

# 超高压技术在肉类杀菌及品质改善中的应用进展

甄宗圆<sup>1,2</sup>, 李志杰<sup>2</sup>, 梁迪<sup>2</sup>, 李景军<sup>1</sup>, 李先保<sup>1</sup>

(1. 安徽科技学院食品工程学院, 安徽滁州 233100) (2. 枣庄学院食品科学与制药工程学院, 山东枣庄 277160)

**摘要:** 超高压技术是一种新型的食品非热物理加工技术, 在肉类杀菌和品质改善方面具有较高应用价值, 是肉类食品领域的研究热点之一。由于存在一定局限性, 超高压技术尚未在肉类工业中得到广泛应用。本文从超高压处理影响非共价键间的作用力、蛋白质结构、细胞结构以及细胞中水分的分布四个方面介绍其作用机理, 并综述了目前超高压技术在改善肉类的嫩度、保水性、凝胶性、颜色、杀菌、冻藏品质等方面的研究及应用进展。在此基础上进行分析和展望, 认为超高压技术在改善肉及肉制品嫩度、保水性、凝胶性等食用品质方面有望成为主要的研究和应用方向。为达到规模化生产的要求, 未来在技术装备水平提升的基础上, 应通过增强应用效果、提高应用效率、扩展应用范围等方式提升超高压技术在肉类工业中的应用水平和范围。

**关键词:** 超高压; 肉类; 蛋白质; 非共价键; 凝胶性

文章编号: 1673-9078(2021)08-350-356

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.8.1070

## Recent Application of Ultrahigh Pressure Processing for Meat Sterilization and Quality Improvement

ZHEN Zong-yuan<sup>1,2</sup>, LI Zhi-jie<sup>2</sup>, LIANG Di<sup>2</sup>, LI Jing-jun<sup>1</sup>, LI Xian-bao<sup>1</sup>

(1. College of Food Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China)

(2. College of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

**Abstract:** Ultrahigh pressure (UHP) processing, a new non-thermal food processing technique, has high application potential for meat sterilization and quality improvement. Thus, it has attracted significant attention recently. However, because of several limitations it has not been widely used in the meat industry. This review discusses four aspects of the UHP mechanism: the effects of non-covalent forces, protein structures, cell structures, and water distribution in cells. Furthermore, ongoing applications of UHP and research into the improvement of meat tenderness, water retention, gelation and color, meat sterilization, and frozen meat quality by UHP are summarized. It is concluded that future research should focus on ways to improve the tenderness, water retention, and gelation of meat and meat products by UHP. To promote large-scale UHP application in the meat industry, meat-processing facilities would be required to upgrade their equipment and optimize the efficiency, range, and overall functionality of the UHP process for meat sterilization and quality improvement.

**Key words:** ultrahigh pressure; meat; protein; non-covalent bond; gelation

引文格式:

甄宗圆,李志杰,梁迪,等.超高压技术在肉类杀菌及品质改善中的应用进展[J].现代食品科技,2021,37(8):350-356,+374

ZHEN Zong-yuan, LI Zhi-jie, LIANG Di, et al. Recent application of ultrahigh pressure processing for meat sterilization and quality improvement [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 350-356, +374

超高压技术 (ultrahigh pressure, UHP) 是一项非热处理技术, 能改变蛋白质空间结构, 导致蛋白质变性、聚集或凝胶化<sup>[1]</sup>。其作用对象是食品中的非共价键, 对共价键无破坏作用, 故超高压技术能够较好地

收稿日期: 2020-11-22

基金项目: 安徽省重大科技专项 (18030701212); 安徽省家禽产业技术体系基金 (AHCYTX-10); 安徽科技学院引进人才项目 (SPYJ202101); 枣庄市科学技术发展计划项目 (2019NS09)

作者简介: 甄宗圆 (1978-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 肉品科学

通讯作者: 李景军 (1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学

保留食物固有的感官品质 (质地、颜色、外形、生鲜风味、滋味和香气等) 以及营养成分 (维生素、蛋白质、脂质等), 也能够更好地保持产品的质构和口感<sup>[2]</sup>, 在食品加工领域应用范围广阔。

食品超高压技术的操作通常是将食品物料包装完好后, 放入液体介质 (通常是食用油、甘油、油与水的乳液) 中, 在 100~1000 MPa 压力下作用一段时间后, 使之达到灭菌或品质要求<sup>[2]</sup>。相对于常规技术来说, UHP 有很多优点, 如在杀菌的同时, 不会有温度的变化; 适宜的压强下不会破坏食物中的共价键, 小分子

