DOI:10.12441/spyswjs.20240409001 [文章编号] 1673-1689(2025)06-0001-09

超高压杀菌技术在预制菜加工中的应用研究

董海胜 臧 鹏

(中国航天员科研训练中心航天医学全国重点实验室,北京 100094)

摘要:超高压杀菌技术是典型的非热食品加工技术之一,因其对热敏性营养物质具有保护作用,且能有效保持食物的质构特性,在预制菜加工中具有独特的技术优势。作者通过调研国内外相关文献和相关设备性能,系统整理了超高压加工技术原理、工艺设备及工艺参数;重点围绕超高压杀菌技术参数、食品组分对不同微生物压力耐受性的影响,分析了超高压杀菌效果的影响因素;总结了超高压杀菌技术对预制菜感官品质、理化性质、酶活性、微生物数量和生物活性物质的影响,指出当前超高压杀菌技术在预制菜应用中存在的问题,并提出相应的解决措施,以期为超高压杀菌技术在预制菜产业中的应用提供参考。

关键词:超高压;预制菜;杀菌;酶活性

Research Progress in Application of Ultra-high Pressure Sterilization in the Processing of Prepared Dishes

DONG Haisheng ZANG Peng

(State Key Laboratory of Space Medicine, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: As a non-thermal sterilization technology, ultra-high pressure sterilization can protect the thermosensitive nutrients and maintain the texture of food, demonstrating unique technical advantages in the processing of prepared dishes. By a review of domestic and foreign literature and performance of relevant equipment, this paper introduced the principle, equipment, and parameters of ultra-high pressure sterilization. Considering the parameters of ultra-high pressure sterilization and the effects of food ingredients on the pressure tolerance of different microbial species, the factors affecting the effect of ultra-high pressure sterilization were analyzed. In addition, the effects of ultra-high pressure sterilization on the physical and chemical properties, sensory quality, enzyme activity, microorganisms count and bioactive substances of prepared dishes were summarized. Finally, the problems and solutions of the current application of ultra-high pressure sterilization in the processing of prepared dishes were pointed out. The review aims to provide reference for the application of ultra-high pressure sterilization in the prepared dish industry.

Keywords: ultra-high pressure; prepared dishes; sterilization; enzyme activity

预制菜是以一种或多种食用农产品及其制品为原料,使用或不使用调味料等辅料,且不添加防腐剂,经工业化预加工(如搅拌、腌制、滚揉、成型、炒、炸、烤、煮、蒸等)制成,配以或不配以调味料包,需符合产品标签标明的贮存、运输及销售条件,加热或熟制后方可食用的预包装菜肴。其范畴不包括主食类食品,如盖浇饭、速冻面米食品、糕点、方便食品、盒饭、馒头、肉夹馍、汉堡、面包、三明治及披萨等。根据加工、储运及流通方式可分为熟制预制菜、生制预制菜、冷藏预制菜、速冻预制菜和常温预制菜。常见的特色预制菜如梅菜肉饼、姜母鸭、酸菜鱼、地锅鸡、咕噜肉等已有对应

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFF1103203);航天营养与食品工程重点实验室基金项目(SYFD082102)。

通信作者:董海胜(1982—),男,博士,副研究员,主要从事航天营养与食品工程研究。E-mail: dhs303@126.com

收稿日期:2024-04-09 **修回日期:**2024-05-14

的团体标准颁布。

近年来，预制菜产业发展迅猛。为规范产品质量和市场，中国食品工业协会、中国农业国际合作促进会、各省市食品行业学会/协会、地方市场监督管理局等机构相继出台了预制菜相关标准，包括术语与分类、特色预制菜质量标准、生产加工及包装规范、冷链物流、配送和仓储管理等。如中国食品工业协会组织制定的T/CNFIA 115—2019《预制包装菜肴》规定了预制包装菜肴的分类、原辅料、技术要求、检验规则、标签标志、包装、储运和召回要求。

2024年3月18日，国家市场监管总局等六部委联合发布《关于加强预制菜食品安全监管 促进产业高质量发展的通知》，明确了预制菜范围，强调开展研究并推进预制菜标准体系建设，加强预制菜食品安全监管。文件提出通过强化优质原料保障能力、提升关键技术创新研发水平、加快先进生产工艺装备应用及积极营造良好产业发展环境等措施，统筹推进预制菜产业高质量发展。在加工工艺方面，鼓励创新非热加工、微胶囊包埋、营养与风味稳态化等技术，以减少营养成分损失，提升预制菜产品品质和口味复原度[1]。预制菜产业的高质量发展契合了消费者对食品色、香、味、形及营养等综合品质的要求。常规热杀菌工艺虽具有较好的安全可靠性，但对食品的色泽、风味、营养影响较大，不利于产品质量的提升和产业发展。

GB/T 44881—2023《食品生产质量控制与管理通用技术规范》指出，绿色、非热加工是未来食品生产通用技术的主流[2]。非热杀菌技术为预制菜加工注入了新活力，其中超高压杀菌技术可在常温或较低温度下作业，能同步实现杀菌与钝酶，既有利于延长食品货架期，又能有效保持食品特有的风味和营养品质，避免热杀菌对品质的不良影响[3-4]。近年来，超高压杀菌技术的研发及在预制菜中的应用成为研究热点，其应用场景已逐渐拓展至肉制品和水产品加工领域[5-6]。作者综述了超高压杀菌原理及小试、中试、生产级工艺设备的发展现状，重点分析影响其杀菌效果的因素及对预制菜品质的作用，探讨该技术在预制菜行业的应用趋势，为超高压杀菌技术的研究与应用提供参考。

