10mL/g。在此工艺条件下虾青素转移率可达到 90%, 与前者不同的是利用粒度分析仪发现超高压作用下雨生红球藻细胞孢子直径由 25~30 μ m 减小到 802nm(平均粒度)细胞在超高压处理后完全破裂。对于超高压处理雨生红球藻提取虾青素的机理还有待进一步研究。利用超高压法从雨生红球藻中提取虾青素具有工艺简单、提取时间短、转移率高、室温提取可以避免高温对虾青素的影响等优点。超高压对虾青素的提取主要通过破坏细胞结构, 使细胞膜通透性增加, 提高虾青素的渗出。

5 超高压在消除虾过敏原中的研究

在联合国粮农组织提出的八大类引起过敏的食物之中, 虾与蟹等甲壳类动物及其制品是重要的一类。海虾中存在的过敏原种类比较多, 但至目前研究比较清楚的是其主要过敏原 Pen a1 和 Penc 1, 二者都来源于肌肉组织中的糖蛋白原肌球蛋白^[62]。董晓颖等^[63]通过 100~500MPa 压力处理虾过敏蛋白, 经过不同压力处理后相对分子质量大小没有发生变化, 这说明超高压对虾过敏蛋白相对分子质量没有影响。这可能是由于超高压不能使虾肌纤维中的这种原肌球蛋白的四级结构发生解聚、交联或裂解, 从而不能生成一些小颗粒的亚基单位或者分子质量更大的蛋白质。从 100~400MPa 随着压力增大, 经间接竞争酶联免疫检测虾过敏蛋白抑制率降低, 说明适当高压处理对虾过敏蛋白的致敏性有降低作用, 且在 400MPa 时降至最低, 继续增至 500MPa 时抑制率反而有所增加, 这可能是由于随着压力的增加蛋白质的结构不断发生变化, 使过敏原表位被掩盖或破坏, 从而使其致敏性降低, 当压力增加到 500MPa 时蛋白质的结构进一步发生变化, 被掩盖的抗原表位又暴露出来, 使过敏蛋白的致敏性增加。Kim 等^[64]也曾报道超高压使虾过敏蛋白致敏性有所降低。超高压消除虾中过敏原的作用机理即是对蛋白质结构产生的影响。

6 超高压在甲壳类水产品脱壳中的应用

6.1 超高压在虾脱壳中的应用

在传统虾脱壳中由于虾的尾节外壳与体节外壳的硬度不同, 会导致虾仁的尾部发生断裂, 一部分虾仁也会出现体节中部断裂的现象。这些问题的出现不仅严重影响了虾仁的外观品质, 也影响了产虾仁率。杨徽等^[65]利用超高压技术在综合考虑虾脱壳时间、虾仁完整性、产虾仁率、虾的新鲜外观的保持等指标确定了虾脱壳的最优超高压条件为 200MPa 的压力和 3min 的保压时间。在此工艺条件下获得的虾仁完整性、颜色及嫩度等各感官指标都优于传统的速冻解冻处理。

6.2 超高压在牡蛎脱壳中的应用

牡蛎壳的钙含量为 39.78%，含有 9 种微量元素和 17 种氨基酸^[66]。开发利用价值巨大，可用于医疗保健，农业领域及轻工业中^[67]。但由于牡蛎的闭壳肌发达，牡蛎传统去壳方法费力且效率低下，开壳后的牡蛎肉受到破坏降低了产品的质量和感官品质。He 等^[68]研究发现超高压可使牡蛎闭壳肌与壳分离，获得完整多汁的牡蛎肉，使牡蛎加工工艺得到了优化。