物质受影响的程度也较低,可以较好地保持食品原有的色泽、味道和营养成分<sup>[3]</sup>;能影响蛋白质结构、凝胶网络,改善食品的凝胶特性。近年来,随着超高压加工设备开发技术的日趋成熟,已有美国、西班牙、英国、日本、中国等多国具有生产超高压加工设备的能力,目前全世界量产型超高压设备已超过200套<sup>[4]</sup>。超高压杀菌技术被誉为“食品工业的一场革命”、“当今世界十大尖端科技”,现在已被应用于果汁、果酱、肉制品、乳制品、海产品、谷类及豆类的加工中<sup>[5]</sup>。

当然,这项技术目前还存在一些应用瓶颈,比如设备昂贵、维护费用高、能耗高、无法做到像UHT(瞬时高温灭菌)一样连续生产等<sup>[6]</sup>。因此,食品加工企业必须加强超高压技术应用探索,通过作用机理和加工工艺的研究,提高技术应用水平<sup>[7]</sup>。本文对近年超高压技术在肉类加工中的相关研究进行综述,归纳各种作用原理和超高压技术的应用,以期为新产品和新工艺研发提供思路。

## 1 超高压技术在肉类加工中应用的机理研究进展

蛋白质的性质和功能由四级结构决定,其中一级结构通过肽键和二硫键连接氨基酸构成,通常比较稳定;二、三、四级结构通过共价键(如二硫键)和非共价键(如氢键、疏水键、范德华力、静电引力等)维系,易受外力影响。UHP作用会引起蛋白质分子内氢键、离子键等非共价键的断裂,以及二硫键和巯基的断裂与重排,诱导疏水相互作用<sup>[8]</sup>,改变蛋白质的二、三、四级结构,继而引起蛋白质性质、功能和细胞内水分分布的变化<sup>[9]</sup>。

### 1.1 影响蛋白质构象和功能

超高压处理会破坏蛋白质的空间结构。蛋白质的空间结构包括四级,各级结构能够承受的压力不同。在较低的压力下,蛋白质的三、四级结构被破坏,蛋白质结构变得松散,肌原纤维蛋白的基团被打开,更多的蛋白质与酶结合的位点暴露出来,当压力大于100 MPa时,酶的结合位点会因压力过大而被破坏<sup>[10]</sup>。随着压力的升高,超高压处理可对肌原纤维蛋白的二级结构产生影响,改变了色氨酸的微环境, $\alpha$ -螺旋结构不断减少, $\beta$ -折叠或无规则卷曲相应增加<sup>[11]</sup>。拉曼光谱分析结果表明,随着压力水平的增加, $\alpha$ -螺旋逐渐转变为无规卷曲结构,而压力增大至200 MPa时, $\beta$ -折叠结构含量降低,S-S拉伸(475)和g-g-t或t-g-t(540)强度降低,蛋白质展开显著增加,压力继续增大至400

MPa时,蛋白聚集增加。在对僵直前的兔肉进行超高压处理时,也发现200 MPa以上压力能够影响其斩拌后蛋白体系中蛋白质的二级结构和理化性质,总体上会使 $\alpha$ -螺旋含量降低, $\beta$ -折叠含量增加<sup>[12]</sup>。蛋白质空间构象的改变会影响一些依赖蛋白质的功能和特性,如生物酶活性、质构及营养特性等。

#### 1.1.1 影响生物酶活性

肌肉中主要的内源酶包括组织蛋白酶(B、H、L、D)、钙蛋白酶、m-钙蛋白酶和 $\mu$ -钙蛋白酶等。UHP在不同压强条件下对肌肉中生物酶活性产生不同影响。压强较低时,UHP一方面可促进溶酶体中的组织蛋白酶释放<sup>[13]</sup>,另一方面可增加酶和底物作用位点的暴露,同时还会失活钙蛋白酶抑制蛋白<sup>[14]</sup>,并促进钙的释放<sup>[15]</sup>。因此,生物酶尤其是钙蛋白酶的活性得到提高,比如有研究发现150 MPa以下的高压处理可活化牛肉中的钙蛋白酶和组织蛋白酶<sup>[16]</sup>。较高压强的UHP处理会造成生物酶的失活。组织蛋白酶比钙蛋白酶更耐高压。组织蛋白酶可承受超过500 MPa的压强<sup>[17]</sup>,而钙蛋白酶在室温条件下,用250 MPa处理10 min出现酶活力下降<sup>[18]</sup>。酶活性的下降缘于较高压力对蛋白质产生构象的改变和破坏<sup>[14]</sup>。蛋白质的构象是形成酶活性中心的基础,当压力低于临界值,酶的活性中心结构可逆恢复,活性不受影响;当超过临界值导致构象崩溃,酶活发生不可逆永久性失活<sup>[19]</sup>。