1 超高压杀菌技术原理及设备

1.1 超高压杀菌技术原理

超高压杀菌技术是将食品密封在柔性包装材料中，以水或油作为传压介质，在常温或较低温度下经100~1 000 MPa的高压杀灭微生物的方法[7-9]。该技术基于物理杀菌原理，主要利用流体静力学特性——不可压缩静止流体中，任一点受外力产生压强增值后，压力可瞬间均匀地传递至产品各方向，从而破坏微生物的细胞形态与细胞结构，使大部分或全部微生物灭活，同时降低酶活性，在保持食品营养和感官品质的前提下延长食品货架期[10]。超高压杀菌技术在21世纪初就被美国食品药品监督管理局（Food and Drug Administration，FDA）正式批准用于食品加工，被视为具有广阔应用前景的新型食品加工技术，目前我国仍处于工业化应用的起步阶段[8]。

1.2 超高压杀菌技术设备

超高压杀菌的加压方式主要分为内部直接加压式和外部间接加压式，其中内部加压可进一步分为一体式内部加压和分体式内部加压[11]。当前应用较为广泛的加压方式原理图见图1~3。其中外部加压式具有容积利用率高、生产效率高等优点[12]；半连续式加压设备则实现了半连续化的加工生产，在一定程度上降低了食品加工成本，但由于此类型设备技术难度大[13]，目前实际应用较少。

在国外从事超高压设备制造的企业中，美国Avure Technologies公司和西班牙NC Hyperbaric公司占据主导地位。国内超高压设备制造企业

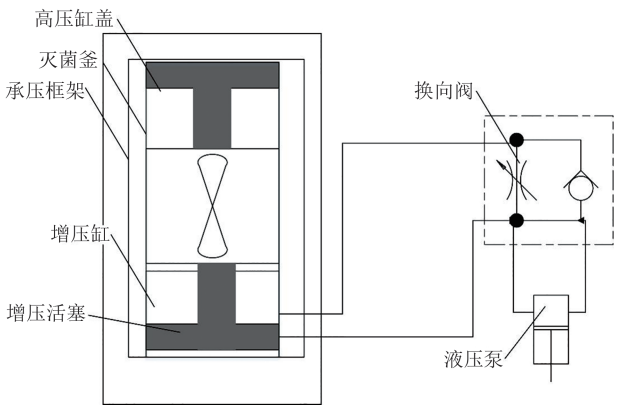


图1 内部分体式加压装置

Fig. 1 Internal split pressure device

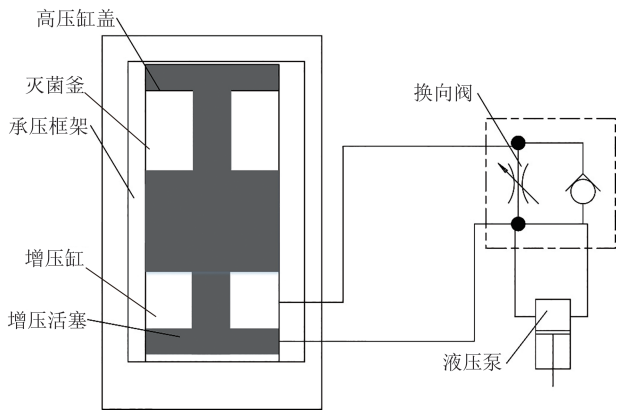


图2　内部一体式加压装置

Fig. 2　Internal integrated pressure device

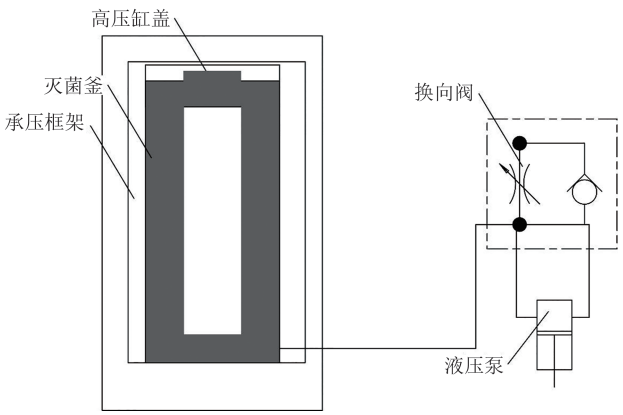


图3　外部间接加压装置

Fig. 3　External indirect pressure device

主要包括山西力德福科技有限公司、蓬能科技有限公司、滨一机械有限公司、科菲特有限公司和包头科发高压科技有限公司等。表1列举了部分超高压杀菌设备的关键性能参数，这些设备的工作容积为10~150 L，可在3~5 min内实现工作压力0~600 MPa的增压调节，最长压力保持时间为3~5 min。通常情况下，随着超高压设备容积的增加，设备功率消耗会成倍增加，因此降压过程中的能量回收成为研究热点。目前，超高压杀菌技术已在果蔬制品、肉制品、奶制品、发酵食品、水产品等预制菜领域开展应用，其中采用该技术杀菌的果蔬汁已实现量产[14]。

