



· 综述 ·

## 非热杀菌技术在生食水产品中的应用研究进展

李汴生<sup>1,2</sup>, 黄雅婷<sup>1</sup>, 阮征<sup>1\*</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640;

2. 华南理工大学, 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640)

**摘要:** 本文综述了传统生食水产品加工方法的生物性危害, 7种非热杀菌技术对水产品的杀菌作用及其对其品质的影响, 为非热杀菌技术在即食、生食水产品加工中的应用提供了参考。其中超高压杀菌技术、辐照杀菌技术、高密度CO<sub>2</sub>杀菌技术具有良好的杀菌效果, 同时对水产品品质的影响因水产品种类、工艺参数等条件的不同而存在差异。超高压杀菌技术和高密度CO<sub>2</sub>杀菌技术在高强度处理下会使鱼类、虾类等出现肉质透明度降低、硬度增加的现象, 辐照杀菌技术在高强度处理下则会使水产品产生异味。而稳定态二氧化氯、臭氧杀菌技术、酸性电解水和生物保鲜剂具有良好的减菌、抑菌效果, 对水产品品质的影响较小, 可用于延长水产品货架期, 维持品质。

**关键词:** 非热杀菌; 生食水产品; 安全; 感官品质

**中图分类号:** S 983; TS 254.4

**文献标志码:** A

我国很早之前便有生食水产品的传统, 现作为传统的风味食品常见于我国的沿海地区<sup>[1]</sup>, 其他国家如韩国、日本等也有生食水产品的传统饮食习惯。生食水产品保留了原材料的鲜味和细腻鲜美的口感, 辅以调味料, 是当今很受欢迎的美食之一, 鱼片和由各式水产品制成的刺身在世界范围内广泛流行<sup>[2]</sup>。但传统的生食水产品加工方法比较简单, 由于水产品感染细菌、病毒和寄生虫, 加之生食产品加工及食用方法不当等原因而引起的食源性疾病和食物中毒时有发生<sup>[1]</sup>, 而加热杀菌方式会在杀菌过程中导致水产品失去新鲜的口感、风味和色泽等特性。

非热杀菌技术是指使用非加热的方法来杀灭微生物的杀菌技术, 克服了一般热杀菌传热较慢和产生热损伤等弱点, 有利于保持食品中

的色、香、味及营养成分。超高压杀菌、辐照杀菌、臭氧杀菌、高密度CO<sub>2</sub>杀菌、酸性电解水杀菌和生物保鲜剂作为常用于水产品杀菌保鲜的非热杀菌方法, 能有效地杀灭微生物, 应用于水产品的暂养杀菌或贮藏保鲜中, 且能较好地保持水产品原有的营养口感、风味、色泽以及新鲜度, 具有明显优势<sup>[3]</sup>。将传统的水产品生食加工方法与非热杀菌相结合, 可以在保持生食水产品风味的同时保证产品的安全性, 具有良好的应用前景。

### 1 生食水产品的生物安全性

生食水产品可能会引发由病原菌、病毒、寄生虫等导致的食源性疾病<sup>[4]</sup>。参考 GB 10136—

收稿日期: 2019-09-20 修回日期: 2020-04-05

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFD0400400); 中央高校基本科研业务费专项; 广东省重点领域研发计划(2019B020212002)

第一作者: 李汴生(照片), 从事食品加工与保藏、食品加工安全控制的研究, E-mail: febskli@scut.edu.cn

通信作者: 阮征, E-mail: zhruan@scut.edu.cn



2015《食品安全国家标准 动物性水产制品》<sup>[5]</sup>中对即食生制动物性水产品的分类,可将生食水产品的加工食用方法分为两类,第一类:即食生食动物性水产品,以鲜活、冷冻或冷藏的动物性水产品为原料,经清洁加工而未经腌制或熟制,可以直接食用的生食水产品;第二类:腌制生食动物性水产品,以鲜活、冷冻或冷藏的动物性水产品为原料,经过盐渍或糟、醉加工制成的可以直接食用的腌制生食水产品。

### 1.1 即食生食水产品的生物安全性

即食生食动物性水产品,即以动物性水产品为原料,清洁后不经过高温杀菌处理直接食用,其可能会因为水体污染或存放、加工不当等原因而引发安全性问题。因生食被细菌如大肠杆菌 (*Escherichia coli*)、沙门氏菌 (*Salmonella*)、副溶血性弧菌 (*Vibrio parahaemolyticus*) 等感染的水产品而导致的食物中毒事件在多个国家、地区时有发生<sup>[6]</sup>,我国也暴发过因生食水产品导致的大规模甲肝病毒感染事件和多起寄生虫感染事件<sup>[7-8]</sup>。

### 1.2 腌制生食水产品的生物安全性

腌制生食动物性水产品,即以动物性水产品为原料,经盐渍或醉制而成可直接食用的腌制生食水产品。传统的腌制生食水产品的的方法非常简单,若不配合其他非热杀菌处理,则很难达到国家标准。

使用高浓度的盐溶液和酒类腌制生食水产品并不能保证生食水产品的生物安全性。虽然高浓度的盐溶液和酒类具有灭菌的作用,但是在生物载体存在的情况下,其灭菌效果会减弱。朱旻等<sup>[9]</sup>在实验中发现,白酒和黄酒均能彻底杀灭金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) 和副溶血性弧菌,但对日本沼虾 (*Macrobrachium nipponense*) 接种后再用酒类浸泡时,金黄色葡萄球菌对酒精以及酒精度的敏感度明显下降。Cho等<sup>[10]</sup>对螃蟹接种致病菌并用酱油(盐度为15.6%)腌制,28d后在浸泡的酱油中检测不到大肠杆菌 O157:H7 和鼠伤寒沙门氏菌 (*S. typhimurium*),但在螃蟹中仍能检测到。此外,传统腌制水产品的的方法难以解决寄生虫的问题,短时间内使用低度酒精进行醉制亦无法完全杀灭寄生虫<sup>[8]</sup>,即使在鱼类的湿法腌制中,盐和酸配合能对线虫的幼虫产

生一定的影响,但是对于吸虫的囊蚴仍需要进行干腌或发酵<sup>[11]</sup>。

在腌制生食动物性水产品中,因为革兰氏阳性菌具有渗透适应的机制,其耐受程度普遍比革兰氏阴性菌更高<sup>[12]</sup>。杨宪时等<sup>[13]</sup>研究蟹糊时发现,新鲜蟹中革兰氏阴性菌占多数,而蟹糊中基本为革兰氏阳性菌,在感官拒绝的蟹糊中其葡萄球菌比例超过50%。Cho等<sup>[10]</sup>进行的酱油腌制螃蟹接种实验中发现,从21d起螃蟹中的革兰氏阳性菌比革兰氏阴性菌存活率显著更高 ( $P<0.05$ )。在致病菌中,金黄色葡萄球菌耐盐能力很强(10%~15% NaCl),明显高于嗜盐菌副溶血性弧菌(7.5% NaCl)<sup>[14]</sup>。在孙之南等<sup>[15]</sup>的抑菌实验中,完全抑制金黄色葡萄球菌生长时所需的NaCl浓度为10%,大肠杆菌的则为5%。

由于“鲜淡风味”和冷链式产销的兴起,以及新标准中对氯化钠含量指标的取消,现市场上腌制生食水产品的氯化钠含量比以往要低。GB 10136—88《蟹糊卫生标准》中规定了蟹糊的盐分 $\geq 15\%$ ,该标准废除后的蟹糊、腌泥螺盐分普遍降至7%左右<sup>[16]</sup>,于是一些企业为了提高产品合格率加入了防腐剂或酒精<sup>[17]</sup>。同时,腌制水产品进行加工储存的卫生条件和生产季节也十分重要,居民出售自制的散装产品,市场食品未分区出售、环境脏乱也会增加污染的风险。

## 2 生食水产品的非热杀菌

### 2.1 超高压杀菌技术

超高压杀菌技术,是指以流体为传压介质,将包装好的物料在100 MPa以上的高压作用下进行处理,以达到灭菌、灭酶及改善物料结构和特性的目的非热加工技术。超高压处理是纯物理过程,只作用于非共价键结构,而不影响共价键结构,因此对维生素、色素、香气成分等小分子物质无显著性影响,可在保证食品安全的同时保留食物原有风味与营养成分<sup>[18]</sup>。近年来,国内外关于超高压技术在水产品冷藏保鲜加工研究非常多,主要集中在鱼、虾、蟹、贝等水产品的杀菌保鲜、脱壳、品质改良和快速冷冻解冻等方面。

超高压处理在生食水产品中的应用 超高压技术可运用于生食水产品的杀菌消毒、控

制内源酶和贝类脱壳上, 有效延长水产品的货架期<sup>[19-20]</sup>。陈少华等<sup>[21]</sup>研究表明, 采用 400~700 MPa 超高压协同保压时间及保压温度处理新鲜的凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*), 可有效实现鲜食的安全性。Ye 等<sup>[22]</sup>的研究表明, 300 MPa 下超高压处理 2 min, 可使经接种的美洲牡蛎 (*Crassostrea virginica*) 中的副溶血性弧菌含量减少超过 5 lg(MPN/g), 并完全灭活其中的创伤弧菌 (*V. vulnificus*)。Brutti 等<sup>[23]</sup>的实验表明, 在 300 MPa, 20 °C, 5 min 的超高压条件下, 足以杀灭鲭 (*Scomber scombrus*) 中体内的简单异尖线虫 (*Anisakis simplex*) 的幼虫。超高压处理会影响水产品内源酶的活性, Angsupanich 等<sup>[24]</sup>研究发现, 压力在 200 MPa 以上时, 大西洋鳕 (*Gadus morhua*) 中的中性蛋白酶活性显著降低。王帮国等<sup>[25]</sup>研究发现, 300 MPa 压力下处理 20 min 能使鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 肌肉中的脂肪氧合酶活性降低 93.10%。超高压技术可用于贝类脱壳, 延长冷藏、冷冻水产品的货架期, Cao 等<sup>[26]</sup>研究表明, 长牡蛎 (*C. gigas*) 最佳脱壳参数为 300 MPa、2 min, 处理后的样品在冷藏条件下能延长保质期至 12 d。Ramirez-Suarez 等<sup>[27]</sup>研究表明, 在 275 和 310 MPa 下处理长鳍金枪鱼 (*Thunnus alalunga*) 2、4、6 min, 可使保质期在 4 °C 和 -20 °C 条件下分别提高至少 22、93 d。此外, 超高压处理还能缩短腌制时间, 减少长时间腌制时微生物感染及风味不稳定的风险<sup>[28]</sup>。

