晏一帆, 吴林桐, 张洪超, 等. 超高压加工固态/半固态食品: 安全控制与质构调控的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 557−566. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080038

YAN Yifan, WU Lintong, ZHANG Hongchao, et al. High Pressure Processing of Solid and Semi-solid Foods: Progresses in Safety Control and Texture Regulation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 557−566. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080038

· 专题综述 ·

超高压加工固态/半固态食品：安全控制与质构调控的研究进展

晏一帆[1], 吴林桐[1], 张洪超[1,2,*], 张　燕[1,2]

（1.中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;
2.农业农村部果蔬加工重点实验室, 食品非热加工北京市重点实验室, 北京 100083）

摘　要: 超高压（High pressure processing，HPP）是一种新型的非热食品加工技术，已有多品类产品实现商业化成功应用，但其中固态和半固态食品较少。本文通过调研国内外超高压加工产品和文献数据，分析超高压加工固态和半固态食品的应用现状，总结了超高压加工针对固态和半固态食品中营养体、细菌芽孢、真菌孢子和病毒等微生物的安全控制作用，以及通过改变细胞结构、内源酶活性或凝胶特性来改变食品质构特性的调控规律。此外，提出超高压固态和半固态食品加工存在的共性技术难点和可能的解决办法，以期为超高压技术的拓展应用提供思路和参考。

关键词: 超高压加工, 固态食品, 半固态食品, 杀菌, 质构

中图分类号: TS205　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0557−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080038

本文网刊:

High Pressure Processing of Solid and Semi-solid Foods: Progresses in Safety Control and Texture Regulation

YAN Yifan[1], WU Lintong[1], ZHANG Hongchao[1,2,*], ZHANG Yan[1,2]

（1.College of Food Science and Nutrition Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2.Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Key Laboratory for Food Non-thermal Processing, Beijing 100083, China）

Abstract: High pressure processing (HPP) is a novel non-thermal food processing technology with successful commercial applications in various product categories, but its application in solid and semi-solid foods is relatively limited. This paper analyzes the current application status of HPP in solid and semi-solid foods by surveying domestic and international HPP products and literature data. It summarizes the safety control effects of HPP on microorganisms such as vegetative cells, bacterial spores, fungal spores, and viruses in solid and semi-solid foods, as well as the regulatory mechanisms for altering food texture properties by changing cell structure, endogenous enzyme activity, or gel properties. Furthermore, we propose common technical challenges and possible solutions in HPP solid and semi-solid food processing, aiming to provide useful guidance for expanding the applications of HPP technology.

Key words: high pressure processing; solid food; semi-solid food; sterilization; texture

超高压技术（High Pressure Processing, HPP）是一种基于帕斯卡定律、勒夏特列原理及分子有序原理的非热加工技术, 以水为传压介质, 在密闭高压容器中对适宜柔性包装内的食品施加不低于 100 MPa

收稿日期: 2025−08−11

基金项目: 国家重点研发计划项目“食品制造与农产品物流科技支撑”专项课题 2024YFD2101102（所属项目 2024YFD2101100）。

作者简介: 晏一帆（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工新技术, E-mail: 13613522896@163.com。

*** 通信作者:** 张洪超（1986−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工新技术, E-mail: hzhang18@cau.edu.cn。

的静水压力[1]。在实际商业化生产应用中，压力施加范围多集中于 200~600 MPa，保压时间可能仅需要 5 min 或更短[2]，所得产品品质显著优于传统热加工。

目前，HPP 技术在国外已广泛应用于果汁、酒类、加工肉制品等食品品类，近年来在国内市场也有 HPP 加工的果蔬汁、冷萃茶、液体沙拉和果粒浆等新产品相继出现，并获得了较高的消费者接受度[3]。然而，我国 HPP 的商业化应用仍以液态食品为主，在国外市场非液态 HPP 加工食品种类也比较局限，对食品体系的水分含量和均一性要求较高。这表明 HPP 技术在用于固态、半固态等非液态食品类别的加工方面还存在较大挑战，亟需明确其中存在的关键科学问题与技术瓶颈，以实现 HPP 技术进一步广泛的商业化应用。

近年来，国内外已涌现出一些针对固态与半固态食品的超高压适用性研究，然而研究主要侧重于探究单一、具体食品在超高压处理后的微生物、品质和营养等变化规律，缺少从食品物理特征和状态（比如水分含量影响等）的角度去分析和总结，尚未形成具有普遍解释力的共性结论，制约了该技术在多品类固态与半固态食品中的精准调控与应用拓展。因此，深入揭示食品物性状态与 HPP 处理效果之间的内在关联，成为当前推动该技术从实验研究走向产业化应用的关键课题。本综述旨在系统归纳 HPP 对固态与半固态食品微生物安全控制与质构调控方面的作用效果和影响规律，以期为 HPP 新产品的商业化开发与应用提供理论支撑。