#### 1.1.2 改变肉类的质构特性

适当的压力处理可以降低肉品剪切力,提高肉品嫩度和弹性。其原因可能是在压力存在下,一方面肌纤维内肌球蛋白和肌动蛋白的结合发生解离,Z线崩解,并且肌纤维小片化,最终造成剪切力下降;另一方面超高压处理可以加速溶酶体的解离,增加肉中组织蛋白酶数量,增强钙激活中性蛋白酶的总活动力,加速肌肉蛋白水解,致使肉剪切力下降,达到嫩化效果<sup>[20]</sup>。简言之,超高压处理对肉类质构的影响包括物理(压力)和生化(酶活)两种途径。相关研究发现,高压处理后优质牛肉嫩度的提高与较低的肌原纤维断裂指数和钙蛋白酶活性的降低有关,表明其嫩化的机理不同于冷却肉中的嫩化机理<sup>[21]</sup>。两种影响途径在不同压力条件下分别起主要作用。UHP的应用于猪肉的研究发现,0~300 MPa的高压会降低钙蛋白酶活性,但同时会更大程度降低钙蛋白酶抑制蛋白的活性,结果是阻止了僵直;300 MPa以上则是由机械压力阻止了僵直的发生<sup>[22]</sup>。另外,对一些质构较为松散的肉类,施加压力缩小肌纤维间的距离,可以提高硬度、弹性和咀嚼性。超高压处理应用于虾类食品的加工能使对虾蛋白质变性而产生凝胶化,随着压强的升高和处理

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<sup>[23]</sup>。

### 1.1.3 影响营养特性

超高压处理对营养特性的影响主要表现为蛋白质降解和消化率的变化。有研究表明, 高压处理使熟火腿中更多的硫醇基团暴露, 氧化产生巯基, 形成二硫键, 结果导致蛋白质聚集变性和氧化现象掩盖了消化酶必需的切割位点, 降低了熟火腿的可消化性和蛋白质水解率, 并降低了蛋白质消化率<sup>[24]</sup>。同时, 也存在不同观点。如刘书成<sup>[23]</sup>等认为超高压处理能使对虾蛋白质变性而产生凝胶化, 从而有利于人体的消化和吸收。其研究发现超高压处理使肌原纤维蛋白含量显著下降, 使虾仁蛋白质发生了变性、肌球蛋白和肌动蛋白的热稳定性降低。产生的原因为超高压处理使蛋白质体积缩小, 分子内离子键断裂; 促进水分子电离, 影响分子间稳定性; 使水分子进入蛋白质内部, 影响疏水区域氨基酸相互作用; 降低分子间氢键稳定性和疏水作用。这方面的研究目前尚不深入, 可能与研究对象和使用的高压条件有关, 目前尚缺乏不同类型肉样超高压处理以及不同压力条件下营养特性比较的研究。另外, 除影响蛋白质外, 高压处理后酸性和中性脂肪酶活性和游离脂肪酸含量下降, 而液氧活性和三丁基锡化合物活性增加<sup>[25]</sup>。

## 1.2 影响细胞结构

超高压处理会破坏细胞膜、细胞壁等, 导致细胞结构的改变。其作为一种新型的非热力杀菌方式, 通过 100~1000 MPa 的高压, 使微生物的细胞壁、核膜、线粒体外膜遭到破坏, 并且能使细胞内蛋白质变性, 生物酶失去活性, 导致细菌的新陈代谢功能受阻<sup>[26]</sup>, 加压的细胞膜常常表现出通透性的变化, 从而起到杀菌作用<sup>[7]</sup>。研究显示, 鱼糜中菌落总数随压力增大和保压时间延长而减少。同样货架期条件下, 与热杀菌鱼糜相比, 品质显著提高<sup>[27]</sup>。

## 1.3 影响细胞中水分的分布

超高压处理会影响细胞中水分的分布, 改变肉类持水性。红虾在超高压作用下, 肌肉蛋白的多肽链去折叠而暴露出内部的一些疏水性氨基酸残基, 导致表面疏水性升高, 但过高的压力又容易导致去折叠蛋白的进一步聚集, 暴露出的疏水性氨基酸残基又重新被掩埋而使表面疏水性下降<sup>[19]</sup>。在凝胶型肉制品压力辅助加热研究中, 高压可以破坏肌原纤维并阻止热诱导蛋白质变性, 并产生多孔微观结构, 结合水含量高,

持水性好; 但随着压力的升高超过阈值 (300~400 MPa), 会导致松散的凝胶网络, 并使肌动蛋白变性, 导致结合水减少, 游离水增加, 持水力下降<sup>[28]</sup>。Huijuan Yang<sup>[29]</sup>等采用拉曼光谱和磁共振成像 (MRI) 研究低盐低脂肉糜显示, 200 MPa HPP 显著增强了色氨酸、酪氨酸双峰、-CH<sub>3</sub> 和/或CH的拉伸以及与水和脂肪相关的质子强度。