表1　国内外部分超高压工艺设备及其关键性能参数

Table 1　Some domestic and foreign ultra-high pressure equipment and its key performance parameters

品牌	型号	直径/mm	容积/L	功率/kW	压力/MPa	增压时间/min	保压时间/min
Avure	Avure AV-10	305	100	165	0~600	≤3	0~3
Hyperbaric	Hiperbaric55	200	55	62	0~600	≤3	0~3
	Hiperbaric135	380	135	120	0~600	≤3	0~3
滨一机械	BY.S-50 L	220	50	40	0~600	3~5	0~5
	BY.S-100 L	260	100	80	0~600	3~5	0~5
蓬能科技	UHP-50 L	200	50	55	0~600	<5	0~5
	UHP-150 L	300	150	166	0~600	<5	0~5
科菲特	UHPL-30	200	30	35	0~600	≤5	0~5
	UHPL-50	200	50	55	0~600	≤5	0~5
力德福科技	SUHP-10 L	150	10	15	0~600	≤3	0~5
	SUHP-57 L	200	57	90	0~600	≤3	0~5
包头科发	30 LUHP	200	30	45	0~600	≤5	0~5
	50 LUHP	220	50	55	0~600	≤5	0~5

2　影响超高压杀菌技术杀菌效果的因素研究

影响超高压杀菌效果的因素包括压力、保压时间、温度、微生物种类和食品组分等。压力的升/卸压方式也会对杀菌效果产生影响，但由于其对设备的要求较高，目前相关研究较少。

2.1　超高压杀菌参数对杀菌效果的影响

压力与保压时间是影响超高压杀菌效果的主要因素。高婧昕等[15]研究不同压力对复合果汁中菌落总数的影响，发现复合果汁中的菌落总数随压力升高而减少，经500 MPa处理后未检测出霉菌和酵母菌，菌落总数显著下降。王寅[16]在400 MPa和500 MPa条件下处理蓝莓汁，发现500 MPa时的杀菌效果更优。综上，压力升高对微生物灭活效果具有显著促进作用。另外，保压时间也会影响超高压杀菌效果。向晨茜[17]研究保压时间对

杀菌效果的影响，发现压力为400 MPa、保压时间为0~15 min的条件下，随着保压时间的延长，橙汁中的菌落总数显著降低（P<0.05）。

升/卸压速率也会影响超高压杀菌效果[18]。Dong等[19]对比了线性快速、线性缓慢、逐步快速、逐步缓慢4种升压方式对杀菌效果的影响，发现在相同保压时间和压力条件下，线性快速升压方式的杀菌效果最优。Syed等[20]研究升/卸压方式对枯草芽孢杆菌孢子的灭活作用时发现，在排除温度影响的条件下，缓慢升/卸压与快速升/卸压的杀菌效果无显著差异。Ferreira等[21]发现，在300~400 MPa、1~5 min的条件下处理时，300 MPa处理5 min，采用慢速升压（1.5 MPa/s）结合慢速卸压（3.2 MPa/s）可以显著提高无害李斯特菌的杀灭效果。

压力作用方式分为脉冲式杀菌与恒压式杀菌，脉冲式杀菌指在杀菌过程中重复加压，恒压式杀菌则是保持压力恒定。有研究表明，在相同压力条件下，脉冲式杀菌效果显著优于恒压式杀菌[22]。Yoshiko等[23]发现，冷冻胡萝卜汁经300 MPa一个循环处理（保压时间为5 min）后，大肠杆菌数减少了2.10 lg（CFU/mL），2个循环处理后减少了4.01 lg（CFU/mL），表明随循环次数的增加，大肠杆菌致死率显著提高。Hayakawa等[24]的研究也证实，重复加压可增强杀菌效果。此外，Szczepańska等[25]研究发现，多脉冲300 MPa处理与恒压600 MPa处理的果汁在贮藏12周后微生物数量相当，表明多脉冲杀菌是一种高效的杀菌方式。

温度会显著影响超高压杀菌的微生物致死率。对多数食源性微生物而言，室温下微生物对压力的抗性最强，而超高压杀菌技术结合温度处理可提高微生物对压力的敏感性，从而显著增强杀菌效果[26]。Gong等[27]研究发现，在40 ℃、400 MPa条件下处理胡萝卜汁，其菌落总数下降约3个数量级，60 ℃处理时下降约4个数量级，表明超高压与高温结合可显著提升细菌灭活效果[28]。此外，超高压与低温（0 ℃以下）协同处理同样可增强杀菌效果，原因在于低温下使用高压处理可促使细胞内冰晶析出，损伤细胞膜；同时低温可增加蛋白质的敏感性，使蛋白质在相同超高压条件下更易变性[29]。因此，针对抗压性较强的微生物，可采用压力与温度协同处理以提高灭活率。