瑞典的 Avure 公司生产的超高压设备已成功用于大龙虾、螃蟹、牡蛎等的商业化脱壳领域中。

7 超高压在水产品加工中的应用前景展望

超高压处理技术能够有效杀灭水产品中危害消费者安全的多数微生物，还能抑制一些对水产品质量不利的内源酶的活性，在不添加各类添加剂的情况下使水产品色、香、味及营养成分保存完整，并且能够有效延长水产品的贮藏期，另一方面也能够使水产食品多样化。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更符合当前绿色食品的要求，市场前景广阔。目前，超高压技术在水产品的基础研究与产品开发方面正处于初级阶段，在水产品加工中的应用绝大多数还处于理论研究状态，在中国市场尚未出现超高压加工的水产品。在单独使用超高压处理食品过程中耗能比较大，在水产品应用中可以结合热处理、酶处理等辅助加工方式处理，可以拓展超高压的应用范围。随着科研工作者的不断研究相信超高压在水产品中的应用将逐渐深入，前景将更加广阔。

参考文献：

- [1] 张洁. 牡蛎制品的研发及其生物活性评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [2] 苏秀榕, 李太武, 丁明进. 扇贝营养成分的研究[J]. 海洋科学, 1997(2): 10-11.
- [3] 刘玉锋, 毛阳, 王远红, 等. 日本枪乌贼的营养成分分析[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(增刊 1): 341-343.
- [4] SPILIMBERGO S, ELVASSORE N, BERTUCCO A. Microbial inactivation by high-pressure[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2002, 22: 55-63.
- [5] 方志民, 杨莲芬, 金大勇. 水产品加工废水蛋白质回收的研究[J]. 浙江工业大学学报, 2008, 36(2): 133-135.
- [6] BRIDGMAN P W. The coagulation of albumin by pressure[J]. J Bidehem, 1914, 19: 511-512.
- [7] 夏水文, 钟秋平. 食品冷杀菌技术研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2003, 15(6): 539-544.
- [8] 肖庆升, 朱勉学. 国内外食品超高压加工技术[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(1): 22-28.
- [9] 董吉林, 申瑞玲. 高压加工技术在水产品中的应用[J]. 食品与机械, 2006, 22(4): 12-15.
- [10] 戴昌芳, 方悦怡, 严纪文, 等. 生食水产品常见病原微生物污染与安全性评价[J]. 中国公共卫生, 2006, 22(4): 449-450.
- [11] ADAPA S, SCHMIDT K A, TOLEDO R. Functional properties of skim milk processed with continuous high pressure throttling[J]. Journal of Dairy Science, 1997, 80(9): 1941-1948.
- [12] CHEFTEL J C. Review: High-pressure, microbial inactivation and food preservation[J]. Food Science and Technology International, 1995, 1: 75-90.
- [13] SMELT J P P M, HELLEMONS J C, WOUTERS P C, et al. Physiological and mathematical aspects in setting criteria for decontamination of foods by physical means[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 78: 57-77.
- [14] WOUTERS P C, GALAASKER E, SMELT J P P M. Effects of high pressure on inactivation kinetics and events related to proton efflux in *Lactobacillus plantarum*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64: 509-514.
- [15] 高瑛珑, 鞠兴荣, 邱伟芬, 等. 超高压对大肠杆菌细胞膜流动性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1365-1371.
- [16] 宋吉昌, 李庆领. 海虾超高压灭菌的试验研究[J]. 渔业现代化, 2009, 36(1): 42-46.