## 2 超高压技术在肉类加工中的应用

超高压技术目前已部分应用于生产中, 其操作比较简单、耗能较低, 能较好地保持食品的原有品质, 成为食品加工领域的开发热点之一<sup>[30]</sup>。近年来, 消费者对不含加工和化学添加剂的即食健康肉制品的需求不断增长<sup>[31]</sup>, 高压处理可以抑制腐败, 从而延长鲜鱼等产品的保质期<sup>[32]</sup>。产品嫩度得到了改善, 压力处理后的凝胶显示出更有序的蛋白质网络<sup>[33]</sup>, 冻藏肉类应用后品质也得到了提高。

### 2.1 超高压技术在肉类杀菌中的应用

与热处理方法相比, 超高压杀菌实现了食品在常温或较低温度下杀菌, 能较好地保持食品原有的感官品质和营养成分, 其基本原理是利用压力破坏微生物的细胞膜和细胞壁, 室温下就可以使蛋白质变性、酶失活、微生物死亡, 实现延长食品保质期的目的。周蓓蓓<sup>[2]</sup>等的实验证明超高压工艺能够达到小龙虾仁产品的商业无菌标准, 而且在此条件下, 小龙虾仁品质良好。超高压处理能抑制样品的TBA值、TVB-N值及菌落总数的上升。压力越高, 抑制效果越显著<sup>[34]</sup>。Ucak I等发现超高压与4%乙酸的组合对耐冷菌的生长有很强的抑制作用。储存期间在浸泡过的鲑鱼中没有观察到产生硫化氢的细菌<sup>[35]</sup>。同样是水产中, 对于鳕鱼和鲭鱼, 超高压处理在500 MPa抑制细菌菌群, 贮藏26 d未达到腐败水平<sup>[36]</sup>。

### 2.2 超高压技术在改善肉类的嫩度中的应用

嫩度是指肉的柔软程度, 适宜的压力可以提升肉制品的嫩度。在超高压压力条件下处理的样品, 咀嚼性好、硬度适中、口感佳、质地优良; 而未经超高压处理的样品则咀嚼性较差、偏软、口感欠佳<sup>[37]</sup>。超高压处理应用于嫩化鹿肉, 对鹿肉中的蛋白质有显著影响, 优化参数为: 压力300~400 MPa, 加压时间2~6 min<sup>[38]</sup>; 在水产加工中, 高压条件下促使蚌肉肌纤维破裂, 肌肉结构中大分子物质发生解聚, 蚌肉弹性增加较为明显, 蚌肉嫩度得到改善<sup>[39]</sup>。应该注意的是, 高压处理对质构的影响, 并非压强越高越好。如当压

力升至 300 MPa 时, 乳化肠硬度显著下降, 储能模量急剧降低, 内部形成了碎片化的松散结构, 不利于形成良好的品质。因此, 在一定压力范围内 ( $\leq 200$  MPa), 超高压处理可以改善乳化肠的品质<sup>[40]</sup>。

### 2.3 超高压技术在改善肉类的颜色中的应用

超高压处理通常会降低食品色泽的可接受度。经高压处理后肉类会变白, 原因是由于高压导致的球蛋白变性及肌肉失水<sup>[41]</sup>。这种变化一般是不利的, 如水产品加工中, 超高压处理影响罗非鱼片外观接受度的颜色变化可能会阻碍其商业化<sup>[42]</sup>, 而在河蚌肉超高压处理中, 较长的保压时间促使肌红蛋白总量降低, 河蚌肉色泽总体呈现黄白色或白色, 进而影响到综合评分<sup>[39]</sup>。对猪肉的研究也有类似的结果。丛懿洁<sup>[22]</sup>等采用单因素试验研究不同压力处理对猪肉品质的影响, 分别对冷却里脊肉加压 (室温 25 °C), 保压 15 min, 结果表明: 随着超高压处理压强增大, 猪肉质量损失增大, 肉块形状收缩, 色泽从红色变为白色、灰白色。不过也有一些研究表明, 超高压处理对肉类颜色的影响不显著, 甚至在某些条件下可起到改善作用。Kaur B P<sup>[43]</sup>等研究了在环境温度 27±2 °C 颜色参数  $L^*$  (明度) 和  $b^*$  (黄度) 随着压力和保持时间的增加而增加, 但是  $a^*$  (红度) 随着压力和保持时间的增加而减少, 从而赋予虾肉更明亮和温和的烹饪外观。贾莹<sup>[44]</sup>等的实验结果也表明高压处理能引发虾仁感官品质的变化, 与未处理虾仁相比, 随着压力的升高, 超高压处理的虾仁的主色色号及占比逐渐增大, 冻藏 6 个月后虾仁  $L^*$  值、 $a^*$  值和  $b^*$  值均有所变化, 与对照组相比, 超高压前处理对虾仁  $L^*$  值的影响不显著, 但能延缓冻藏后期  $a^*$  值的增加, 对保持虾肉色泽的稳定有一定作用<sup>[45]</sup>。另外, 尽管受到氯化钠浓度和施加压力的影响, 超高压处理的牛肉的颜色参数在所有测试情况下都是视觉上可接受的 ( $a^* > 14$ )<sup>[46]</sup>。针对不同肉类产品, 消费者对色泽的喜好会有所不同。因此, 在评价超高压对肉色的影响时, 应考虑消费者偏好因素。