2.2 不同微生物对超高压的耐受性

不同类别的微生物抗压性存在差异，即使同一种属的微生物，其耐压程度也不尽相同[30]。大部分霉菌、酵母菌及绝大多数食源性病原菌在300~500 MPa压力下处理即可被灭活[31]，而芽孢在1 000 MPa压力下仍可存活[32]。由于单纯依靠提高压力灭菌对超高压设备要求较高且可能影响食品感官，针对芽孢灭活可采用分步杀菌法，先诱导孢子萌发恢复到营养细胞状态，使之丧失对外界胁迫的抵抗力，再快速施加压力灭活[33]。鉴于不同微生物对压力的敏感性不同，高压杀菌时需先分析微生物种类，再设计压力、时间和温度等参数，避免过度加压破坏食品组分，影响产品感官。

2.3 食品组分对杀菌效果的影响

食品组分会影响超高压杀菌效果[34]。首先，营养物质丰富的食品中，微生物对超高压的抗性更强，其中蛋白质、脂肪、碳水化合物等物质对微生物具有保护作用[35]。高浓度糖可通过降低水分活度（A_w）对微生物起保护缓冲作用[36]。其次，微生物均有最适生长的pH范围，不同pH条件对超高压杀菌效果影响显著，酸性或碱性环境会减弱微生物的抗压性[37]。此外，A_w也会影响杀菌效果，A_w较高时可促进微生物生长，A_w较低时会增强微生物抗压性，而绝大多数微生物无法在A_w<0.60的环境下生长[38]。因此，采用超高压杀菌时需了解食品组分构成，以优化超高压杀菌参数。

3 超高压杀菌技术对预制菜品质的影响

3.1 对理化性质的影响

国内学者调研发现，现有市售菜肴类即烹预制菜为实现预期保质期和品质，会使用类别多样的食品添加剂，但工艺单一，需要从工艺上突破，以减少或避免使用食品添加剂[39]。李逸婷等[40]通过添加茶多酚、山梨酸钾及氯化钙，实现了新疆虎皮辣椒预制菜护绿保脆效果。研究表明，通过超高压等冷杀菌手段替代山梨酸钾等防腐剂的使用，不仅能达到预期保质期，也是提升产品品质的有效途径。有研究者通过分析预制菜加工流程发现，杀菌效果好、工艺可行性高、成本低、工艺单元简单的杀菌技术是控制预制菜微生物的关键环节，而超高压处理可更好地保留食品的风味、色泽和营养[41-45]。

国外学者对柚子膳食纤维进行超高压处理，结果表明该处理改变了柚子果实的单糖组成，增加了总膳食纤维和可溶性膳食纤维含量。在400 MPa条件下，可溶性膳食纤维质量分数显著增加，从（32.49±0.23）%增加到（41.92±0.32）%（P<0.05）。同时，超高压处理提高了膳食纤维的保水性、保油性和溶胀性，这与膳食纤维形成更多多孔结构和暴露更多疏水基团有关。此外，超高压改性膳食纤维表现出更强的胆汁酸结合能力和胰脂肪酶抑制能力，显示出优异的体外降血脂活性，表明超高压处理是制备功能特性优异的膳食纤维的有效方法[46]。

有学者研究超高压对凡纳滨对虾肌原纤维蛋白（MP）理化性质、胶凝性质和体外消化特性的影响。结果表明，当压力从0 MPa升至600 MPa时，MP的α螺旋结构逐渐展开并转变为β折叠结构。与对照组相比，600 MPa处理的MP样品中α螺旋结构占比下降了51.31%，β折叠结构占比增加了1.34倍。此外，超高压处理增强了MP的流变性能，与对照组（频率高达10 Hz）相比，600 MPa处理组的弹性模量和储能模量分别为对照组的4.77倍和3.78倍。超高压处理还改善了MP的凝胶性质，体外模拟消化试验显示，超高压处理形成的MP凝胶更易被消化，与对照组相比，600 MPa处理组的MP凝胶消化率提高了1.89倍，可消化颗粒尺寸减小了66.86%[47]。

3.2 对感官品质的影响

色泽是食品具备良好感官品质的必备要素之一。通过色差仪分析颜色变化时，L^*值表示亮度值，a^*值表示红绿值，b^*值表示黄蓝值。当ΔE>2时，表明颜色发生明显改变，且ΔE越小，表明产品色泽变化越小。超高压杀菌能最大限度保留原有色泽。冯若怡等[48]比较了热杀菌与超高压杀菌对复合苹果泥色泽的影响，结果显示超高压处理后的产品色泽最接近处理前。周春丽等[49]对美洲南瓜的研究表明，500 MPa超高压杀菌处理对其颜色无显著影响。马鹏利等[50]研究发现，超高压杀菌技术对食品颜色影响较小，可能是因为超高压灭活了引起色泽变化的酶，进而抑制了色泽变化。

与传统热杀菌相比，超高压杀菌可最大限度地保留预制菜原有风味[51]。胡小军等[52]采用超高压处理虾滑发现，超高压对虾滑的亮度影响较小，但红度显著降低，黄度增大。在200 MPa下保压10 min时，虾滑持水性达到最大值84.17%，蒸煮得率最大为92.80%。此外，超高压处理会降低虾滑的凝胶强度、硬度、咀嚼性能和弹性，但内聚性无显著变化。综合这些指标，超高压处理对虾滑感官品质无不利影响。另有研究表明，超高压处理畜禽类预制菜会致使风味物质含量变化[53]，这可能是由于超高压杀菌技术的组织调理作用间接影响了产品的风味成分。但总体而言，超高压处理在风味保留方面显著优于热杀菌。