**超高压处理对水产品品质的影响** 由于压力诱导的蛋白质变性和凝胶形成等原因, 超过一定压力值或处理时间过长时, 会使水产品的感官品质发生变化, 鱼、虾、蟹等水产品会出现熟制的外观, 质构发生变化, 但不会出现明显的熟制风味<sup>[29-33]</sup> (表 1)。Teixeira 等<sup>[34]</sup>研究表明, 舌齿鲈 (*Dicentrarchus labrax*) 在 100 MPa 以上的处理下随着压力和时间增加, 透明性会下降、肉质变白, 长鳍金枪鱼<sup>[27]</sup>、鲆 (*Coryphaena hippurus*)<sup>[33]</sup>、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)<sup>[35]</sup>、中华管鞭虾 (*Solenocera melanthero*)<sup>[36]</sup> 的  $a^*$  值也随着压力的增加而下降。超高压处理会提高鱼肉的硬度, 虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[33]</sup>、草鱼<sup>[35]</sup>、中华管鞭虾<sup>[36]</sup> 都出现了压力处理后硬度增大的现象。而贝类相比鱼、虾、蟹等在超高压处理后的变化更小, 耐受性更强。牡蛎<sup>[29, 32]</sup> 经 300 MPa

处理再烹饪后的风味喜欢度和鲜牡蛎无显著性差异, 超高压处理对牡蛎的  $L^*$  值、质构无显著性影响。由此可知, 在一定范围内采用超高压处理生鲜水产品, 可以起到杀菌的作用并较好地保持其品质, 但随着处理强度的增加, 会对水产品的色差、质构等产生一定的影响, 甚至使鱼类出现熟制的外观。而一些水产品如贝类对超高压的耐受性则较强, 品质受影响较小。

## 2.2 辐照杀菌技术

辐照杀菌技术, 是指利用一定剂量的波长极短的电离射线对食品进行辐照, 以达到抑制发芽、灭菌杀虫、保证食品的新鲜度和安全性等目的物理杀菌技术<sup>[37]</sup>, 常用的射线有  $\gamma$  射线、X 射线和电子束射线。食品辐照杀菌属于非热杀菌技术, 对食品的天然品质没有明显影响, 可应用于对温度或压力敏感的食品的杀菌消毒中, 其穿透力强, 杀菌效果好, 适用于包装食品的内部杀菌消毒, 无有害物质污染与残留、适用范围广、操作简单并且节能<sup>[3, 38]</sup>。

**辐照处理在生食水产品中的应用** 辐照杀菌技术可运用于冷冻、新鲜或经过加工包装的生食水产品中, 能有效杀灭微生物和寄生虫, 延长货架期, 如运用于醉泥螺<sup>[39]</sup>、蟹糊<sup>[40]</sup> 等腌制生食水产品的杀菌处理中, 可有效延长货架期 (表 2)。我国行业标准 NY/T 1256 冷冻水产品辐照杀菌工艺规定了冷冻水产品的辐照工艺剂量为 4~7 kGy<sup>[41]</sup>。Mahmoud 等<sup>[42]</sup> 对金枪鱼鱼片人工接种沙门氏菌, 测得初始水平为 (7.6±0.5) lg CFU/g, 再用 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 kGy 的 X 射线处理鱼片, 结果沙门氏菌数分别减少 2.9、3.2、3.7、4.2、5.1 lg CFU/g, 而用 0.6 kGy 的 X 射线处理可使沙门氏菌的数量降至低于检测水平 (<1.0 lg CFU/g) 且对照组和实验组的颜色和硬度均无显著差异 ( $P>0.05$ )。在 Mahmoud 等<sup>[43]</sup> 的研究中, 1.0 kGy 的 X 射线处理后的带壳美洲牡蛎中, 副溶血弧菌和固有菌群数量低于检测限值 (<1.0 lg CFU/g), 能有效延长货架期。杨文鸽等<sup>[44]</sup> 的研究结果表明, 经 1、3 和 5 kGy 处理后的牡蛎在冷藏条件下其保质期由 3 d 分别延长至 7、10 和 11 d。辐照技术可运用于经过加工包装的食品杀菌中, 陈秀兰等<sup>[45]</sup> 的研究显示, 经 4~8 kGy 的  $\gamma$  射线辐照后的罐装或听装醉蟹在常温下保质期可由 3 个月延长至 6 个月, 且氨基酸下降变缓。

表1 超高压处理对水产品的感官、色差和质构的影响

Tab. 1 Effects of ultra-high pressure treatment on sensory, color and texture of aquatic products

产品 products	处理 treatments	分析方法 analysis method	影响 effects	参考文献 references
<b>感官分析 sensory analysis</b>				
美洲牡蛎 <i>C. virginica</i>	300 MPa, 25 °C和300、450、500 MPa, 0 °C, 2 min	85名志愿者对牡蛎的4种感官特性(外观、香气、颜色和整体可接受性)进行感官评定	300 MPa、25 °C的样本平均整体可接受性评分最高, 与对照组相比, 脱壳牡蛎更完整、饱满, 因此更受欢迎	[29]
硬壳蛤 <i>Mercenaria mercenaria</i>	310 MPa, 常温, 180 s	60名未训练的志愿者对蛤蜊在香气, 外观和味道的喜好程度打分, 并选出最喜欢的一种	约一半成员更喜欢超高压处理的硬壳蛤, 认为其饱满度更佳	[30]
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	150、200、250、300、350 MPa, 常温, 5 min	由6名经过专业培训的实验人员组成的小组, 对样品的色泽、肌肉组织、气味进行感官评定	150~250 MPa时与对照组相比无显著性变化( $P>0.05$ ), 250 MPa后肌肉逐渐变白, 300 MPa后产生了微弱的熟化的气味	[31]
长牡蛎 <i>C. gigas</i>	150、200、250、300 MPa, 4 °C、2 min	将牡蛎烹饪后进行感官评价, 由64名受试者进行感官评估, 92名消费者进行喜好程度的测试	在总体喜好上250和300 MPa处理的样品得分最高, 样品间风味喜欢度和鲜牡蛎风味强度无显著性差异( $P>0.05$ )	[32]
<b>色差分析 color analysis</b>				
美洲牡蛎 <i>C. virginica</i>	300 MPa, 25 °C和300、450、500 MPa, 0 °C, 2 min	使用色差计测量色差	超高压处理的牡蛎的 $L^*$ 值略有增加, 但无显著性影响( $P>0.05$ );	[29]
长鳍金枪鱼 <i>T. alalunga</i>	275和(310±3.45) MPa, 10 °C, 2、4、6 min	使用三色分析仪测定颜色	随着压力和时间增加, $L^*$ 、 $b^*$ 值增加, $a^*$ 值减小	[27]
麒麟 <i>C. hippurus</i>	150、300、450、600 MPa, 常温, 15 min	使用CMVS测量并用软件进行色差分析	随着压力增加, $L^*$ 值增大 $a^*$ 值下降, 处理后样品的 $b^*$ 值均增大, 且逐渐出现熟制的外观	[33]
舌齿鲈 <i>D. labrax</i>	100、250、400 MPa, 常温, 5、15、30 min	使用色差计CR-400进行色差分析	100 MPa处理下无显著影响, 随着压力和时间增加, 透明度下降, 变得更白, 显示出煮熟的外观	[34]
草鱼 <i>C. idella</i>	100、200、300、400、500 MPa, 10 min	使用色差计CR-400进行色差分析	100 MPa时 $L^*$ 值和白度变化不显著( $P>0.05$ ), 200 MPa及以上时 $L^*$ 值和白度显著增大( $P<0.05$ )	[35]
中华管鞭虾 <i>S. melantho</i>	100、200、300、400、500 MPa, 常温, 5 min	使用色差计CR-400, 用Lab模型对虾仁进行色差测定	虾仁内部的 $a^*$ 值随着压力的增加而减少, 200 MPa与对照组相比 $a^*$ 值显著降低( $P<0.05$ )	[36]
<b>质构分析 texture analysis</b>				
美洲牡蛎 <i>C. virginica</i>	300 MPa, 25 °C和300、450、500 MPa, 0 °C, 2 min;	使用2 mm圆柱探头在TA-90H板上穿透样品, 测试速度1 mm/s, 距离为10 mm	与对照组相比, 高压处理使牡蛎组织的剪切力略微提高, 但无显著性影响( $P>0.05$ )	[29]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	450、600 MPa, 常温, 15 min	圆柱形探针( $\Phi=38$ mm)速度100 mm/min、压缩负荷100 N, 压缩两次至原高度70%	样品硬度、弹性显著高于对照组, 咀嚼性和黏结性增加	[33]
草鱼 <i>C. idella</i>	100、200、300、400、500 MPa, 10 min	P/6平底柱形探头, 速度测前3.00 mm/s, 测试1.00 mm/s、返回1.00 mm/s、压缩程度50%, 压缩2次	超高压处理可提高鱼肉硬度, 200 MPa及以上处理的草鱼肌肉硬度显著增大( $P<0.05$ ),	[35]
中华管鞭虾 <i>S. melantho</i>	100、200、300、400、500 MPa, 常温, 5 min	P50探头, 测前速率2 mm/s, 测试速率1 mm/s, 测后速率1 mm/s, 应变50%	硬度、弹性和咀嚼性均随压力的增加而升高, 硬度的改变最明显, 100 MPa处理的硬度从180上升至210 g	[36]