### 2.4 超高压技术在改善肉类的凝胶性和保水性中的应用

蛋白质凝胶的形成可以定义为蛋白质分子的聚集现象。溶液经超高压处理后可以形成凝胶, 且随着处理压力增大、处理时间延长和蛋白质浓度的提高, 凝胶中二硫键含量明显升高, 凝胶网络结构趋于致密, 质地逐渐细腻, 凝胶强度、得率和保水性呈现增大的趋势<sup>[47]</sup>。超高压处理通过增加 MP-MgCl<sub>2</sub> 混合体系的

储能模量 ( $G'$ ), 缩短自旋-自旋弛豫时间 T22 和 T23, 促进凝胶形成交联、密实的多孔网络结构, 进而改善混合体系凝胶的特性<sup>[48]</sup>。鸡胸肉肌原纤维蛋白凝胶的微观结构研究显示, 在 28 °C 条件下, 未加压处理的凝胶网络杂乱不规则且具有较小的致密性。经过 100 MPa 处理, 随着蛋白质之间的相互聚集, 样品的凝胶网络表现出规则且致密的丝状结构。当高压进一步增加到 200 MPa 时, MP 凝胶网络更加致密和均匀, 呈现典型的“蜂窝”状结构。这种凝胶网络结构有益于增强凝胶强度, 另外可以束缚和保留更多的水分, 从而凝胶保水性增强。大于 300 MPa 的压力会破坏蛋白质结构, 因此在此研究中 200 MPa 为最佳压力<sup>[49]</sup>。与之类似, 对金线鱼肌球蛋白在低盐条件下形成的凝胶进行适度的 UHP 处理 ( $\leq 300$  MPa), 增强了肌球蛋白凝胶的保水性和结构性质; 而较强的 UHP 处理 ( $\geq 450$  MPa) 则减弱了它们<sup>[50]</sup>。戴慧敏<sup>[51]</sup>等在研究超高压对低盐鱼糜品质的研究中, 经过超高压处理的低盐鱼糜凝胶的凝胶强度、持水性均显著大于常压处理组的, 而且形成的凝胶网络结构也更致密均匀; 陈燕婷<sup>[52]</sup>的实验表明适宜的超高压处理条件 (350 MPa, 保压 8 min) 显著影响带鱼鱼糜凝胶特性及其肌原纤维蛋白二级结构, 促进凝胶网络形成, 改善鱼糜凝胶品质。超高压处理对凝胶增强剂存在协同效应。如压力升高至 200 MPa 时, 亚麻籽胶进一步提高了肌原纤维蛋白凝胶 WHC, 增加了其肌原纤维蛋白储能模量 ( $G'$ )、损耗模量 ( $G''$ ) 和结合水的峰面积, 形成的凝胶微观结构交联致密<sup>[53]</sup>。Huijuan Yang<sup>[29]</sup>等也发现低脂低盐肉糜的总可压榨水分含量 (TEF) 在 200 MPa 时达到最小值, 并认为 200 MPa HHP 通过增强蛋白解折叠, 增加氢键并增强蛋白质、水和脂肪之间的相互作用来改善低脂低盐肉糜的稳定性。因此, 可将 200 MPa 作为开发低脂低盐乳化型香肠的最佳压力。

### 2.5 超高压技术在肉类冻藏方面的应用

超高压技术应用于肉类的冷冻, 可保持肉质并提高效率。有研究显示 100 MPa 压力下冷冻效果最佳, 解冻后猪肉的品质与未冷冻的对照没有区别。高于 150 MPa 条件导致失水及褪色显著, 而 50 MPa 处理与常压冻结无差异。因此, 100 MPa 高压冷冻有望成为快速冷冻并保持品质的潜在应用<sup>[54]</sup>。在肉类解冻方面, 高压处理在不同类型肉类上显示效果有所差异, 其机理有待探究。廖彩虎<sup>[55]</sup>等针对三黄鸡的研究表明, 超高压解冻可以加快解冻速度, 但同时会造成汁液流失增加、颜色变化、硬度和咀嚼性升高、酶活和可溶性蛋白含量下降等, 因此, 超高压并不适合三黄