3.3 对酶活性的影响

果蔬中的多酚氧化酶（PPO）和过氧化物酶（POD）是导致果蔬品质改变的重要因素[54]。其中POD较难钝化，可通过氧化反应产生过氧化物，间接导致脂质氧化，进而影响感官品质[55]。Yi等[56]发现经高压处理的苹果汁中酶活性降至原来的50%，而热处理后的酶活性显著低于超高压处理组，表明超高压的钝酶效果弱于热处理。而Zhu等[57]采用热水法从黄芪中提取的多糖组分（APS）经超高压处理后，其对α-葡萄糖苷酶的抑制活性显著提高。扫描电子显微镜、圆二色谱、原子力显微镜和刚果红测试分析显示，超高压处理会影响APS的高级结构。PPO是导致果蔬褐变的关键酶，果蔬采摘后PPO活性增强，加剧褐变[58]。Terefe等[59]对蓝莓中PPO的高压活化与失活动力学研究表明，在30~50 ℃、200.0~500.0 MPa条件下钝酶效果不明显；而在65~80 ℃、0.1~600.0 MPa下酶的失活率显著提高，说明超高压与温度协同可增强酶失活效果。

3.4 对微生物的影响

食品中富含微生物生长所需的各种营养成分，因此，杀灭微生物对延长食品贮藏期和提高安全性至关重要。超高压联合磁场（MF）处理草鱼鱼片的研究表明，300 MPa超高压处理结合MF（UHP300-MF）贮藏，可通过抑制蛋白质自由基积累和脂质氧化产物的形成，延缓鱼片蛋白质氧化，从而抑制氧化引起的质地、颜色等品质劣化。16S rDNA菌群分析显示，UHP300-MF处理能抑制鱼片菌群活性和多样性，延缓微生物引起的蛋白质降解和品质下降[60-61]。Yi等[62]研究发现，600 MPa超高压处理（保压5 min）的野杏汁在室温（25 ℃）下保鲜期延长了至少10倍，而在冷藏

（4 ℃）条件下延长了5倍，证实了超高压杀菌技术可延长贮藏期。由于不同微生物对超高压杀菌技术的敏感性存在差异，实际应用中需先分析目标微生物的种类，再设计工艺参数，或采用微波、辐照、脉冲强光等栅栏技术，与超高压协同杀菌。T/CNFIA 115—2019《预制包装菜肴》对预制菜微生物进行了限量规定，菌落总数≤100 000 CFU/g，大肠菌群≤100 CFU/g，超高压杀菌处理可满足上述微生物指标要求。

3.5 对食品中生物活性物质的影响

大多数生物活性物质对热敏感，高温易导致其活性降低，而超高压杀菌技术可更好地保持食品中的营养物质。李俊芳[63]研究发现，超高压处理的桑葚发酵饮料中总黄酮含量较对照组显著增加（P<0.05）。500 MPa以上的超高压处理可通过破坏大豆凝集素的二级和三级结构来高效钝化其活性，从而提升大豆制品的安全性[64]。Gao等[65]研究表明，低温超高压处理的草莓果肉中总酚和花色苷含量高于高温超高压处理组，说明在超高压处理中，温度对生物活性物质的保留具有显著影响。这可能是由于温度升高会增加果皮组织中细胞膜的通透性，促进酚类物质和花色苷降解。

4 展望

超高压杀菌技术在实现杀菌和钝酶的同时，能最大程度保留食品营养、生物活性成分，并维持良好的感官品质，契合大众对预制菜“安全、绿色”的消费需求。由于预制菜品类丰富且加工工艺复杂多样，在应用超高压技术对不同品类预制菜进行杀菌钝酶工艺设计时，需综合考量压力、温度、保压时间等影响因素，并将超高压杀菌技术和其他杀菌技术结合，探索更优的杀菌钝酶方法。如结合天然抗菌剂或采用微波、辐照、高压CO_2处理等技术与超高压杀菌技术联用，不仅能提升杀菌效果，还可降低生产成本。然而，目前相关研究较少，制约了超高压杀菌技术在预制菜产业中的应用与推广。因此，需加快超高压杀菌技术在预制菜产业中的理论与应用研究。

参考文献

[1] 毛嘉仪，吕璐. 预制菜食品标准发展现状、问题及对策研究[J]. 标准科学，2025，(5)：69-74.

[2] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 食品生产质量控制与管理通用技术规范：GB/T 44881—2023[S]. 北京：中国标准出版社，2023.