- [17] 谢乐生, 杨瑞金, 朱振乐. 熟制对虾虾仁超高压杀菌主要参数探讨[J]. 水产学报, 2007, 31(4): 525-531.
- [18] LÓPEZ-CABALLERO M E, PÉREZ-MATEOS M, BORDERÍAS J A, et al. Extension of shelf-life of prawns (*Penaeus japonicus*) by vacuum packaging and high-pressure treatment[J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(10): 1381-1388.
- [19] MONTERO P, LÓPEZ-CABALLERO M E, PÉREZ-MATEOS M. The effect of inhibitors and high pressure treatment to prevent melanosis and microbial growth on chilled prawns (*Penaeus japonicus*)[J]. Journal of Food Science, 2001, 66(8): 1201-1206.
- [20] 谢慧明, 张文成, 潘见, 等. 淡水小龙虾中金黄色葡萄球菌超高压杀菌模型建立[J]. 食品科学, 2006, 27(11): 214-216.
- [21] 董晓伟, 姜国良, 李立德, 等. 牡蛎综合利用的研究进展[J]. 海洋科学, 2004(4): 62-65.
- [22] 蔡俊鹏, 孙丽滢. 广州秋季市售生蚝微生物污染状况调查[J]. 现代食品科技, 2010, 26(1): 120-121.
- [23] 陈艳, 刘秀梅. 福建省零售生食牡蛎中副溶血性弧菌的定量危险性评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2006, 18(2): 103-108.
- [24] 鲁健章, 陈瑞英, 沈晓盛, 等. 上海市市售带壳牡蛎微生物污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2007, 19(1): 18-20.
- [25] 张晓敏, 吴立杰, 吴佳艳, 等. 牡蛎的超高压加工技术研究[J]. 中国食物与营养, 2010(1): 55-58.
- [26] 陶晶. 牡蛎即食调理食品的研制[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [27] 夏远景, 陈淑花, 薛路舟, 等. 超高压处理牡蛎灭菌实验研究及人工神经网络模拟[J]. 现代食品科技, 2009, 25(5): 530-533.
- [28] BERLIN D L, HERSON D S, HICKS D T, et al. Response of pathogenic *Vibrio* species to high hydrostatic pressure[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65: 2776-2780.
- [29] CALIK H, MORRISSEY M T, RENO P W, et al. Effect of high-pressure processing on *Vibrio parahaemolyticus* strains in pure culture and Pacific oysters[J]. Journal of Food Science, 2002, 67: 1507-1510.
- [30] KURAL A G, CHEN Haiqiang. Conditions for a 5-log reduction of *Vibrio vulnificus* in oysters through high hydrostatic pressure treatment [J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 122: 180-187.
- [31] KURAL A G, SHEARER A E H, KINGSLEY D H, et al. Conditions for high pressure inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* in oysters[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 127: 1-5.
- [32] 高捷. 毛蚶保鲜技术的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [33] 王瑞, 乔长晟, 贾鹏, 等. 生鲜毛蚶超高压杀菌工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2007(1): 156-158.
- [34] 乔华林. 水产品腐败的形成与控制[J]. 肉类研究, 1998(1): 17-18.