鸡解冻。而另一项针对银鲱鱼的类似研究显示高压解冻处理可显著缩短解冻时间,降低蒸煮损失和解冻损失,并且解冻后质构性质更好,脂质氧化更低。高于150 MPa的会导致肉色显著改变,呈现熟制后的颜色。而100 MPa高压解冻处理的样品保水性最佳,肌原纤维蛋白氧化比传统浸水解冻低30.85%,并且没有不良影响。因此,100 MPa高压解冻可用于高品质冷冻鱼类产品<sup>[56]</sup>。

### 3 超高压技术在肉类加工中的应用前景及展

#### 望

超高压技术目前应用的范围主要是在杀菌方面,尤其是超高压联合杀菌的方法越来越多。在改善肉类的凝胶性和保水性方面,综合多个研究显示200 MPa可作为乳化型肉制品的最佳压力可增强产品凝胶性、保水性和稳定性。这方面的课题有待挖掘,比如各种成分在高压下的微观变化、超高压处理的阈值、适宜的温度和时间参数以及超高压与各种肉制品添加剂的协同作用等。应用方面如压力辅助加热有助于形成具有高保水能力的凝胶,在肉类工业上有待开发。超高压技术面临的瓶颈就是设备昂贵,消耗量大,不便于流水线生产等问题,目前的实际应用情况与规模化生产还有一定的差距。未来在技术装备水平提升的前提下,应通过增强应用效果、提高应用效率、扩展应用范围等方式提升技术应用水平和范围。

#### 参考文献

- [1] 谢宇恒.新技术对鱼糜凝胶特性的影响[J].安徽农业科学,2018,46(25):29-31  
XIE Yu-heng. Effect of new technology on the properties of surimi gel [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(25): 29-31
- [2] 周蓓蓓,陈小雷,鲍俊杰,等.超高压加工工艺对小龙虾仁品质影响的初步研究[J].食品科技,2018,43(6):154-160  
ZHOU Bei-bei, CHEN Xiao-lei, BAO Jun-jie, et al. Preliminary study on the effect of ultrahigh pressure processing technology on the quality of shrimp [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 154-160
- [3] 任婷婷.超高压技术在发酵食品加工技术中的实践[J].现代食品,2017,6:12-13,6  
REN Ting-ting. Practice of ultra-high pressure technology in fermented food processing technology [J]. Modern Food, 2017, 6: 12-13, 6
- [4] 侯养全.超高压食品灭菌技术研究进展与应用[J].山西科技,2018,33(1):106-108  
HOU Yang-quan. Research progress and application of ultra-high pressure food sterilization technology [J]. Shanxi Science and Technology, 2018, 33(1): 106-108
- [5] 李楠,张艳芳,韩剑飞,等.超高压杀菌对冰鲜鸡肉感官品质及微生物的影响[J].肉类工业,2015,3:19-23,27  
LI Nan, ZHANG Yan-fang, HAN Jian-fei, et al. Effects of ultra-high pressure sterilization on sensory quality and microorganisms of chilled chicken [J]. Meat Industry, 2015, 3: 19-23, 27
- [6] 王春梅,宋茜,庞彧娟.新食品加工技术对食品营养的影响[J].食品研究与开发,2017,38(17):218-220  
WANG Chun-mei, SONG Qian, PANG Yu-juan. Impact of new food processing technology on food nutrition [J]. Food Research and Development, 2017, 38(17): 218-220
- [7] 孙美.超高压技术在食品加工中的应用分析[J].食品安全导刊,2018,227(36):131  
SUN Mei. The analysis of application of ultra-high pressure technology in food processing [J]. Journal of Food Safety Tribune, 2018, 227(36): 131
- [8] 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,2018,43(1):50-54  
LI Ming-yue, DU Yu, YAO Xiao-ling, et al. Effects of ultrahigh pressure treatment on functional properties of proteins [J]. Food Science and Technology, 2018, 43 (1): 50-54
- [9] Khan M A, Ali S, Yang H, et al. Improvement of color, texture and food safety of ready-to-eat high pressure-heat treated duck breast [J]. Food Chem, 2019, 277(6): 46-54
- [10] 张颖利.超高压对肌原纤维蛋白酶解特性的影响[J].肉类工业,2017,6:37-41  
ZHANG Ying-li. Effect of ultrahigh pressure on myofibrinolytic properties [J]. Meat Industry, 2017, 6: 37-41
- [11] 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(4):424-428  
YAN Chun-zi, XIA Wen-shui, XU Yan-shun. Effect of ultrahigh pressure on myofibrin structure in grass carp [J]. Journal of Food and Biotechnology, 2018, 37(4): 424-428
- [12] 薛思雯,衣晓坤,于小波,等.超高压处理僵直前兔肉对其斩拌肉糜流变特性及蛋白二级结构的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(6):77-82  
XUE Si-wen, YI Xiao-kun, YU Xiao-bo, et al. Effect of ultrahigh pressure treatment on rheological properties and protein secondary structure of rabbit meat before rigidity [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(6): 77-82