表 2 辐照杀菌处理对水产品的感官、色差和质构的影响

Tab. 2 Effects of irradiation on sensory, color and texture of aquatic products

产品 products	处理 treatments	分析方法 analysis method	影响 effects	参考文献 references
<b>感官分析 sensory analysis</b>				
褶牡蛎 <i>C. plicatula</i>	电子束辐照, 剂量1、3、5、7、9 kGy, 剂量率1 kGy/s	8名经过训练的人员对牡蛎的气味、色泽、组织弹性、黏液外观方面进行感官评分	在色泽和形态上几乎没有变化, 但7 kGy和9 kGy, 尤其是9 kGy时出现异味	[44]
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	60Co- $\gamma$ 射线, 辐照剂量为0、1、2、3、4、5、6、7、8 kGy	样品经腌制、汽煮、辐照后, 由10名专业人员(5男5女)对色泽、口感、气味进行感官评估	处理对色泽、气味有较大影响, 对口感的影响较小; 剂量大于等于7.57 kGy时会产生辐照异味	[46]
牡蛎 <i>C. brasiliana</i>	钴-60为放射源, 剂量3.0 kGy	19名经培训的人员对牡蛎的外观、气味进和烤制后的牡蛎风味进行感官评价	在外观、气味上无显著性差异; 经过烤制后在风味上也没有显著性差异	[47]
远海梭子蟹 <i>P. pelagicus</i>	钴-60为放射源, 剂量2、4、6 kGy, 剂量率0.12 kGy/min	由50名半培训的人员确定是否存在感官上的变化, 使用三角差异测试程确定样本中是否存在整体差异	三角测试结果表明, 经辐照处理的蟹感官品质与未处理的存在整体差异	[48]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	钴-60为放射源, 剂量2、4、6 kGy, 剂量率1500 Gy/h	将虾煮熟后进行感官评价, 由64名未经培训的消费者对感官进行评估	辐照对香气、风味和多汁性的影响不显著, 2 kGy时总体接受度良好, 6 kGy时显著降低	[49]
醉泥螺 liquor-saturated <i>Bullacta exarata</i>	电子束辐照, 剂量为0、1、3、5、7、9 kGy	由8名评定人员为以醉泥螺的气味、色泽、口味、形态进行感官评定	1~9 kGy时对色泽、形态几乎没有影响, 5 kGy下开始产生些许异味, 9 kGy下异味较明显	[39]
<b>色差分析 color analysis</b>				
远海梭子蟹 <i>P. pelagicus</i>	钴-60为放射源, 剂量2、4、6 kGy, 剂量率0.12 kGy/min	使用色差计CR-10测量色差	对L*值没有显著性影响, 2和4 kGy时a*和b*值略有变化, 但感官上无法分辨	[48]
金枪鱼 tuna	使用X射线进行辐照, 剂量0.6 kGy, 剂量率1.0 kGy/min	使用色差计测量色差	X射线处理使鱼肉的a*值下降 ( $P<0.05$ )	[42]
金枪鱼 tuna	钴-60为 $\gamma$ 射线放射源, 剂量0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 kGy, 剂量率5.6 kGy/h	使用色差计测量色差	金枪鱼鱼肉的L*值没有显著性变化, a*值和b*值在高辐照剂量下发生了下降, 在4.0 kGy时最低	[50]
三文鱼 salmon	能量为10 MeV, 功率20 kW的电子束辐照处理, 剂量为0、0.5、1.0、2.0 kGy	使用色差计CR-400进行色差分析	a*值与L*值下降, 使三文鱼的红色变浅变暗淡, 且随着剂量的增大变化更明显	[51]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	钴-60为放射源, 剂量2、4、6 kGy, 剂量率1500 Gy/h	使用色差计CR-300进行色差分析	6 KGy的L*值比2 KGy显著增加 ( $P<0.05$ ), 对a*和b*值没有影响 ( $P>0.05$ )	[49]
<b>质构分析 texture analysis</b>				
远海梭子蟹 <i>P. pelagicus</i>	钴-60为放射源, 剂量2、4、6 kGy, 剂量率0.12 kGy/min	使用Ta.txt plus测量质构变化, 力量感应元50 kg, 十字头速度100 mm/min	对蟹肉的最大剪切力没有显著性影响 ( $P>0.05$ )	[48]
金枪鱼 tuna	使用X射线进行辐照, 剂量0.6 kGy, 剂量率1.0 kGy/min	圆柱形探针( $\Phi=10$ mm), 十字头速度50 mm/min, 进行穿刺测试	对鱼肉的硬度没有显著性影响	[42]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	钴-60为放射源, 剂量2、4、6 kGy, 剂量率1500 Gy/h	使用Warner-Bratzler刀片, 运行速度3.3 mm/s	辐照处理对剪切力值没有显著性影响 ( $P>0.05$ )	[49]

**辐照处理对水产品品质的影响** 辐照处理过程中, 食品的温度升高很小, 对食品的破坏小, 有利于保持食品原有色、香、味等方面的品质。但是高剂量的辐照处理可能会产生蛋白质的辐射降解产物或脂质的氧化产物, 从而使肉类产生异味<sup>[52]</sup>, 研究表明, 牡蛎<sup>[44]</sup>在经过7和9 kGy剂量的电子束辐照处理后出现了异味, 凡纳滨对虾<sup>[49]</sup>在剂量为6 kGy时的总体可接受度显著性降低, 大口黑鲈<sup>[46]</sup>在剂量大于等于7.57 kGy时会产生难以接受的辐照异味, 醉泥螺<sup>[39]</sup>在9 kGy剂量下会产生较明显的辐射异味。高剂量的辐照处理也会使水产品色泽略微发生变化, 如使金枪鱼<sup>[50]</sup>和三文鱼<sup>[51]</sup>的红色变浅, 凡纳滨对虾<sup>[49]</sup> L\*值增加, 但对质构没有明显的影响。由此可知, 辐照杀菌技术具有穿透力强、杀菌效果好、能有效保留食品原有品质的特点, 但高剂量的辐照处理会使水产品产生异味, 色泽发生变化, 因此需要选择合适的辐照剂量以保证杀菌效果和品质。

### 2.3 高密度 CO<sub>2</sub> 杀菌

高密度 CO<sub>2</sub> (dense phase carbon dioxide, DPCD) 是液态 CO<sub>2</sub> 和超临界流体 CO<sub>2</sub> 或高压 CO<sub>2</sub> 的统称<sup>[53]</sup>, 可利用于食品的非热杀菌中, 以达到杀菌、钝酶、蛋白质变性等目的。DPCD 技术能够降低杀菌所需的处理温度、压力及时间, 与热杀菌相比其对热敏物质破坏较小, 能保留食物原有的营养与风味, 与超高压杀菌 (100~1000 MPa) 相比具有节能、成本低、无噪音等优点<sup>[54]</sup>。DPCD 技术应用于液体食品中能达到较好的效果, 但在固体食品的应用中较困难, 因为 CO<sub>2</sub> 在固体食品中溶解和扩散较慢, 并可能对其质构与品质产生不良影响, 目前其应用的固体食品主要有新鲜果蔬、肉制品和水产品等<sup>[55]</sup>。

#### 高密度 CO<sub>2</sub> 杀菌在生食水产品中的应用

DPCD 技术在水产品的应用研究主要集中在虾类和贝类, 具有较好的杀菌、钝酶的效果。吕妙兄<sup>[56]</sup>的研究结果显示, 皱纹盘鲍 (*Haliotis discus hannai*) 浆体在高压 CO<sub>2</sub> 处理条件范围为 5~35 MPa、32.7~50.0 °C、10~50 min 可达到生食水产品的卫生要求。Meujo 等<sup>[57]</sup>研究超临界流体 CO<sub>2</sub> 对牡蛎的灭菌效果, 结果表明 10 MPa、37 °C、30 min 能使牡蛎的细菌总数显著下降 ( $P=0.002$ ), 使肠道微生物负荷减少 97.6%, 相应

减少 2 个对数; 17.2 MPa、60 min、60 °C 时的灭菌效果更明显, 能使牡蛎肉的细菌总数 (EAPC) 从 7.3 降至 4.5 lg CFU/g。Wei 等<sup>[58]</sup>的实验表明, 13.7 MPa、35 °C、2 h 的高压 CO<sub>2</sub> 条件下可有效杀灭虾中 99% 的单核细胞增生李斯特氏菌 (*Listeria monocytogenes*)。DPCD 技术还有良好的钝酶效果, 张良<sup>[59]</sup>的研究显示, 高密度 CO<sub>2</sub> 处理能钝化凡纳滨对虾中的多酚氧化酶, 钝化效果随着压力与时间的增加而增加, 在 37 °C、25 MPa、30 min 条件下, 对虾中多酚氧化酶残留酶活性为 0±0.11%。

#### 高密度 CO<sub>2</sub> 杀菌对水产品品质的影响

相对于热处理, DPCD 处理对水产品的品质影响要小, 但随着处理压力、时间和温度的上升, 在超过一定条件下也会对水产品的感官品质产生影响 (表 3)。随着处理压力、温度和时间的增加, 虾仁会出现表面红色加深、透明度降低、硬度增加<sup>[62]</sup>的现象; 皱纹盘鲍在处理色泽稍有变化, 但外形完整, 无明显收缩现象, 在高强度处理下会出现弹性增大、硬度下降的现象<sup>[56, 63]</sup>。由此可知, DPCD 处理对水产品品质的影响与压力、时间和温度参数及水产品种类有关, 需要在今后的研究中进一步优化压力、时间和温度参数, 以控制 DPCD 处理对水产品品质的影响。

### 2.4 稳定态二氧化氯

二氧化氯是一种强氧化剂, 氧化能力约为氯气的 2.5 倍<sup>[64]</sup>。其只与各种物质发生氧化反应, 不与氨、腐殖酸或其他有机前体发生取代反应产生有害物质氯胺、氯酚和三卤甲烷<sup>[65]</sup>, 可以有效杀灭各种致病菌以及病毒, 并且在低浓度和 pH 范围 3~8 内有效<sup>[66]</sup>, 是一种安全高效的消毒剂, 被联合国卫生组织列为 A1 级消毒剂, 在我国食品安全国家标准中, 稳定态二氧化氯可作为防腐剂、食品加工助剂运用于食品加工中。目前, 二氧化氯可应用于食品的保鲜消毒、饮用水消毒、藻类等生物污染控制、水产养殖等方面<sup>[67-68]</sup>。

#### 稳定态二氧化氯在生食水产品中的应用

稳定态二氧化氯可运用于鲜活的虾、贝类等暂养杀菌, 水产品的杀菌保鲜, 或制成保鲜冰运用于水产品保鲜中, 具有杀菌效果明显, 残留量极低的优点。陶晶<sup>[69]</sup>研究了二氧化氯对牡蛎的海水暂养杀菌情况, 结果显示, 二氧化氯浓

表3 高密度CO<sub>2</sub>处理对水产品的感官、色差和质构的影响

Tab. 3 Effects of dense phase carbon dioxide on sensory, color and texture of aquatic products

产品 product	处理 treatments	分析方法 analysis method	影响 effects	参考文献 reference
<b>感官分析 sensory analysis</b>				
牡蛎 ostrea	10 MPa、20 min, 110 MPa、50 min, 20 MPa、50 min, 20 MPa、20 min, 37 °C	13名人员对牡蛎的外观、气味、质构进行新鲜度评分, 并得出0~6的总体评分, 分数≥3时被判断为可接受	对照组评分为4.9, 处理组分数均≥3, 处理组中100 bar, 20 min, 37 °C的评分最高, 为4.4	[57]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	15、0.1 MPa, 55 °C、26 min; 水煮处理: 100 °C、2 min, 55 °C、26 min	7名小组成员对对虾的外观变化进行感官评估	55 °C、15 MPa、26 min下对虾颜色变红, 55 °C、0.1 MPa, 26 min下对虾虽保持新鲜时的外观, 但灭菌效果不明显	[60]
皱纹盘鲍 <i>H. discus hannai</i>	0.1、5、10、15、20、25 MPa, 40 °C, 30 min; 30、35、40、45、50 °C, 15 MPa, 30 min; 10、20、30、40、50 min, 15 MP, 40 °C	10名专业的人员对鲍鱼的外观、色泽进行感官评定, 结果以平均分显示	色泽稍有变化, 但外形完整, 无明显收缩现象; 感官评分随温度、压力先升后降, 随时间先增加后稳定	[56]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	55 °C、15 MPa、26 min; 水煮处理: 100 °C、2 min	对对照组、高密度CO <sub>2</sub> 处理组、水煮处理组的对虾进行呈味成分测定	除了甜菜碱、PO <sub>3</sub> - 4和Cl <sup>-</sup> 含量下降, 对其他主要呈味物质含量无显著性变化; 而热处理会造成大部分呈味物质的损失	[61]
<b>色差分析 color analysis</b>				
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	45 °C, 30 min, 5、10、15、20、25 MPa; 45 °C, 15 MPa, 10、20、30、40、50 min; 30 min, 15 MPa, 35、40、45、50、55 °C	使用全自动测色色差仪测量色差	随着压力、温度和时间的增加, L*、a*、b*值均有显著升高(P<0.05), 虾仁表面红色加深, 透明度降低	[62]
皱纹盘鲍 <i>H. discus hannai</i>	0.1、5、10、15、20、25 MPa, 40 °C, 30 min; 30、35、40、45、50 °C, 15 MPa, 30 min; 10、20、30、40、50 min, 15 MPa, 40 °C	采用色差计测定亨特色空间参数	随着压力、温度和时间的增加, L*和b*值增大, a*值减小; 当≥10 MPa或≥40 °C或≥20 min时, L*、a*和b*值有显著差异(P<0.05)	[63]
<b>质构分析 texture analysis</b>				
皱纹盘鲍 <i>H. discus hannai</i>	0.1、5、10、15、20、25 MPa, 40 °C, 30 min; 30、35、40、45、50 °C, 15 MPa, 30 min; 10、20、30、40、50 min, 15 MPa, 40 °C	圆柱平探头(Φ=5 mm), 起始力0.2 N, 测试速度60 mm/min, 使样品压缩至75%, 进行硬度和弹性的测定	≥40 °C或≥15 MPa或≥40 min时, 弹性显著增大(P<0.05), 硬度显著下降(P<0.05)	[56]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	55 °C、15 MPa、26 min; 水煮处理: 100 °C、2 min	TPA模式, 5 mm的圆柱型探头(Φ=5 mm), 测前速率1 mm/s, 测试速率1 mm/s, 测后速率1 mm/s, 变形量60%	DPCD处理对虾的肌肉硬度无显著影响, 而水煮处理的肌肉硬度显著增加, DPCD处理与水煮的弹性都显著下降	[59]
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	45 °C, 30 min, 5、10、15、20、25 MPa; 45 °C, 15 MPa, 10、20、30、40、50 min; 30 min, 15 MPa, 35、40、45、50、55 °C	柱形探头(Φ=5 mm), 测试速度1 mm/s, 应变60%, 起始力0.2 N, 量程1 000 N, 样品高17 mm	虾仁的硬度随着处理强度的增加显著增加(P<0.05)	[62]