[3] 徐卉，陶宁萍，俞骏，等. 均质及杀菌处理对暗纹东方鲀鱼汤品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(4)：85-93.
XU H，TAO N P，YU J，et al. Effects of homogenization and sterilization on quality of *Takifugu obscurus* soup[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(4)：85-93.(in Chinese)

[4] 李芮，宋雅琪，周丹丹，等. 等离子体活化水对鲜切莲藕杀菌及保鲜的影响[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(10)：30-40.
LI R，SONG Y Q，ZHOU D D，et al. Effects of plasma-activated water on sterilization and preservation of fresh-cut lotus root[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(10)：30-40.(in Chinese)

[5] 孙梦，冉佩灵，黄业传，等. 超高压杀菌对低盐切片腊肉风味及理化性质的影响[J]. 食品工业科技，2024，45(2)：101-109.
SUN M，RAN P L，HUANG Y C，et al. Effect of ultra-high-pressure sterilization on flavor and physicochemical properties of low-salt sliced bacon[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(2)：101-109.(in Chinese)

[6] 步营，何玮，胡显杰，等. 超高压对蓝蛤酶解液风味及其蛋白质结构的影响[J]. 食品科学技术学报，2021，39(1)：104-116.
BU Y，HE W，HU X J，et al. Effects of ultra-high pressure on flavor and protein structure of enzymatic hydrolysates of *Aloididae aloidi*[J]. Journal of Food Science and Technology，2021，39(1)：104-116.(in Chinese)

[7] FARKAS D F. A short history of research and development efforts leading to the commercialization of high-pressure processing of food[M]. New York：Springer，2016.

[8] 邹溪. 食品超高压杀菌技术及其研究进展[J]. 食品安全导刊，2018(27)：184.
ZOU X. Review on ultra-high pressure sterilization of foods and recent research progress[J]. China Food Safety Magazine，2018(27)：184.(in Chinese)

[9] BALA-BALASUBRAMANIAM V M，MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I，GUPTA R. Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry[J]. Annual Review of Food Science and Technology，2015，6：435-462.

[10] 贾蒙，成传香，王鹏旭，等. 超高压技术在果蔬汁杀菌中的应用[J]. 食品与发酵工业，2019，45(12)：257-264.
JIA M，CHENG C X，WANG P X，et al. Application of

ultra-high pressure in sterilizing fruit and vegetable juices [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(12): 257-264.(in Chinese)

[11] 罗利川，吕戈亮，贾培起. 超高压加工设备安全的冗余设计[J]. 山东工业技术，2020(3)：121-127.
LUO L C, LV G L, JIA P Q. Safety redundancy design for ultra-high pressure machining equipment[J]. Shandong Industrial Technology, 2020(3): 121-127.(in Chinese)

[12] 于林杰. 超高压食品加工设备现状及发展趋势[J]. 食品安全导刊，2021(31)：162-164.
YU L J. Current status and development trend of ultra-high pressure food processing equipment[J]. China Food Safety Magazine, 2021(31): 162-164.(in Chinese)

[13] 徐圣捷，赵东，高祥，等. 超高压食品加工设备现状及发展趋势[J]. 食品工业，2019，40(12)：222-225.
XU S J, ZHAO D, GAO X, et al. Application research of ultra-pressure food processing equipment in food industry [J]. The Food Industry, 2019, 40(12): 222-225.(in Chinese)

[14] 刘树攀. 超高压技术在食品加工中的应用[J]. 食品安全导刊，2022(14)：163-165.
LIU S P. Application of ultra-high pressure technology in food processing [J]. China Food Safety Magazine, 2022(14): 163-165.(in Chinese)

[15] 高婧昕，刘旭，丁皓玥，等. 超高压处理对复合果汁微生物和品质的影响[J]. 中国食品学报，2020，20(9)：118-130.
GAO J X, LIU X, DING H Y, et al. Effects of high hydrostatic pressure treatment on microorganism and quality of composite juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 118-130.(in Chinese)

[16] 王寅. 超高压处理对蓝莓汁的品质影响研究[D]. 北京：北京林业大学，2013.

[17] 向晨茜. 超高压处理对鲜榨橙汁品质影响研究[D]. 重庆：西南大学，2012.

[18] 张凡，王永涛，廖小军. 超高压升/卸压过程对杀菌效果的影响研究进展[J]. 中国食品学报，2020，20(5)：293-302.
ZHANG F, WANG Y T, LIAO X J. Research progress on the effect of pressurization and depressurization on high hydrostatic pressure sterilization [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(5): 293-302.(in Chinese)

[19] DONG K, LI Y W, LUO S J, et al. Hydrostatic pressure boost rate and mode to enhance sterilization mediated by GroEL-interacting proteins[J]. Food Control, 2021, 126: 108091.

[20] SYED Q A, REINEKE K, SALDO J, et al. Effect of compression and decompression rates during high hydrostatic pressure processing on inactivation kinetics of bacterial spores at different temperatures [J]. Food Control, 2012, 25(1): 361-367.

[21] FERREIRA M, PEREIRA S, ALMEIDA A, et al. Effect of temperature and compression/decompression rates on high pressure inactivation of *Listeria*[J]. Acta Alimentaria, 2016, 45(1): 61-68.

[22] BUZRUL S. Multi-pulsed high hydrostatic pressure treatment of foods[J]. Foods, 2015, 4(2): 173-183.

[23] Yoshiko N, Claudia S, Kazuya M, et al. Effect of incubation temperature after high hydrostatic pressure treatment of *Escherichia coli*: on the detection of injured populations[J]. High Pressure Research, 2024, 44 (2): 105-115.