- [13] Homma N, Ikeuchi Y, Suzuki A. Effects of high pressure treatment on the proteolytic enzymes in meat [J]. Meat Science, 1994, 38(2): 219-228
- [14] Ma H, Ledward D A. High pressure processing of fresh meat - Is it worth it? [J]. Meat Science, 2013, 95(4): 897-903
- [15] Cheftel J C, Culioli J. Effects of high pressure on meat: a review [J]. Meat Science, 1997, 46(3): 211-236
- [16] Sikes A, Tornberg E, Tume R. A proposed mechanism of tenderising post-rigor beef using high pressure-heat treatment [J]. Meat Science, 2010, 84(3): 390-399
- [17] Jung S, Ghoul M, de Lamballerie-Anton M. Changes in lysosomal enzyme activities and shear values of high pressure treated meat during ageing [J]. Meat Science, 2000, 56(3): 239-246
- [18] Qin H, Nan Q X, Che R Z. Effects of high pressure on the activity of major enzymes in beef [J]. Meat Res, 2001, 3: 13-16
- [19] 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 Zhi-yan, YANG Wen-ge, ZHOU Guo, et al. Effect of ultrahigh pressure assisted *Crustellus sinensis* on its muscle quality [J]. Food Science, 2017, 38(7): 43-48
- [20] 丛懿洁.超高压处理对猪肉品质的影响农业科学研究[J].农业科学研究,2019,40(4):65-68  
CONG Yi-jie. Effects of ultra-high pressure treatment on pork quality [J]. Research of Agricultural Scientific, 2019, 40(4): 65-68
- [21] Morton J D, Lee H Y, Pearson R G, et al. The physical and biochemical effects of pre-rigor high pressure processing of beef [J]. Meat Sci, 2018, 143(1): 29-36
- [22] Zhang H, Pan J, Wu Z. Investigation of the effects of high pressure processing on the process of rigor in pork [J]. Meat Sci, 2018, 145(4): 55-60
- [23] 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,2017,41(6):877-887  
LIU Shu-cheng, DENG Qian-lin, HUANG Wan-you, et al. Effects of ultrahigh pressure treatment on protein and microstructure of shrimp from *Littoris vannavis* [J]. Journal of Fisheries, 2017, 41(6): 877-887
- [24] Rakotondramavo A, Rabesona H, Brou C, et al. Ham processing: effects of tumbling, cooking and high pressure on proteins [J]. European Food Research and Technology, 2018, 245(2): 273-284
- [25] Yang Y, Sun Y, Pan D, et al. Effects of high pressure treatment on lipolysis-oxidation and volatiles of marinated pork meat in soy sauce [J]. Meat Science, 2018, 145(1): 86-94
- [26] 贾飞,苗旺,闫文杰,等.超高压处理对酱卤鸡腿品质及货架期的影响[J].肉类研究,2017,31(1):19-24  
JIA Fei, MIAO Wang, YAN Wen-jie, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on quality and shelf life of sauce and marinated chicken leg [J]. Meat Research, 2017, 31(1): 19-24
- [27] 王汇川,张志祥,宣晓婷,等.超高压对鲈鱼糜品质与凝胶特性的影响[J].食品研究与开发,2018,39(13):13-17  
WANG Hui-chuan, ZHANG Zhi-xiang, XUAN Xiao-ting, et al. Effect of ultrahigh pressure on the quality and gel properties of sea bass surimi [J]. Food Research and Development, 2018, 39(13): 13-17
- [28] Zheng H B, Han M Y, Yang H J, et al. The effect of pressure-assisted heating on the water holding capacity of chicken batters [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45(2): 80-86
- [29] Yang H, Tao F, Cao G, et al. Stability improvement of reduced-fat reduced-salt meat batter through modulation of secondary and tertiary protein structures by means of high pressure processing [J]. Meat Science, 2021, 176: 108439
- [30] 孟少华,马相杰,刘贯勇,等.超高压杀菌在西式香肠中的应用研究[J].肉类工业,2019,5:40-42,50  
MENG Shao-hua, MA Xiang-jie, LIU Guan-yong, et al. Application of ultra-high pressure sterilization in western sausage [J]. Meat Industry, 2019, 5: 40-42, 50
- [31] Hygreeva D, Pandey M C. Novel approaches in improving the quality and safety aspects of processed meat products through high pressure processing technology - a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 54(1): 75-85
- [32] Christensen L B, Hovda M B, Rode T M. Quality changes in high pressure processed cod, salmon and mackerel during storage [J]. Food Control, 2017, 72(9): 90-96
- [33] Liang Y, Guo B, Zhou A, et al. Effect of high pressure treatment on gel characteristics and gel formation mechanism of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi gels [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(5): 32-36
- [34] 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,2017,31(4):494-504  
ZHAO Hong-qiang, WU Jin-xin, ZHANG Yuan-yi, et al. Effect of ultrahigh pressure treatment on quality and microstructure of frozen bass fillet [J]. High Pressure Physics Journal, 2017, 31(4): 494-504