度为 12.5 mg/g 时, 其对海水的杀菌率达到 99.99% 以上, 牡蛎经过吐沙和在二氧化氯浓度为 18.75 mg/g 的海水中消毒 30 h 后, 菌落总数、大肠菌群及致病菌均符合国家标准, 且牡蛎肉中的二氧化氯残留量极低, 不会对人体造成不利影响。张碧娜<sup>[70]</sup>的研究表明, 二氧化氯浓度 30 mg/L、暂养 20 min 对凡纳滨对虾的杀菌效果明显, 且

对虾的色泽和肌肉的破坏较小。除了应用于鲜活水产品的暂养杀菌中, 稳定态二氧化氯还可用水产品的冷藏保鲜, 季晓彤等<sup>[71]</sup>研究表明二氧化氯处理结合微冻贮藏可以有效提高卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*) 鱼块的鲜度, 并延长其货架期。罗自生等<sup>[72]</sup>用二氧化氯处理凡纳滨对虾, 在 0 °C 的贮藏温度条件下, 在 6 d 时对照组的

TVC值为腐败级别的6.34 lg CFU/g, 而经10和20 mg/L 固载二氧化氯处理的样品均处二级鲜度范围。

稳定态二氧化氯对水产品品质的影响  
将稳定态二氧化氯应用于水产品的保鲜中, 能有效延缓腐败变质, 维持在贮藏期间的新鲜度(表4)。二氧化氯处理在适合的参数条件下对样品的外观、风味和质构等无明显影响, 但在处理浓度或时间过长的情况下, 也会由于二氧化氯的氧化作用等原因导致水产品的色泽发生变化, 例如在100和200 mg/L的处理条件下, 扇贝和鱼片出现生锈的颜色, 鱼皮颜色变浅, 鱼的鳃部呈浅巧克力色<sup>[73]</sup>。由此可知, 在适合的浓度范围内, 采用稳定态二氧化氯处理水产品, 能在发挥杀菌保鲜作用的同时保持水产品的品质。

## 2.5 臭氧杀菌技术

臭氧(O<sub>3</sub>)是常温下几乎无色, 高浓度时呈蓝色且具有特殊刺激性气味的气体<sup>[76]</sup>, 在水溶液中非常不稳定, 15℃时在水中的半衰期为30 min, 且极易溶于水, 在水中迅速降解为氧气, 在气

态时相对稳定。臭氧具有强氧化性, 是一种高效、广谱的抗菌剂, 可以以空气为媒介或以水为载体, 用于净化空气、水处理、降解农药、杀菌消毒、灭酶、杀虫等目的, 具有高效广谱、低残留、环境友好等优势<sup>[77]</sup>。

臭氧在生食水产品中的应用 臭氧可应用于水产品的杀菌保鲜、鲜活水产品的暂养杀菌或制成保鲜冰, 可有效降低微生物数量, 且因为臭氧使用后可自行降解, 具有低残留的优点。Chen等<sup>[78]</sup>在5℃下用9 mg/L的臭氧处理牡蛎(牡蛎: 臭氧水=1:6, 质量体积比), 使菌落总数从(4.97±0.11) lg CFU/g降低到(2.93±0.17) lg CFU/g, 保质期从5~10 d增加到20~25 d。Crowe等<sup>[79]</sup>用1.5 mg/L的臭氧喷雾处理鲑鱼片, 结果显示, 李斯特氏菌计数明显减少( $P < 0.05$ ), 可有效减少需氧型菌群的数量。将臭氧水冻结制成臭氧冰, 不仅保留了臭氧的功能效果, 还具有保鲜效果好、使用方便的特点<sup>[80]</sup>。黎柳等<sup>[81]</sup>的研究显示, 使用浓度为0.89 mg/kg的臭氧冰可以延长东海白鲟(*Ephippus orbis*)的货架期1~2 d。刁石强等<sup>[82]</sup>研究显示, 含量为5 mg/kg的臭

表4 二氧化氯处理对水产品的感官、色差和质构的影响

Tab. 4 Effects of chlorine dioxide treatment on sensory, color and texture of aquatic products

产品 product	处理 treatments	分析方法 analysis method	影响 effects	参考文献 reference
<b>感官分析 sensory analysis</b>				
黑缘石斑鱼 <i>Epinephelus morio</i> 大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>	二氧化氯浓度20、40、100、200 mg/L, 处理5 min	10名经过培训的感官小组成员对外形、色泽、气味进行感官评定	20、40 mg/L时对外观或色泽、气味无影响; 100和200 mg/L时鱼片出现生锈的颜色, 鱼皮颜色变浅, 鳃部呈浅巧克力色	[73]
扇贝 <i>Aequipecten gibbus</i>	二氧化氯浓度20、40、100、200 mg/L, 处理5 min	10名经过培训的感官小组成员对外形、色泽、气味进行感官评定	经20、40 mg/L的二氧化氯处理可除去扇贝原有的腥味; 100、200 mg/L处理后的扇贝出现生锈的颜色	[73]
罗非鱼 <i>Oreochromis spp.</i>	二氧化氯浓度50、100、150 mg/L, 处理5、10、15 min	8名经过培训的感官评定人员对色泽以及气味进行评定	色泽和气味的感官评分随着时间的增加略有下降, 而不同浓度对色泽和气味的评分没有较大影响	[74]
<b>色差分析 color analysis</b>				
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	二氧化氯浓度20、30 mg/L, 暂养10、20、30 min	使用色差仪测定色差	虾体的 $a^*$ 值、 $b^*$ 值随着浓度与时间的增加略微上升, 但颜色变化不明显	[70]
鲱鱼籽 herring egg	二氧化氯浓度20、40、60 mg/L, 处理15、30、45 min	使用色差仪测定色差	随着浓度和时间增加 $L^*$ 值和 $b^*$ 值下降, $a^*$ 值上升, 色泽逐渐由黄色变成红色	[75]
<b>质构分析 texture analysis</b>				
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	二氧化氯浓度20、30 mg/L, 暂养10、20、30 min	HDP/BS探头, 测前速度1.0 mm/s, 测试速率1.0 mm/s, 测后速度10.0 mm/s, 进行剪切测试	肌肉剪切力略微下降	[70]



臭氧可以降低罗非鱼片挥发性盐基氮的产生, 使菌落总数减少 82%~97%, 并延长产品的货架保鲜期 3~4 d。杜文静<sup>[83]</sup>的研究显示, 3.53 mg/kg 的臭氧冰能有效控制鲑鱼 pH 值的回升, 抑制菌落总数的增加和挥发性盐基氮的产生, 并延长货架期 4~5 d。

**臭氧对水产品品质的影响** 将臭氧运用于水产品处理中, 能起到减菌、抑菌的作用, 并有效延长货架期, 但是会对色泽、风味等产生一定影响(表 5)。用臭氧水处理虾仁<sup>[84]</sup>和军曹鱼(*Rachycentron canadum*)<sup>[85]</sup>, 结果显示, 时间相同时浓度对感官评分的影响小, 浓度相同时感官评分随时间的增加而下降。李杉等<sup>[74]</sup>将臭氧水与其他减菌化预处理比较, 发现经不同方法处理后的罗非鱼片色泽及气味均与对照组有差异( $P<0.05$ ), 但臭氧水处理组与对照组的差异最小, 且无减菌液气味的残留。魏涯等<sup>[84]</sup>将臭氧水与其他减菌化预处理比较, 发现经不同处理后虾体颜色呈

变淡趋势, 但相比其他处理方式, 臭氧水处理对虾仁色泽影响最小。由此可知, 采用臭氧水处理水产品, 其感官品质受处理时间的影响较大, 与其他减菌化预处理相比较, 臭氧水处理虽然也会对色泽和气味产生影响, 但影响相对较小。

## 2.6 酸性电解水

强酸性电解水 (acidic electrolyzed water, AEW), 是通过隔膜式电解装置电解稀氯化钠、盐酸溶液或二者的混合液制备, 具有低 pH 值 (pH 值 $<3.0$ )、高氧化还原电位 (ORP $>1\ 000$  mV) 和一定的有效氯浓度 (ACC 20~60 mg/L) 的特点<sup>[87]</sup>。微酸性电解水 (slightly acidic electrolyzed water, SAEW), 是通过无隔膜式电解装置电解稀氯化钠或盐酸溶液或二者的混合液来制备<sup>[88]</sup>, pH 值为 5.0~6.5, 主要的有效氯化物形式为次氯酸, 具有强抗菌性<sup>[89]</sup>, 弱腐蚀性, 且在近中性的 pH 值下可最大限度地减少  $\text{Cl}_2$  的产生的特点, 更环保、安全。在