1 超高压加工固态/半固态食品的种类和特征

HPP 用于固态和半固态食品的加工制造在部分发达国家已经有较成熟的应用案例，表 1 中列举了市场上代表性的相关产品调研信息。HPP 固态和半固态产品种类主要集中于肉类、海鲜、果蔬及其加工制品，生产地主要分布于欧洲、北美和日本的食品企业。近年来，国内 HPP 生产线数量快速增长，相关新产品开发业态蓬勃发展。目前已经有公司推出了 HPP 果粒浆和 HPP 液体沙拉等固液混合态 HPP 产品，这表明从液态产品出发，逐渐向固态和半固态食品等全部食品类别过渡是未来 HPP 技术应用的大势所趋。

表 1 国际代表性 HPP 固态和半固态产品

Table 1 Representative HPP solid-state and semi-solid-state products

名称	国家	公司	食品状态	贮藏方式
猪肉香肠	智利	Cialalimentos	固态	冷藏
萨拉米香肠	希腊	Creta Farms	固态	冷藏
鸭胸肉和鸭肉酱	西班牙	Martiko	固态	冷藏
牛油果片、牛油果酱	墨西哥	Cupanda	固态	冷藏
脱壳牡蛎、龙虾	法国	5DO	固态	冷冻
生腌猪肉	意大利	Rovagnati	固态	冷藏
冷冻蓝莓、芒果、草莓	秘鲁	Agro Empaques	固态	冷冻
辣椒酱和牛油果泥	西班牙	Avomix	半固态	冷藏
橄榄酱和鹰嘴豆泥	法国	ASPASIA	半固态	冷藏
香蒜酱	西班牙	Delafruit	半固态	冷藏

如表 1 所示，HPP 固态和半固态产品已有较多成功先例。例如，HPP 牛油果泥在欧美地区广受欢迎，Avomix、Cupanda 等公司的 HPP 牛油果产品已成为其主推商品。有研究表明，对果酱或果泥进行高压处理不但可以杀菌，还能够改变其流变特性，提升口感，因而获得更好的消费者接受度[4]。HPP 肉制品加工通过对香肠、火腿、培根等原料在真空包装后进行杀菌，减少了二次污染，取得了较好的应用效果[5−7]。此外，HPP 在龙虾和牡蛎脱壳和杀菌方面也表现出巨大潜力，在壳肉分离的同时可以最大化保持可食用部分品质和加工性能[8]。综合以上信息可见，适用于 HPP 的固态和半固态食品具有以下共性特征：a.含水量高，由于高压施加需要压力传递介质，含水量低的粉末状食品不适用[9]；b.组分均一性较高，组分复杂的固态食品中的化学成分可能提供压力保护作用，局部水分活度的变化以及空隙、气体等也可能导致压力传递的不均一性[9]；c.不会发生明显的外观品质变化，如 HPP 红肉颜色常常显著改变，对消费者接受度影响较大[10]。因此，其他多组分、配方复杂或混合态的食品类别尚未见有 HPP 技术的商业化生产应用。

2 超高压加工在固态/半固态食品安全控制方面的进展

超高压加工可以通过对各类微生物的灭活来实现食品安全的提升，其作用原理主要是极端压力场破坏细胞膜和关键功能蛋白（受体、酶、核糖体等），导致微生物无法正常生长繁殖[11]。然而，HPP 技术的灭活效果受到微生物种类、结构、状态和食品基质等多因素的影响[12]，在固态和半固态食品中 HPP 技术的微生物控制作用可能与液态食品中存在显著差别，下文总结了超高压对固态和半固态食品中微生物营养体、细菌芽孢、真菌孢子和病毒等微生物的杀灭效果和可能的影响因素。

2.1 微生物营养体

在固态和半固态食品的加工、储运过程中可能有致病菌和致腐微生物污染的安全风险，高品质的冷链产品也需要足够水平的减菌来保证其安全品质。营养体是大部分微生物存在的主要形式，HPP 对于固态和半固态食品中微生物营养体的杀灭效果弱于液态食品（表 2），需要更强烈的外在条件（如压力和保压时间）才能达到欧洲食品安全局危害专家组提出的 5~8 个对数单位安全食品生产标准（ESFA, 2022）[13]。

影响固态和半固态食品安全性的微生物主要包括导致原料致腐的微生物（如霉菌、酵母和需氧嗜温细菌等）以及在加工和贮藏过程中来自于设备、人员和空气的致病菌（如大肠杆菌、李斯特菌和沙门氏菌等）[26]。常用的 200~600 MPa 超高压条件对这些微生物营养体杀灭的具体效果取决于各类外源和内源

表 2　HPP 对固态和半固态食品微生物营养体的杀灭效果

Table 2　Bactericidal effect of HPP on vegetative cells in solid and semi-solid foods