- [35] HENDRICKX M, LUDI KHUYZE L, VANDENBROCAK I, et al. Effect of high pressure on enzymes related to food quality[J]. Food Science and Technology, 1998, 9: 197-203.
- [36] LUDI KHUYZE L, INDRAWATI, BROECK I V D, et al. Effect of combined pressure and temperature on soybean lipoxygenase. Influence of extrinsic and intrinsic factors on isobaric-isothermal inactivation kinetics [J]. J Agric Food Chem, 1998, 46(10): 4074-4080.
- [37] BROECK I V D, LUDI KHUYZE L R, LOEY A M V, et al. Inactivation of orange pectinesterase by combined high-pressure and temperature treatments: a kinetic study[J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(5): 1960-1970.
- [38] 励建荣, 俞坚. 超高压对酶活的影响[J]. 食品科技, 2006(9): 18-20.
- [39] MONTERO P, GIMENEZ B, PEREZ-MATEOS M, et al. Oxidation stability of muscle with quercetin and rosemary during thermal and high-pressure gelation[J]. Food Chemistry, 2005, 93: 17-23.
- [40] GÓMEZ-ESTACA J, LÓPEZ-CABALLERO M E, GÓMEZ-GUILLÉN M C, et al. High pressure technology as a tool to obtain high quality *carpaccio* and *carpaccio*-like products from fish[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10: 148-154.
- [41] GIMENEZ B, RONCALES P, BELTRAN J A. The effects of natural antioxidants and lighting conditions on the quality of salmon (*Salmo salar*) fillets packaged in modified atmosphere[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85: 1033-1040.
- [42] TANAKA M, XUEYI Z, NAGASHIMA Y, et al. Effect of high pressure on the lipid oxidation in sardine meat[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1991, 57(5): 957-963.
- [43] 章银良, 夏文水. 超高压对腌鱼保藏的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(9): 2636-2638.
- [44] GOULAS A, KONTOMINAS M G. Effect of modified atmosphere packaging and vacuum packaging on the shelf-life of refrigerated chub mackerel (*Scomber japonicus*): biochemical and sensory attributes[J]. European Food Research and Technology, 2007, 224: 545-553.
- [45] MONTIEL R, ALBA M D, BRAVO D, et al. Effect of high pressure treatments on smoked cod quality during refrigerated storage[J]. Food Control, 2011, 23: 429-436.
- [46] 邓记松. 超高压处理海珍品保鲜实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [47] CAMPUS M, ADDIS M F, CAPPUCINELLI R, et al. Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata* L.) following high pressure treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96: 192-198.
- [48] OJAGH S M, FLORES R N, CABALLERO M E L, et al. Lessening of high-pressure-induced changes in Atlantic salmon muscle by the combined use of a fish gelatin-lignin film[J]. Food Chemistry, 2011, 125: 95-606.
- [49] 薛路舟. 超高压处理对生物大分子的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [50] 刘延奇, 吴史博. 超高压对食品品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(3): 137-141.
- [51] 张蕾, 陆海霞, 励建荣. 超高压处理对凡纳滨对虾品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(12): 1-6.
- [52] 段传胜, 单杨. 淡水鱼鱼糜加工的研究进展与关键性技术探讨[J]. 农产品加工, 2007(7): 52-58.
- [53] 罗晓玲. 马蛟鱼鱼糜超高压凝胶化工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [54] HUGAS M, GARRIGA M, MONFORT J M. New mild technologies in meat processing: high pressure as a model technology[J]. Meat Science, 2002, 62: 359-371.
- [55] 胡飞华. 梅鱼鱼糜超高压凝胶化工艺及凝胶机理的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2010.
- [56] 阮征, 曾庆孝, 李汴生, 等. 罗非鱼糜超高压凝胶化工艺的优化研究[J]. 食品工业科技, 2007(8): 70-72.
- [57] HWANG J S, LAI K M, HSU K C, et al. Changes in textural and rheological properties of gels from tilapia muscle proteins induced by high pressure and setting[J]. Food Chemistry, 2007, 104: 746-753.
- [58] 刘子贻, 沈奇桂. 虾青素的生物活性及开发应用前景[J]. 中国海洋药物, 1997, 8(2): 46-49.
- [59] 庄惠如, 卢海声, 陈必链, 等. 雨生红球藻营养细胞的虾青素累积[J]. 水生生物学报, 2001, 25(4): 376-378.
- [60] 郭文晶, 张守勤, 张格, 等. 超高压提取雨生红球藻中虾青素的工艺优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 201-203.
- [61] 万庆家, 饶高雄, 史晓晨, 等. 超高压一步法萃取雨生红球藻孢子中虾青素工艺研究[J]. 辽宁中医药大学学报, 2010, 12(11): 24-25.
- [62] 吴海明, 胡志和. 海虾过敏原的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(7): 167-173.
- [63] 董晓颖, 高美须, 潘家荣, 等. 不同处理方法对虾过敏蛋白分子量及抗原性的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 548-554.
- [64] KIM S M, PARK J G, KIM K B W R, et al. Study on the changes in allergen and allergenicity originated from shrimp by physical treatments [J]. Journal of the Korean society of Food Science and Nutrition, 2006, 35(8): 990-996.
- [65] 杨徽. 基于超高压技术的虾脱壳工艺与品质检测研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2011.
- [66] 陈玉枝, 林舒. 牡蛎壳与龙骨成分的分析[J]. 福建医科大学学报, 1999, 33(4): 432-434.
- [67] 苗建银, 赵海培, 李超柱, 等. 牡蛎壳的开发利用[J]. 水产科学, 2011, 30(6): 369-372.
- [68] HE H, ADAMS R M, FARKAS D F, et al. Use of high-pressure processing for oyster shucking and shelf-life extension[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(2): 640-645.