表 5 臭氧杀菌处理对水产品的感官、色差和质构的影响

Tab. 5 Effects of ozone on sensory, color and texture of aquatic products

产品 product	处理 treatments	分析方法 analysis method	影响 effects	参考文献 reference
<b>感官分析 sensory analysis</b>				
虾仁 shrimp	臭氧水: 0.1、0.3、0.5、1、1.5 mg/kg, 5、10、15 min	8名专业人员对虾仁的色泽、气味对处理后的虾仁进行感官评定	臭氧水浓度对虾仁感官品质的影响较小, 而随着处理时间的增加, 虾仁的感官评分呈下降趋势	[84]
军曹鱼 <i>R. canadum</i>	流动臭氧水: 4、5、6、7 mg/L, 4、6、8、10、12 min; 设流动蒸馏水处理为对照组	5名人员从的色泽、气味、肌肉纹理以及弹性进行感官评分, 设对照组为满分	浓度相同时, 感官评分随时间的增加显著下降; 除 8 min 外, 时间相同时浓度对感官评分无显著性影响	[85]
罗非鱼 <i>Oreochromis spp.</i>	臭氧水: 5 mg/L, 10 min; $\text{H}_2\text{O}_2$ : 1 g/L, 5 min; $\text{NaClO}$ : 100 mg/L, 2 min; $\text{ClO}_2$ : 150 mg/L, 10 min; 壳聚糖: 2 g/L, 5 min	由 8 名经过专门培训的评定人员从罗非鱼的色泽及气味进行感官评定	不同方法处理后的鱼片色泽及气味均与对照组有差异, 但臭氧水处理组的差异最小, 且无减菌液气味的残留	[74]
<b>色差分析 color analysis</b>				
虾仁 shrimp	臭氧水: 1 mg/kg, 5 min; $\text{H}_2\text{O}_2$ : 0.2 g/kg, 1 min; $\text{NaClO}$ : 100 mg/kg, 2 min; $\text{ClO}_2$ : 100 mg/kg, 5 min	使用色差计测定色差	不同处理后虾体颜色呈变淡趋势, 相比其它处理方式, 臭氧水处理对虾仁色泽影响最小	[84]
罗非鱼 <i>Oreochromis spp.</i>	臭氧水: 5、10 mg/L, 物料比 $M:V=1:4$ , 10 min	使用 CIE $L^*a^*b^*$ 系统对罗非鱼片暗色肉和普通肉的颜色进行测定	鱼片暗色肉的 $L^*$ 值显著提高, $a^*$ 值和 $b^*$ 值降低, 两种浓度间无显著性差异; 处理对鱼片普通肉的颜色影响较小	[86]
罗非鱼 <i>Oreochromis spp.</i>	臭氧水: 5 mg/L, 10 min; $\text{H}_2\text{O}_2$ : 1 g/L, 5 min; $\text{NaClO}$ : 100 mg/L, 2 min; $\text{ClO}_2$ : 150 mg/L, 10 min; 壳聚糖: 2 g/L, 5 min	使用色差计测定色差	不同方法处理后鱼肉 $L^*$ 值均上升, 但臭氧处理的差异最小; 且臭氧处理 $a^*$ 值、 $b^*$ 值、色度值和饱和度与对照组无显著性差异	[74]

日本, 强酸性电解水 [pH (2.5±0.2); ACC 20~60 mg/L] 和微酸性电解水 (pH 5.0~6.5; ACC 10~30 mg/L) 已被批准用于食品加工中<sup>[90]</sup>。

**酸性电解水在生食水产品中的应用** 酸性电解水可用于水产品的暂养杀菌和保鲜, 能抑菌细菌生长, 延长货架期, 由酸性电解水制成的酸性电解水冰 (AEW ice) 是近年来发展起来的一种新应用。酸性电解水可运用于暂养杀菌中, Al-Qadiri 等<sup>[91]</sup> 研究显示, 酸性电解水 (pH 值 3.1; ORP 1150 mV; ACC 10 mg/L) 可使活菲律宾蛤仔 (*Venerupis philippinarum*) 和紫贻贝 (*Mytilus edulis*) 中的大肠杆菌 O104:H4、单增李斯特氏菌、嗜水气单胞菌 (*Aeromonas hydrophila*)、副溶血性弧菌和空肠弯曲杆菌 (*Campylobacter jejuni*) 分别减少 1.4~1.7、1.0~1.6、1.3~1.6、1.0~1.5 和 1.5~2.2 lg CFU/g。李国威<sup>[92]</sup> 用微酸性电解水 (SAEW) 处理鲜活的虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*), 结果显示 1、2、4 min 处理组存活率为 80%, 处理时间为 240 s 时扇贝的副溶血性弧菌数从 >1100 MPN/g 减少至 28 MPN/g。酸性电解水能有效延缓水产品贮藏过程中的品质变化, 或制成酸性电解水冰运用于水产品保鲜中。Wang 等<sup>[93]</sup> 的研究表明, 酸性电解水能明显抑制虾肉肌纤维的收缩以及组织蛋白酶 B 和多酚氧化酶的活性 ( $P<0.05$ ), 抑制虾体细菌的生长, 且对肌浆蛋白无不良影响。Lin 等<sup>[94]</sup> 研究显示酸性电解水冰可显著延缓凡纳滨对虾虾肉的颜色变化和挥发性碱性氮的增加 ( $P<0.05$ ), 抑制细菌生长。张越扬等<sup>[95]</sup> 的研究表明, 酸性电解水镀冰衣可显著降低金枪鱼的细菌总数、延缓挥发性碱性氮的增加, 保持鱼肉的色泽和质构不变, 保鲜效果显著。

**酸性电解水对水产品品质的影响** 关于酸性电解水处理对水产品理化性质和感官特性的研究, 多数是研究处理后在贮藏期间的品质变化, 关于酸性电解水处理对水产品品质影响的研究较少 (表 6)。谢军等<sup>[96]</sup> 研究表明, AEW 处理后的虾的色泽、气味、肌肉组织和总体可接受性与对照组相比无显著性差异 ( $P>0.05$ )。叶章颖等<sup>[97]</sup> 的研究表明, SAEW 处理组虾仁的色差及硬度随处理时间的增加无显著性变化 ( $P>0.05$ )。由此可知, 酸性电解水处理能有效延长水产品的货架期, 并保持水产品原有的品质。

## 2.7 生物保鲜剂

生物保鲜剂是从动植物、微生物中提取或利用生物工程技术而获得的, 与化学保鲜剂相比具有安全无毒、容易降解等优点, 在水产品保鲜应用中具有广阔的前景。其在水产品中的应用机理主要有 4 点: 杀菌抑菌、抗氧化作用、抑制酶的活性、形成生物保护膜。生物保鲜剂按照来源可分为植物源、动物源及微生物源的保鲜剂, 茶多酚、溶菌酶、壳聚糖、乳酸链球菌素和  $\epsilon$ -聚赖氨酸等是在水产品保鲜中较常见的生物保鲜剂, 可以将不同的生物保鲜剂复合使用, 增加抑菌效果<sup>[98]</sup>, 或将生物保鲜剂制成保鲜冰, 使其在水产品贮藏过程中持续发挥作用。

**生物保鲜剂在生食水产品中的应用** 茶多酚是茶叶中多酚类物质的总称, 其保鲜机理主要是抑菌作用和抗氧化作用<sup>[99]</sup>。鞠健等<sup>[100]</sup> 用 0.2% 的茶多酚溶液处理日本花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 60 min 并在 4 °C 条件下贮藏, 结果显示, 冷藏期间鲈鱼的 TVB-N 值、K 值和表面疏水性

表 6 酸性电解水处理对水产品的感官、色差和质构的影响

Tab. 6 Effects of acidic electrolyzed water on sensory, color and texture of aquatic products

产品 product	处理 treatments	分析方法 analysis method	影响 effects	参考文献 reference
<b>感官分析 sensory analysis</b>				
虾 shrimp	AEW1: pH=2.70, ORP=1143.1 mV, ACC=45 mg/L, 10 min; AEW2: pH=4.22, ORP=1087.2 mV, ACC=102 mg/L, 10 min	由 5 名训练过的学生, 从气味、色泽、肌肉组织以及总体可接受性上对虾进行感官评定	AEW 处理后的色泽、气味、肌肉组织和总体可接受性与对照组相比无显著性差异 ( $P>0.05$ )	[96]
<b>色差分析 color analysis</b>				
凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	SAEW 处理: pH=6.06, ORP=812 mV, ACC=19.82 mg/L, 2、5、10 min	使用色差仪测定色泽; T49 柱形探头, 负载 24 g, 测试和返回速度 1 mm/s, 循环 2 次	与对照组相比, SAEW 处理组虾仁的 L* 值、a* 值、b* 值以及硬度随处理时间的增加无显著性变化 ( $P>0.05$ )	[97]

的增加受到显著抑制 ( $P < 0.05$ ),  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性、肌原纤维蛋白的溶出量、总巯基和活性巯基含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ), 表明茶多酚能够较好地保持花鲈冷藏期间的新鲜度, 抑制其肌原纤维蛋白的氧化。壳聚糖是由几丁质经脱乙酰化处理后制得的天然高分子聚合物, 具有抑菌性良好、安全可降解、成膜性强等优点<sup>[101]</sup>。Li 等<sup>[102]</sup>研究了壳聚糖包衣结合有机酸对 4 °C 贮藏即食虾中单增李斯特氏菌的抑制作用, 结果显示, 1% 壳聚糖和 2% 乙酸联合使用在 16 d 时可使单增李斯特氏菌数量减少 5.38 lg CFU/g, 保持虾的感官特性并延长保质期。溶菌酶, 化学名为 N-乙酰胞壁质聚糖水解酶, 能够切断 N-乙酰胞壁酸和乙酰葡萄糖胺之间的  $\beta$ -1,4 糖苷键, 使细菌细胞壁破裂溶解<sup>[98]</sup>。林智铭等<sup>[103]</sup>研究溶菌酶对鲈鱼鱼片的保鲜作用, 研究结果表明溶菌酶能显著降低菌落总数、抑制微生物生长、减缓脂肪氧化并增加延长货架期。乳酸链球菌素 (Nisin), 是乳酸链球菌产生的一种小分子多肽抗菌物质, 主要抑制革兰氏阳性菌, 特别是可形成芽孢的细菌<sup>[98]</sup>。Shirazinejad 等<sup>[104]</sup>实验中用 2.0% 乳酸和 0.04 g/(L·kg) 乳酸链球菌素联合处理的虾在冷藏 7 和 14 d 后比未处理组的细菌总数分别降低 2.91 和 2.63 lg CFU/g。黎柳等<sup>[105]</sup>研究 0.1%、0.5% 和 1% 的茶多酚生物保鲜剂冰对鲳的保鲜过程中品质变化的影响, 结果较自来水冰组延长了 6~11 d。

**生物保鲜剂对水产品品质的影响** 研究表明, 许多生物保鲜剂具有良好的抗菌作用, 能有效延缓水产品腐败变质, 保持水产品的感官品质, 在水产品保鲜方面有广阔的应用前景。关于生物保鲜剂直接对水产品理化性质和感官特性的研究较少, 多数是研究生物保鲜剂对贮藏期间的品质变化的影响, 有研究显示, 壳聚糖及其衍生物在涂抹覆盖于水产品后直接食用会造成涩味等口感上的缺陷<sup>[106]</sup>, 李杉等<sup>[74]</sup>研究显示, 酸溶性壳聚糖浓度越高, 鲜鱼片色泽和气味的评分会稍微降低。需要加强对生物保鲜剂的基础研究和应用研究, 通过改性、复合生物保鲜剂的应用等方法, 增强生物保鲜剂的效果。