[24] HAYAKAWA I, KANNO T, TOMITA M, et al. Application of high pressure for spore inactivation and protein denaturation[J]. Journal of Food Science, 1994, 59(1): 159-163.

[25] SZCZEPAŃSKA J, PINTO C A, SKĄPSKA S, et al. Effect of static and multi-pulsed high pressure processing on the rheological properties, microbial and physicochemical quality, and antioxidant potential of apple juice during refrigerated storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 112038.

[26] 章中，胡小松，廖小军，等. 温压结合超高压处理对芽孢杀灭作用的研究进展[J]. 高压物理学报，2013，27(1)：147-152.
ZHANG Z, HU X S, LIAO X J, et al. Review on sterilization effects of high pressure thermal sterilization on bacterial spores[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 147-152.(in Chinese)

[27] GONG Y, YU J Y, QIAN P, et al. Comparative study of the microbial stability and quality of carrot juice treated by high-pressure processing combined with mild temperature and conventional heat treatment [J]. Journal of Food Process Engineering, 2015, 38(4): 395-404.

[28] AL-GHAMDI S, SONAR C R, PATEL J, et al. High pressure-assisted thermal sterilization of low-acid fruit and vegetable purees: microbial safety, nutrient, quality, and packaging evaluation [J]. Food Control, 2020, 114: 107233.

[29] 王春芳. 超高压与温度的协同杀菌效应及其动力学研究[D]. 杭州：浙江大学，2019.

[30] 王春芳，毛明，王为民，等. 微生物在超高压下的致变机理和影响因素研究现状[J]. 中国食品学报，2013，13(7)：164-169.
WANG C F, MAO M, WANG W M, et al. Research

status of micro-organisms' mutagenic mechanism and influencing factors by the ultra-high pressure[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013,13(7):164-169.(in Chinese)

[31] 李仁杰,王永涛,廖小军. 超高压对食品中微生物的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2014,5(8):2523-2531.
LI R J, WANG Y T, LIAO X J. Effects of high hydrostatic pressure on microorganisms in foods[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(8): 2523-2531.(in Chinese)

[32] GOKUL N K, PANDISELVAM R, SUNIL C K. High-pressure processing: effect on textural properties of food: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 351: 111521.

[33] 程琴,黄庶识,陈丽梅. 芽孢杆菌孢子萌发机理的研究进展[J]. 生命科学,2010,22(9):878-885.
CHENG Q, HUANG S S, CHEN L M. Research advances on the germination mechanism of *Bacillus* spores[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences,2010,22(9):878-885.(in Chinese)

[34] 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,2016,54:175-185.

[35] NASIŁOWSKA J, SOKOŁOWSKA B, FONBERG-BROCZEK M. Long-term storage of vegetable juices treated by high hydrostatic pressure: assurance of the microbial safety[J]. BioMed Research International, 2018,2018(1):7389381.

[36] GEORGET E, SEVENICH R, REINEKE K, et al. Inactivation of microorganisms by high isostatic pressure processing in complex matrices: a review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2015,27:1-14.

[37] SYED Q A, BUFFA M, GUAMIS B, et al. Factors affecting bacterial inactivation during high hydrostatic pressure processing of foods: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(3): 474-483.

[38] 袁龙. 软包装食品超高压及其微波协同杀菌工艺与动力学研究[D]. 无锡:江南大学,2017.

[39] 田瑞菁,徐婕,孙丽红. 超市菜肴类即烹预制菜营养现状调查[J]. 食品工业,2024,45(4):339-343.
TIAN R J, XU J, SUN L H. Investigation on the nutritional status of ready-to-cook pre-prepared dishes in supermarket[J]. The Food Industry, 2024, 45(4): 339-343.(in Chinese)

[40] 李逸婷,饶金美,马杰,等. 新疆虎皮辣椒预制菜护绿保脆工艺[J]. 食品工业,2024,45(2):100-105.
LI Y T, RAO J M, MA J, et al. The technology of green protection and brittleness protection of Xinjiang tiger skin pepper prepared dish[J]. The Food Industry, 2024, 45(2):100-105.(in Chinese)

[41] 朱迪迪,杨少华,张伟,等. 预制菜食品微生物潜在风险点分布及其原因探究[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2024,55(1):116-122.
ZHU D D, YANG S H, ZHANG W, et al. Distribution and causes of potential microbial risk in the prepared dishes industry[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2024, 55(1): 116-122.(in Chinese)

[42] 黄晓玲,王永涛,廖小军,等. 超高压和高温短时杀菌对NFC橙汁品质的影响[J]. 食品工业科技,2021,42(6):1-8,14.
HUANG X L, WANG Y T, LIAO X J, et al. Effects of ultra-high pressure and high temperature short-time sterilization on the quality of NFC orange juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6):1-8, 14.(in Chinese)

[43] YI J J, KEBEDE B T, HAI DANG D N, et al. Quality change during high pressure processing and thermal processing of cloudy apple juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75:85-92.

[44] ROJO C M, CRISTIANI M, SZERMAN N, et al. Reduction of *Zygosaccharomyces rouxii* population in concentrated grape juices by thermal pasteurization and hydrostatic high pressure processing [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(5): 781-788.

[45] CHANG Y H, WU S J, CHEN B Y, et al. Effect of high-pressure processing and thermal pasteurization on overall quality parameters of white grape juice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(10): 3166-3172.