- [35] Ucak I, Gokoglu N, Kiessling M, et al. Inhibitory effects of high pressure treatment on microbial growth and biogenic amine formation in marinated herring (*Clupea harengus*) inoculated with *Morganella psychrotolerans* [J]. LWT, 2019, 99(5): 50-56
- [36] Rode T M, Hovda M B. High pressure processing extend the shelf life of fresh salmon, cod and mackerel [J]. Food Control, 2016, 70(24): 2-8
- [37] 王安琪,黄睿,胡晓苹,等.超高压工艺优化及其对即食金鲷鱼质构的影响[J].食品研究与开发,2017,38(5):123-128,142  
WANG An-qi, HUANG Rui, HU Xiao-ping, et al. Optimization of ultra-high pressure process and its effect on texture of ready-to-eat golden pomfret [J]. Food Research and Development, 2017, 38(5): 123-128, 142
- [38] Zhou Y, He Q, Su D, et al. Effects of ultra-high pressure tenderizing treatment on the quality characteristics of venison [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 39(2): 196-203
- [39] 张斌,孙兰萍,胡海燕,等.基于模糊数学和响应面法的超高压嫩化河蚌肉的感官评价[J].食品与发酵工业,2017,43(6): 157-162  
ZHANG Bin, SUN Lan-ping, HU Hai-yan, et al. Sensory evaluation of ultrahigh-pressure tender Mussel meat based on fuzzy mathematics and response surface method [J]. Food and Fermentation Industry, 2017, 43(6): 157-162
- [40] 白云,罗玲英,庄昕波,等.超高压预处理对乳化肠品质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(24):231-234  
BAI Yun, LUO Ling-ying, ZHUANG Xin-bo, et al. Effect of ultra-high pressure pretreatment on the quality of emulsified intestine [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(24): 231-234
- [41] 张颖璐,周敬阳,徐倩倩,等.超高压对发酵兔肉干腌渍发色的研究[J].食品研究与开发,2018,39(7):120-125  
ZHANG Ying-lu, ZHOU Jing-yang, XU Qian-qian, et al. Study on hair color of fermented rabbit meat preserved by ultra-high pressure [J]. Food Research and Development, 2018, 39(7): 120-125
- [42] Suemitsu L, Cristianini M. Effects of high pressure processing (HPP) on quality attributes of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during refrigerated storage [J]. LWT, 2019, 101(9): 2-9
- [43] Kaur B P, Rao P S, Nema P K. Effect of hydrostatic pressure and holding time on physicochemical quality and microbial inactivation kinetics of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 47-55
- [44] 贾莹,胡志和.超高压引发虾仁致敏性及感官品质的变化[J].食品科学,2017,38(9):14-20  
JIA Ying, HU Zhi-He. Changes in sensitization and sensory quality of shrimps induced by ultrahigh pressure [J]. Food Science, 2017, 38(9): 14-20
- [45] 李高尚,陈燕婷,宣仕芬,等.超高压前处理对虾仁冻藏期品质的影响[J].核农学报,2019,33(6):1131-1136  
LI Gao-shang, CHEN Yan-ting, XUAN Shi-fen, et al. Effect of ultra-high pressure pre-treatment on quality of shrimp in frozen storage period [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(6): 1131-1136
- [46] Giménez B, Graiver N, Califano A, et al. Quality attributes and shelf life of high-pressure preserved beef as affected by pre-treatment conditions [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(11): 2013-2022
- [47] 卫永华,刘永娟,杨莉,等.超高压处理对乳清分离蛋白凝胶特性的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(8):203-210  
WEI Yong-hua, LIU Yong-juan, YANG Li, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on the gel properties of whey protein isolates [J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(8): 203-210
- [48] 潘杰,周颖,王昱,等.超高压对鸡肉肌原纤维蛋白-MgCl<sub>2</sub>凝胶特性的影响[J].食品科学,2018,39(11):89-94  
PAN Jie, ZHOU Ying, WANG Yu, et al. Effect of ultrahigh pressure on the properties of chicken myofibrin-MgCl<sub>2</sub> gel [J]. Food Science, 2018, 39(11): 89-94
- [49] Zhang Z, Yang Y, Zhou P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2017, 217: 678-686
- [50] Wang J, Li Z, Zheng B, et al. Effect of ultra-high pressure on the structure and gelling properties of low salt golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myosin [J]. LWT, 2019, 100(3): 81-90
- [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):195-202  
DAI Hui-min, YE Tao, LIN Lin, et al. Preparation process optimization and gel properties of low-salt silver carp surimi gel under ultra-high pressure [J]. Food and Machinery, 2018, 34(8): 195-202

(下转第 374 页)