### 3 结语

传统的生食水产品加工方法一般非常简单,

容易引发食源性疾病, 将传统的水产品生食加工方法与非热杀菌相结合, 可在保持生食水产品风味的同时保证产品的安全性, 具有广阔的应用前景。超高压杀菌技术、辐照杀菌技术、高密度  $\text{CO}_2$  杀菌技术具有良好的杀菌效果, 但其对水产品品质的影响因水产品种类、工艺条件等的不同而存在差异; 稳定态二氧化氯、臭氧杀菌技术、酸性电解水和生物保鲜剂具有良好的减菌、抑菌效果, 并能较好地保持水产品品质。此外, 非热杀菌技术因为机理不明确、技术成本高、设备要求高等原因, 多数尚处于研究阶段。因此, 在今后的工作中, 应加强非热杀菌的理论研究与设备开发, 研究复合杀菌技术, 从而推动非热杀菌技术在生食水产品加工中的应用。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 高培. 生食水产品食用安全性研究[J]. *食品研究与开发*, 2005, 26(5): 200-203.  
Gao P. Study on the edible safety of raw aquatic products[J]. *Food Research and Development*, 2005, 26(5): 200-203(in Chinese).
- [ 2 ] Kim H W, Hong Y J, Jo J I, *et al.* Raw ready-to-eat seafood safety: microbiological quality of the various seafood species available at fishery, hyper, and online market[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2017, 64(1): 27-34.
- [ 3 ] 赵永强, 张红杰, 李来好, 等. 水产品非热杀菌技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(11): 394-399.  
Zhao Y Q, Zhang H J, Li L H, *et al.* Non-thermal sterilization technologies and its application in processing of aquatic products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(11): 394-399(in Chinese).
- [ 4 ] Butt A A, Aldridge K E, Sanders C V. Infections related to the ingestion of seafood Part I: viral and bacterial infections[J]. *Lancet Infectious Diseases*, 2004, 4(4): 201-212.
- [ 5 ] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 10136-2015 食品安全国家标准 动物性水产制品 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
National Health and Family Planning Commission of PRC. GB 10136-2015 National food safety standard animal aquatic products[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).

- [ 6 ] Scallan E, Hoekstra R M, Angulo F J, *et al.* Foodborne illness acquired in the United States —major pathogens[J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2011, 17(1): 7-15.
- [ 7 ] 俞顺章. 甲型肝炎流行促进了“大卫生”的诞生[J]. 上海预防医学, 2017, 29(1): 1-3.  
Yu S Z. Hepatitis a contributed to the birth of the “public health at large”[J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2017, 29(1): 1-3(in Chinese).
- [ 8 ] 唐明, 赵静. 从福寿螺事件, 看我国食品安全问题[J]. *中外企业文化*, 2007(8): 19-21.  
Tang M, Zhao J. Food safety in China from the snail incident[J]. *Chinese & Foreign Corporate Culture*, 2007(8): 19-21(in Chinese).
- [ 9 ] 朱旻, 张席, 周晓燕. 酒类对醉虾中副溶血性弧菌及金黄色葡萄球菌杀菌效果的评价[J]. *工业微生物*, 2015, 45(5): 13-16.  
Zhu M, Zhang X, Zhou X Y. Evaluation of liquors influencing bactericidal effects on *Vibrio parahaemolyticus* and staphylococcus aureus in marinated shrimp[J]. *Industrial Microorganisms*, 2015, 45(5): 13-16(in Chinese).
- [ 10 ] Cho T J, Kim N H, Kim S A, *et al.* Survival of foodborne pathogens (*Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, and *Vibrio parahaemolyticus*) in raw ready-to-eat crab marinated in soy sauce[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 238: 50-55.
- [ 11 ] Franssen F, Gerard C, Cozma-Petruț A, *et al.* Inactivation of parasite transmission stages: efficacy of treatments on food of animal origin[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 83: 114-128.
- [ 12 ] Kempf B, Bremer E. Uptake and synthesis of compatible solutes as microbial stress responses to high-osmolality environments[J]. *Archives of Microbiology*, 1998, 170(5): 319-330.
- [ 13 ] 杨宪时, 马超, 许钟, 等. 蟹糊贮藏中的品质变化及变质菌分析[J]. *海洋渔业*, 2008, 30(4): 376-381.  
Yang X S, Ma C, Xu Z, *et al.* Research on quality characteristics change and analysis on spoilage organisms of crab paste during storage[J]. *Marine Fisheries*, 2008, 30(4): 376-381(in Chinese).
- [ 14 ] 陈俊, 张惠萍, 朱希贵, 等. 金黄色葡萄球菌耐盐生长的形态观察及机理的初步研究[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(4): 517-520, 534.  
Chen J, Zhang H P, Zhu X G, *et al.* Morphological observation and pilot study on growth traits of *Staphylococcus aureus* under high-salt condition[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2010, 25(4): 517-520, 534(in Chinese).
- [ 15 ] 孙之南, 王娟, 鲁梅芳, 等. 氯化钠对几种常见菌的抑制作用[J]. *盐业与化工*, 2007, 36(1): 12-15.  
Sun Z N, Wang J, Lu M F, *et al.* The inhibitory function of NaCl to a few common bacteria[J]. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 2007, 36(1): 12-15(in Chinese).
- [ 16 ] 秦品章, 徐景野, 陈晓红. 瓶装蟹糊、腌泥螺加工经营卫生学研究[J]. *中国食品卫生杂志*, 1999, 11(1): 39-41.  
Qin P Z, Xu J Y, Chen X H. Hygienic study on the processing and management of bottled crab paste and pickled mud snail[J]. *Journal of Chinese Food Hygiene*, 1999, 11(1): 39-41(in Chinese).
- [ 17 ] 秦品章, 符展明. 宁波市170份腌制生食动物性水产品卫生检测结果分析[J]. *中国预防医学杂志*, 2009, 10(10): 936-938.  
Qin P Z, Fu Z M. An analysis on hygienic detection results of 170 salt and liquor-saturated aquatic products of animal origin in Ningbo City[J]. *China Preventive Medicine*, 2009, 10(10): 936-938(in Chinese).
- [ 18 ] 崔燕, 林旭东, 康孟利, 等. 超高压技术在水产品贮藏与加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2016, 37(21): 291-299.  
Cui Y, Lin X D, Kang M L, *et al.* Advances in application of ultra high pressure for preservation and processing of aquatic products[J]. *Food Science*, 2016, 37(21): 291-299(in Chinese).
- [ 19 ] 张晓, 王永涛, 李仁杰, 等. 我国食品超高压技术的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(5): 157-165.  
Zhang X, Wang Y T, Li R J, *et al.* Advances of high hydrostatic pressure for food processing in China[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(5): 157-165(in Chinese).
- [ 20 ] 孙秀琴, 王家玮, 刘爱芹, 等. 超高压对生鲜肉类寄生虫杀灭效应的研究[J]. *中国寄生虫病防治杂志*, 2000, 13(1): 75, 60.  
Sun X Q, Wang J W, Liu A Q, *et al.* Study on effect of killing parasites in fresh meat with superhigh

- pressure[J]. Chinese Journal of Parasitic Disease Control, 2000, 13(1): 75, 60(in Chinese).
- [ 21 ] 陈少华, 胡志和. 超高压技术生产即食南美白对虾虾仁条件的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(9): 65-71.  
Chen S H, Hu Z H. Study on processing condition of ready-to-eat shrimp using ultra-high hydrostatic pressure treatment *Penaeus vannamei*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(9): 65-71(in Chinese).
- [ 22 ] Ye M, Huang Y X, Gurtler J B, *et al.* Effects of pre- or post-processing storage conditions on high-hydrostatic pressure inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* and *V. vulnificus* in oysters[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 163(2-3): 146-152.
- [ 23 ] Brutti A, Rovere P, Cavallero S, *et al.* Inactivation of *Anisakis simplex* larvae in raw fish using high hydrostatic pressure treatments[J]. Food Control, 2010, 21(3): 331-333.
- [ 24 ] Angsupanich K, Ledward D A. High pressure treatment effects on cod (*Gadus morhua*) muscle[J]. Food Chemistry, 1998, 63(1): 39-50.
- [ 25 ] 王帮国, 余振宇, 林琳, 等. 超声波、超高压对白鲢鱼肌肉脂肪氧合酶构象及酶活力的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 169-175.  
Wang B G, Yu Z Y, Lin L, *et al.* Effect of ultrasonic wave and ultra high pressure treatment on conformation and enzyme activity of lipoygenase in silver carp muscle[J]. Food Science, 2018, 39(3): 169-175(in Chinese).
- [ 26 ] Cao R, Zhao L, Sun H H, *et al.* Characterization of microbial community in high-pressure treated oysters by high-throughput sequencing technology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45: 241-248.
- [ 27 ] Ramirez-Suarez J C, Morrissey M T. Effect of high pressure processing (HPP) on shelf life of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) minced muscle[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2006, 7(1-2): 19-27.
- [ 28 ] 董士楷, 张志祥, 尚海涛, 等. 腌制类食品的超高压处理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(10): 14-16, 20.  
Dong S K, Zhang Z X, Shang H T, *et al.* Review of the research on the ultra-high pressure treatment of pickled food[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(10): 14-16, 20(in Chinese).
- [ 29 ] Ye M, Lingham T, Huang Y X, *et al.* Effects of high-hydrostatic pressure on inactivation of human norovirus and physical and sensory characteristics of oysters[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(6): 1330-1335.
- [ 30 ] Narwankar S P, Flimlin G E, Schaffner D W, *et al.* Microbial safety and consumer acceptability of high-pressure processed hard clams (*Mercenaria mercenaria*)[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(6): 375-380.
- [ 31 ] 周果, 杨文鸽, 崔燕, 等. 超高压处理对三疣梭子蟹感官及其肌原纤维蛋白生化特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 269-274.  
Zhou G, Yang W G, Cui Y, *et al.* Effect of Ultra-high pressure on sensory and biochemical properties of myofibrillar protein from *Portunus trituberculatus*[J]. Food Science, 2017, 38(23): 269-274(in Chinese).
- [ 32 ] Hsu K C, Hwang J S, Chi H Y, *et al.* Effect of different high pressure treatments on shucking, biochemical, physical and sensory characteristics of oysters to elaborate a traditional Taiwanese oyster omelette[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(3): 530-535.
- [ 33 ] Yagiz Y, Kristinsson H G, Balaban M O, *et al.* Effect of high pressure treatment on the quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and mahi mahi (*Coryphaena hippurus*)[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(9): C509-C515.
- [ 34 ] Teixeira B, Fidalgo L, Mendes R, *et al.* Effect of high pressure processing in the quality of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets: pressurization rate, pressure level and holding time[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 22: 31-39.
- [ 35 ] 马海建, 施文正, 宋洁, 等. 超高压处理对草鱼鱼肉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(12): 283-290.  
Ma H J, Shi W Z, Song J, *et al.* Effects of ultra-high pressure treatment on the quality of grass carp[J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 31(12): 283-290(in Chinese).
- [ 36 ] 王芝妍, 杨文鸽, 周果, 等. 超高压辅助中华管鞭虾脱壳及其肌肉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 43-48.  
Wang Z Y, Yang W G, Zhou G, *et al.* Shelling of