[46] OUYANG H, GUO B L, HU Y, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on structural and functional properties of dietary fiber from pomelo fruitlets[J]. Food Bioscience, 2023, 52:102436.

[47] ZHANG K X, LI N, LI J Z, et al. Improving the gelation and digestive properties of myofibrillar protein in *Litopenaeus vannamei* by ultra-high pressure[J]. Food Bioscience, 2023, 56:103402.

[48] 冯若怡,王晓钰,杨云舒,等. 超高压处理对复合苹果泥微生物和品质的影响[J]. 食品工业科技,2020,41(17):37-44.
FENG R Y, WANG X Y, YANG Y S, et al. Effects of high hydrostatic pressure treatment on microbe and quality

of mixed apple puree[J]. Science and Technology of Food Industry,2020,41(17):37-44.(in Chinese)

[49] 周春丽,锁冠文,虞磊,等. 高静压处理对美洲南瓜杀菌效果与品质的影响[J]. 食品工业,2021,42(9):147-151.
ZHOU C L, SUO G W, YU L, et al. Effect of high hydrostatic pressure processing on microbial inactivation and quality of *Cucurbita pepo*[J]. The Food Industry, 2021,42(9):147-151.(in Chinese)

[50] 马鹏利,张馨予,冬子众,等. 超高压和热处理对混合果蔬汁品质影响的比较研究[J]. 食品研究与开发,2020,41(20):51-57.
MA P L,ZHANG X Y,DONG Z Z,et al. Comparison of effects of ultra-high pressure treatment and heat treatment on qualities of mixing fruit-vegetable juice beverage[J]. Food Research and Development, 2020, 41(20): 51-57.(in Chinese)

[51] 朱悦夫. 超高压处理对果蔬结构及品质的影响[D]. 广州:华南理工大学,2017.

[52] 胡小军,李春兰,王标诗,等. 超高压处理对虾滑预制菜品质特性的影响[J]. 食品工业科技,2023,44(11):88-94.
HU X J, LI C L, WANG B S, et al. Effect of ultra-high pressure on the quality properties of shrimp slips prepared dishes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023,44(11):88-94.(in Chinese)

[53] 曾璐瑶,王海滨,廖鄂,等. 畜禽类预制菜加工技术研究进展[J]. 食品工业科技,2023,44(7):490-499.
ZENG L Y, WANG H B, LIAO E, et al. Processing technology progress on prepared dishes of livestock and poultry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023,44(7):490-499.(in Chinese)

[54] 李之悦,张志祥,尚海涛,等. 超高压技术在果蔬贮藏与加工中的应用研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2018(9):144-148.
LI Z Y, ZHANG Z X, SHANG H T, et al. Research progress of application of ultra-high pressure treatment in fruits and vegetables storage and processing [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018(9): 144-148.(in Chinese)

[55] SIGUEMOTO É S, GUT J A W. Validation of spectrophotometric microplate methods for polyphenol oxidase and peroxidase activities analysis in fruits and vegetables[J]. Food Science and Technology, 2017, 37(S1):148-153.

[56] YI J J, KEBEDE B T, HAI DANG D N, et al. Quality change during high pressure processing and thermal processing of cloudy apple juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75:85-92.

[57] ZHU Z Y, LUO Y, DONG G L, et al. Effects of the ultra-high pressure on structure and α-glucosidase inhibition of polysaccharide from *Astragalus*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 87:570-576.

[58] TRIBST A A L, DE CASTRO LEITE B R J, DE OLIVEIRA M M, et al. High pressure processing of cocoyam, Peruvian carrot and sweet potato: effect on oxidative enzymes and impact in the *Tuber* color[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34:302-309.

[59] TEREFE N S, DELON A, BUCKOW R, et al. Blueberry polyphenol oxidase: characterization and the kinetics of thermal and high pressure activation and inactivation[J]. Food Chemistry, 2015, 188:193-200.

[60] ZHU C, ZENG X Y, CHEN L H, et al. Changes in quality characteristics based on protein oxidation and microbial action of ultra-high pressure-treated grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets during magnetic field storage[J]. Food Chemistry, 2024, 434:137464.

[61] SUN L G, LV J X, LIU Y, et al. Effects of combined carnosine and ultra-high pressure on the inhibition of fishy off-odor of snakehead fillets and the possible mechanism [J]. Food Chemistry, 2022, 395:133615.

[62] YI T, FANG W, XIE X Q, et al. High pressure processing (HPP) improved the safety and quality of *Aronia* berry puree: validated by a commercially applicable shelf life study[J]. ACS Food Science & Technology, 2022, 2(3):382-390.

[63] 李俊芳. 桑椹发酵饮料发酵工艺及超高压处理对其品质影响的研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.

[64] HAN X, SUN Y, HUANGFU B X, et al. Ultra-high-pressure passivation of soybean agglutinin and safety evaluations[J]. Food Chemistry, 2023, 18:100726.

[65] GAO G, REN P Y, CAO X M, et al. Comparing quality changes of cupped strawberry treated by high hydrostatic pressure and thermal processing during storage[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 100:221-229.

（责任编辑：刘冬梅）