- Solenocera melantho* using ultra high pressure and its effect on the quality of muscle[J]. *Food Science*, 2017, 38(7): 43-48(in Chinese).
- [ 37 ] 郑瑞生, 王则金. 食品冷杀菌技术的研究综述[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 80-87.  
Zheng R S, Wang Z J. Research on cold sterilization technology in foods—a review[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 32(3): 80-87(in Chinese).
- [ 38 ] 张振山, 刘双燕, 刘玉兰, 等. 辐照在食品工业中的应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2013, 38(11): 113-116.  
Zhang Z S, Liu S Y, Liu Y L, *et al.* Research progress of irradiation applied in food industry[J]. *China Condi-ment*, 2013, 38(11): 113-116(in Chinese).
- [ 39 ] 杨文鸽, 茅宇虹, 徐大伦, 等. 适宜电子束辐照延长醉泥螺货架期及蛋白质保持[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 255-262.  
Yang W G, Mao Y H, Xu D L, *et al.* Extending shelf life and keeping protein nutritional value of drunk *Bullacta exarata* by suitable electron beam irradiation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 255-262(in Chinese).
- [ 40 ] 刘青梅, 杨性民, 巨文华, 等. 蟹糊微生物控制方法的探讨[J]. *中国食品学报*, 2009, 9(2): 138-143.  
Liu Q M, Yang X M, Ju W H, *et al.* Research on microorganism control methods in crab paste processing[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2009, 9(2): 138-143(in Chinese).
- [ 41 ] 中华人民共和国农行部. NY/T 1256-2006 冷冻水产品辐照杀菌工艺[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.  
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1256-2006 Irradiation practice for the control of microflora in freeze aquatic products[J]. Beijing: China Agriculture Press, 2007 (in Chinese).
- [ 42 ] Mahmoud B S M, Nannapaneni R, Chang S, *et al.* Improving the safety and quality of raw tuna fillets by X-ray irradiation[J]. *Food Control*, 2016, 60: 569-574.
- [ 43 ] Mahmoud B S M, Burrage D D. Inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* in pure culture, whole live and half shell oysters (*Crassostrea virginica*) by X-ray[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2009, 48(5): 572-578.
- [ 44 ] 杨文鸽, 徐大伦, 楼乔明, 等. 电子束辐照对鲜牡蛎杀菌保鲜效果的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(7): 80-85.  
Yang W G, Xu D L, Lou Q M, *et al.* Effect of electron beam irradiation on sterilization and preservation of fresh *Ostrea plicatula*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(7): 80-85(in Chinese).
- [ 45 ] 陈秀兰, 沈庆康, 包建忠, 等. 醉蟹辐照灭菌保质加工工艺研究[J]. *核农学报*, 2001, 15(4): 234-237.  
Chen X L, Shen Q K, Bao J Z, *et al.* Sterilizing effect of irradiation processing on drunk crab[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2001, 15(4): 234-237(in Chinese).
- [ 46 ] 鉏晓艳, 王玮琼, 陈玉霞, 等. <sup>60</sup>Co-γ辐照剂量对鲈鱼感官和质构的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(5): 202-206, 167.  
Zu X Y, Wang W Q, Chen Y X, *et al.* Effects of <sup>60</sup>Co-γ irradiation dose on the sensory quality and texture of *Micropterus salmoides*[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2017, 33(5): 202-206, 167(in Chinese).
- [ 47 ] Jakabi M, Gelli D S, Torre J C M D, *et al.* Inactivation by ionizing radiation of *Salmonella enteritidis*, *Salmonella infantis*, and *Vibrio parahaemolyticus* in oysters (*Crassostrea brasiliana*)[J]. *Journal of Food Protection*, 2003, 66(6): 1025-1029.
- [ 48 ] Suklim K, Flick Jr G J, Vichitphan K. Effects of gamma irradiation on the physical and sensory quality and inactivation of *Listeria monocytogenes* in blue swimming crab meat (*Portunas pelagicus*)[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, 103: 22-26.
- [ 49 ] Abreu V K G, Zapata J F F, Figueiredo E A T, *et al.* Gamma irradiation on frozen and packaged headed shrimp[J]. *Journal of Food Quality*, 2009, 32(4): 425-435.
- [ 50 ] Nei D, Kawasaki S, Inatsu Y, *et al.* Effectiveness of gamma irradiation in the inactivation of histamine-producing bacteria[J]. *Food Control*, 2012, 28(1): 143-146.
- [ 51 ] 傅丽丽, 林敏, 高原, 等. 电子束辐照对三文鱼品质的影响研究[J]. *核农学报*, 2017, 31(8): 1521-1527.  
Fu L L, Lin M, Gao Y, *et al.* Effect of electron beam irradiation on quality of salmon[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8): 1521-1527(in Chinese).
- [ 52 ] Kim Y H, Nam K C, Ahn D U. Volatile profiles, lipid oxidation and sensory characteristics of irradiated meat from different animal species[J]. *Meat Science*, 2002, 61(2): 171-178.

- 61(3): 257-265.
- [ 53 ] Rawson A, Patras A, Tiwari B K, *et al.* Effect of thermal and non thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: review of recent advances[J]. *Food Research International*, 2011, 44(7): 1875-1887.
- [ 54 ] 杨扬, 李欣, 饶伟丽, 等. 高密度二氧化碳杀菌技术及其在肉品工业中的应用[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(13): 387-391.
- Yang Y, Li X, Rao W L, *et al.* Mechanisms of dense phase carbon dioxide sterilization and its applications in meat industry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(13): 387-391(in Chinese).
- [ 55 ] 刘书成, 郭明慧, 刘媛, 等. 高密度CO<sub>2</sub>杀菌和钝酶及其在食品加工中应用的研究进展[J]. *广东海洋大学学报*, 2016, 36(4): 101-116.
- Liu S C, Guo M H, Liu Y, *et al.* Review on inactivation of microorganisms and enzyme by dense phase carbon dioxide and the application[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2016, 36(4): 101-116(in Chinese).
- [ 56 ] 吕妙兄. 高密度 CO<sub>2</sub> 对皱纹盘鲍的杀菌效果及其肌肉品质的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
- Lü M X. Effects of Dense phase carbon dioxide on bacterial inactivation and quality of *Haliotis discus hannii*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013 (in Chinese).
- [ 57 ] Meujo D A F, Kevin D A, Peng J N, *et al.* Reducing oyster-associated bacteria levels using supercritical fluid CO<sub>2</sub> as an agent of warm pasteurization[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 138(1-2): 63-70.
- [ 58 ] Wei C I, Balaban M O, Fernando S Y, *et al.* Bacterial effect of high pressure CO<sub>2</sub> treatment on foods spiked with *Listeria* or *Salmonella*[J]. *Journal of Food Protection*, 1991, 54(3): 189-193.
- [ 59 ] 张良. 高密度 CO<sub>2</sub> 对凡纳滨对虾的杀菌钝酶效果及其品质的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.
- Zhang L. Effects of dense phase carbon dioxide on pasteurization, enzyme inactivation and quality of *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012 (in Chinese).
- [ 60 ] Ji H W, Zhang L, Liu S C, *et al.* Optimization of microbial inactivation of shrimp by dense phase carbon dioxide[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 156(1): 44-49.
- [ 61 ] 刘书成, 张良, 吉宏武, 等. 高密度CO<sub>2</sub>与热处理对凡纳滨对虾肉品质的影响[J]. *水产学报*, 2013, 37(10): 1542-1550.
- Liu S C, Zhang L, Ji H W, *et al.* Effects of dense phase carbon dioxide and heat treatment on shrimp (*Litopenaeus vannamei*) meat qualities[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(10): 1542-1550(in Chinese).
- [ 62 ] 屈小娟. 高密度 CO<sub>2</sub> 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 X J. Effects of dense phase carbon dioxide on muscle quantities and protein characteristics of *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013 (in Chinese).
- [ 63 ] 吕妙兄, 刘书成, 屈小娟, 等. 高密度CO<sub>2</sub>处理对皱纹盘鲍肌肉品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(S1): 301-308.
- Lü M X, Liu S C, Qu X J, *et al.* Effects of dense phase carbon dioxide on muscle quality of *Haliotis discus hannai*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(S1): 301-308(in Chinese).
- [ 64 ] 蔡慧农, 汤凤霞. 稳定性二氧化氯及其在食品工业中的应用[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(4): 92-94.
- Cai H N, Tang F X. Stable chlorine dioxide and its application in food industry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2003, 24(4): 92-94(in Chinese).
- [ 65 ] Sadiq R, Rodriguez M J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 321(1-3): 21-46.
- [ 66 ] Winniczuk P P, Parish M E. Minimum inhibitory concentrations of antimicrobials against micro-organisms related to citrus juice[J]. *Food Microbiology*, 1997, 14(4): 373-381.
- [ 67 ] 韦明肯, 赖洁玲, 詹萍. 二氧化氯杀菌机理研究进展 [J]. *微生物学报*, 2012, 52(4): 429-434.
- Wei M K, Lai J L, Zhan P. Action modes of chlorine dioxide-a review[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 52(4): 429-434(in Chinese).
- [ 68 ] 晋日亚, 刘欣欣, 乔怡娜, 等. 二氧化氯消毒研究进展 [J]. *中国消毒学杂志*, 2018, 35(2): 138-142.
- Jin R Y, Liu X X, Qiao Y N, *et al.* Research progress of

- chlorine dioxide disinfection[J]. *Journal of Chinese Disinfection*, 2018, 35(2): 138-142(in Chinese).
- [ 69 ] 陶晶. 牡蛎即食调理食品的研制 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- Tao J. The study of ready-to-eat oyster product[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008 (in Chinese).
- [ 70 ] 张碧娜. 醉虾加工与贮藏过程中的品质变化及其控制研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- Zhang B N. Study on phy-chemical changes and quality control technology during process and storage of drunken shrimp[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [ 71 ] 季晓彤, 年益莹, 薛鹏, 等. 二氧化氯对鲳鱼微冻贮藏品质的影响[J]. *肉类研究*, 2018, 32(2): 46-51.
- Ji X T, Nian Y Y, Xue P, *et al.* Effect of chlorine dioxide on pomfret quality during superchilled storage[J]. *Meat Research*, 2018, 32(2): 46-51(in Chinese).
- [ 72 ] 罗自生, 黄皓, 王雪, 等. 固载二氧化氯对南美白对虾的保鲜效果[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(5): 148-154.
- Luo Z S, Huang H, Wang X, *et al.* Effect of solid chlorine dioxide on quality preservation of *Penaeus vannamei*[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2017, 33(5): 148-154(in Chinese).
- [ 73 ] Kim J M, Huang T S, Marshall M R, *et al.* Chlorine dioxide treatment of seafoods to reduce bacterial loads[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(6): 1089-1093.
- [ 74 ] 李杉, 马海霞, 李来好, 等. 减菌化预处理对鲜罗非鱼片质量的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(18): 379-384.
- Li S, Ma H X, Li L H, *et al.* Effects of sterilization pretreatments on quality of fresh tilapia fillets[J]. *Food Science*, 2009, 30(18): 379-384(in Chinese).
- [ 75 ] 吴敏, 刘书来, 丁玉庭. 二氧化氯杀菌对鲱鱼籽品质的影响[J]. *浙江农业科学*, 2011(4): 955-957.
- Wu M, Liu S L, Ding Y T. Effect of chlorine dioxide sterilization on the quality of herring seed[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Science*, 2011(4): 955-957(in Chinese).
- [ 76 ] Guzel-Seydim Z B, Greene A K, Seydim A C. Use of ozone in the food industry[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2004, 37(4): 453-460.
- [ 77 ] 赵永强, 李来好, 杨贤庆, 等. 臭氧在水产品加工中应用综述[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(5): 149-154.
- Zhao Y Q, Li L H, Yang X Q, *et al.* Applications of ozone in aquatic products processing: a review[J]. *South China Fisheries Science*, 2013, 9(5): 149-154(in Chinese).
- [ 78 ] Chen H B, Wang M Y, Chen S J, *et al.* Effects of ozonated water treatment on the microbial population, quality, and shelf life of shucked oysters (*Crassostrea plicatula*)[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2014, 23(2): 175-185.
- [ 79 ] Crowe K M, Skonberg D, Bushway A, *et al.* Application of ozone sprays as a strategy to improve the microbial safety and quality of salmon fillets[J]. *Food Control*, 2012, 25(2): 464-468.
- [ 80 ] 王倩, 孙晓红, 蓝蔚青, 等. 保鲜冰在水产品保藏中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(3): 226-230.
- Wang Q, Sun X H, Lan W Q, *et al.* Progress on application research of fresh ice for aquatic products preservation[J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(3): 226-230(in Chinese).
- [ 81 ] 黎柳, 谢晶, 苏辉, 等. 臭氧冰与电解水冰处理延长鲳鱼的冷藏货架期[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(23): 323-328.
- Li L, Xie J, Su H, *et al.* Ozone ice and electrolyzed water ice treats pomfret to extend the shelf life of pomfret[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(23): 323-328.
- [ 82 ] 刁石强, 吴燕燕, 王剑河, 等. 臭氧冰在罗非鱼片保鲜中的应用研究[J]. *食品科学*, 2007, 28(8): 501-504.
- Diao S Q, Wu Y Y, Wang J H, *et al.* Research on application of ozone ice in tilapia fillet preservation[J]. *Food Science*, 2007, 28(8): 501-504(in Chinese).
- [ 83 ] 杜文静. 臭氧冰的制备及其在鱿鱼保鲜中的应用 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- Du W J. Preparation of ozonated-ice and its application in the fresh-keeping for squid[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013 (in Chinese).
- [ 84 ] 魏涯, 李来好, 郝淑贤, 等. 减菌化预处理对鲜虾仁质量的影响 [C]//“食品加工与安全”学术研讨会暨 2010 年广东省食品学会年会论文集. 湛江: 广东省食品学会, 2010: 5.
- Wei Y, Li L H, Hao S X, *et al.* The influence of reducing bacteria pretreatment on the quality of fresh shrimp[C]// "food processing and safety" academic seminar and 2010 annual meeting of Guangdong food society. Zhanjiang: Guangdong food society, 2010: 5



- (in Chinese).
- [ 85 ] 孙继英, 吴燕燕, 杨贤庆, 等. 臭氧水对军曹鱼片的减菌效果和品质的影响[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(6): 66-71.  
Sun J Y, Wu Y Y, Yang X Q, *et al.* Sterilization and quality effects of ozone water on cobia fillets[J]. *South China Fisheries Science*, 2013, 9(6): 66-71(in Chinese).
- [ 86 ] 郝淑贤, 何俊燕, 李来好, 等. 臭氧水对罗非鱼片色泽影响分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(13): 50-53.  
Hao S X, He J Y, Li L H, *et al.* Effect of ozone water on color of tilapia fillets[J]. *Food Science*, 2013, 34(13): 50-53(in Chinese).
- [ 87 ] Cao W, Zhu Z W, Shi Z X, *et al.* Efficiency of slightly acidic electrolyzed water for inactivation of *Salmonella enteritidis* and its contaminated shell eggs[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2009, 130(2): 88-93.
- [ 88 ] Ye Z Y, Wang S, Chen T, *et al.* Inactivation mechanism of *Escherichia coli* induced by slightly acidic electrolyzed water[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 6279.
- [ 89 ] Honda Y. Improvement of the electrolysis equipment and application of slightly acidic electrolyzed water for dairy farming[J]. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 2003, 65(1): 27-29.
- [ 90 ] Issa-Zacharia A, Kamitani Y, Tiisekwa A, *et al.* *In vitro* inactivation of *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Salmonella* spp. using slightly acidic electrolyzed water[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, 110(3): 308-313.
- [ 91 ] Al-Qadiri H M, Al-Holy M A, Shiroodi S G, *et al.* Effect of acidic electrolyzed water-induced bacterial inhibition and injury in live clam (*Venerupis philippinarum*) and mussel (*Mytilus edulis*)[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 231: 48-53.
- [ 92 ] 李国威. 微酸性电解水在虾夷扇贝净化中的杀菌工艺研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2016.  
Li G W. Sterilization process of slightly acidic electrolyzed water in the purification of Japanese scallop[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [ 93 ] Wang M, Wang J J, Sun X H, *et al.* Preliminary mechanism of acidic electrolyzed water ice on improving the quality and safety of shrimp[J]. *Food Chemistry*, 2015, 176: 333-341.
- [ 94 ] Lin T, Wang J J, Li J B, *et al.* Use of acidic electrolyzed water ice for preserving the quality of shrimp[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(36): 8695-8702.
- [ 95 ] 张越扬, 高萌, 柳佳娜, 等. 酸性电解水冰衣对于冷冻金枪鱼品质的影响研究[J]. *食品工业*, 2013, 34(12): 34-37.  
Zhang Y Y, Gao M, Liu J N, *et al.* Effect of acidic electrolyzed water coating ice on quality of frozen tuna[J]. *The Food Industry*, 2013, 34(12): 34-37(in Chinese).
- [ 96 ] 谢军, 孙晓红, 潘迎捷, 等. 电解水和有机酸对虾的杀菌效果及感官品质影响[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(5): 57-63.  
Xie J, Sun X H, Pan Y J, *et al.* The effect of electrolyzed water and organic acid on the quality of raw shrimp[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2010, 36(5): 57-63(in Chinese).
- [ 97 ] 叶章颖, 祁凡雨, 裴洛伟, 等. 微酸性电解水对虾仁的杀菌效果及其动力学[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 223-230.  
Ye Z Y, Qi F Y, Pei L W, *et al.* Disinfection effect and kinetics of slightly acidic electrolyzed water for white shrimp[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(3): 223-230(in Chinese).
- [ 98 ] 单珂, 郭全友, 姜朝军, 等. 生物保鲜剂在水产品保鲜中的应用[J]. *食品与发酵科技*, 2018, 54(3): 4-8.  
Shan K, Guo Q Y, Jiang C J, *et al.* The application of biopreservatives in preservation of aquatic products[J]. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 2018, 54(3): 4-8(in Chinese).
- [ 99 ] 潘俊娴, 刘均, 吕杨俊, 等. 茶多酚对水产品保鲜作用的研究进展[J]. *中国茶叶加工*, 2018(3): 10-14.  
Pan J X, Liu J, Lü Y J, *et al.* Preservation effect of tea polyphenols on aquatic product[J]. *China Tea Processing*, 2018(3): 10-14(in Chinese).
- [100] 鞠健, 乔宇, 李冬生, 等. 茶多酚对冷藏鲈鱼鲜度变化及肌原纤维蛋白氧化的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 290-294.  
Ju J, Qiao Y, Li D S, *et al.* Effect of tea polyphenols on the freshness and the oxidation of myofibrillar protein of weever during cold storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(2): 290-294(in Chinese).
- [101] 刘嘉莉, 蓝蔚青, 刘大勇, 等. 壳聚糖在水产品保鲜中

- 应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 231-236.
- Liu J L, Lan W Q, Liu D Y, *et al.* Research progress of chitosan in aquatic products preservation[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(3): 231-236(in Chinese).
- [102] Li M, Wang W, Fang W H, *et al.* Inhibitory effects of chitosan coating combined with organic acids on *Listeria monocytogenes* in refrigerated ready-to-eat shrimps[J]. *Journal of Food Protection*, 2013, 76(8): 1377-1383.
- [103] 林智铭, 王媛媛, 赵珺泽, 等. 蓝莓叶多酚和溶菌酶对鲈鱼鱼片的保鲜作用[J]. 农产品加工, 2018(11): 36-39, 44.
- Lin Z M, Wang Y Y, Zhao J Z, *et al.* Effect of blueberry leaf polyphenols and lysozyme on storage quality of perch fillets[J]. *Farm Products Processing*, 2018(11): 36-39, 44(in Chinese).
- [104] Shirazinejad A R, Noryati I, Rosma A, *et al.* Inhibitory effect of lactic acid and nisin on bacterial spoilage of chilled shrimp[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, 65: 163-167.
- [105] 黎柳, 谢晶, 苏辉, 等. 含茶多酚、植酸生物保鲜剂冰对鲳鱼保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 338-343.
- Li L, Xie J, Su H, *et al.* Fresh keeping effect of the icing with tea polyphenols and phytic acid on pomfret[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(1): 338-343(in Chinese).
- [106] 胡晓亮, 沈建. 壳聚糖及其衍生物在水产品贮藏保鲜中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(8): 226-230.
- Hu X L, Shen J. Application of chitosan and its derivatives on the preservation of aquatic products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012, 38(8): 226-230(in Chinese).

## Application of non-thermal sterilization technology in raw ready-to-eat aquatic products

LI Biansheng<sup>1,2</sup>, HUANG Yating<sup>1</sup>, RUAN Zheng<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper reviews the biological hazards of traditional processing method of raw ready-to-eat aquatic products and the effects of seven non-thermal sterilization techniques on microbial inactivation in raw ready-to-eat aquatic products and their quality, to provide useful information for the application of non-thermal sterilization techniques in the processing of raw ready-to-eat aquatic products. Ultra-high pressure treatment, irradiation and DPCD technology have good sterilization effect, but their influence on the quality of aquatic products is different due to the different kinds of aquatic products, process parameters and other conditions. Ultra-high pressure treatment and DPCD technology will reduce the transparency and increase the hardness of fish and shrimp under high treatment intensity, and irradiation will generate peculiar smell of aquatic products under high treatment intensity. stable chlorine dioxide, ozone, acid electrolyzed water and biological preservatives have good antibacterial and bacteriostatic effects and little impact on the quality of aquatic products, so they can be used to extend shelf life and maintain quality.

**Key words:** non-thermal sterilization; raw ready-to-eat aquatic products; safety; sensory quality

**Corresponding author:** RUAN Zheng. E-mail: zhruan@scut.edu.cn

**Funding projects:** National Key R & D Program of China (2017YFD0400400); Fundamental Research Funds for the Central Universities; R & D Plan of Key Areas in Guangdong Province (2019B020212002)