非液态食品	食品状态	超高压条件	微生物指标	杀灭量(log CFU/g)
巴西莓果肉[14]	固态	400~600 MPa/5~15 min	果聚糖乳杆菌	5.0
低盐切片腊肉[15]	固态	200~600 MPa/5 min	菌落总数	2.0
冷冻鸡胸肉[16]	固态	100~600 MPa/1~9 min	沙门氏菌	5.0
烟熏鳟鱼片[17]	固态	200 MPa/15 min	李斯特菌	5.5
鳕鱼[18]	固态	500 MPa/8 min	需氧嗜温菌	1.3
鸡肉汉堡[19]	固态	400~600 MPa/8 min	总大肠菌群	1.7
			霉菌和酵母	1.3
大黄鱼[20]	固态	200~300 MPa/10 min	菌落总数	3.3
			假单胞菌属	3.1
			产硫化氢菌	2.8
			大肠菌群	3.0
			大肠杆菌	>6.0
苹果泥[21]	半固态	300~400 MPa/5 s~7 min	鼠伤寒沙门氏菌	
			李斯特菌	
蓝莓泥[22]	半固态	500 MPa/5 min	菌落总数	2.1
辣椒酱[23]	半固态	100~600 MPa/30~600 s	需氧嗜温菌	4.5
			酵母菌	4.0
			霉菌	3.8
苹果、草莓火龙果复合果泥[24]	半固态	400~500 MPa/8~10 min	总需氧细菌	3.4
			霉菌和酵母	3.3
马梅花蜜[25]	半固态	300~500 MPa/5 min	总嗜温细菌	6.3
			霉菌和酵母	2.5

因素[13]。外源因素主要包括施加的压力和保压时间。文献表明，HPP 对微生物营养体的灭活呈现为非线性的曲线，总体上随压力增大或保压时间的延长杀灭效果逐渐增加，但最后可能会呈现出拖尾现象。这可能是由于处理强度差异、微生物异质性抗性、亚致死状态、活的不可培养细胞（viable but non-cultivable, VBNC）状态和耐压营养体的出现[27]。研究表明，稳定期的微生物营养体对 HPP 抗性强于对数期[28]。例如，稳定期和对数期的大肠杆菌经过 200 MPa、8 min 的处理后，细胞结构都有所改变，但稳定期大肠杆菌的存活率达到了 70% 以上，这种特性与细胞膜的完整性和流动性有关，部分原因是替代因子 σ^s 的作用使细胞的抗压能力增强[29−30]。类似地，加工后微生物进入亚致死状态、VBNC 状态和耐压营养体可能会导致对杀菌效力的高估。亚致死状态和 VBNC 状态在 HPP 处理后可能会在冷藏期间复苏，严重影响食品安全性[24]。而大肠杆菌和李斯特菌等致病菌在压力诱导下会发生基因突变，产生耐压菌株，使得耐压上限大幅提升[31−32]。同时，菌株类型的不同也会导致 HPP 杀菌效果的差异。例如，17 种大肠杆菌菌株在 500 MPa 下处理 1 min，菌落数量的减少范围为 0.6~3.4 log CFU/mL，造成这种差异的原因在于铁硫簇组装蛋白和延胡索酸硝酸还原酶调节因子的表达会降低耐压性，而 σ 因子（RpoE）、脂蛋白（NlpI）、硫氧还蛋白（TrxA）、硫氧还蛋白还原酶（TrxB）、海藻糖合成蛋白（OtsA）和 DNA 结合蛋白（Dps）则会提升耐压性[31]。

食品基质是影响固态和半固态食品中营养体杀灭效果的关键内源性因素，其中水分含量、营养成分和 pH 对灭活效果的影响更为显著。水分差异的影响在超高压杀菌过程中，表现为水分活度较低的体系，其微生物灭活效率往往低于水分活度高的体系，现有研究结果表明，水分含量低于 40% 的食品不适用于 HPP 灭菌[13]。总体上液态食品的水分活度常在 0.98 以上，半固态食品在 0.8~0.9，固态食品则更低[33]。此外，固态和半固态食品中通常含有更多种类或更高密度的营养物质，如蛋白质、脂肪和碳水化合物等。这些营养成分可以通过增加钙离子浓度、形成脂肪晶体和增加溶质浓度等方式对微生物细胞膜形成保护，从而降低杀灭效果，图 1 描述了主要食品成分对微生物灭活的保护作用[34]。例如，对于相似温度条件下的斐济果泥（200~400 MPa/6 min）和豆芽汁（150~400 MPa/2 min），对于大肠杆菌的杀灭效果相差 5.2 个对数单位，在某些果汁中，改变工艺条件后杀灭效果甚至能达到 7 log CFU/mL 以上，而水分含量较低的固态和半固态食品大多不会超过 6 log CFU/g[35−36]。同时，pH 在 HPP 灭菌过程中也会起到重要影响。低 pH 能够与 HPP 形成栅栏效应，协同增强微生物营养体的杀灭效果。例如，在 HPP 和温热联合处理的不同 pH 苹果泥中，pH 为 3.5 的苹果泥抗菌效果明显优于 pH为 3.8 的苹果泥[21]。因此，低酸性食品中微生物的耐压性强于酸性食品，针对不同食品基质需要构建差异化 HPP 灭菌方法，如实行协同灭菌策略等。

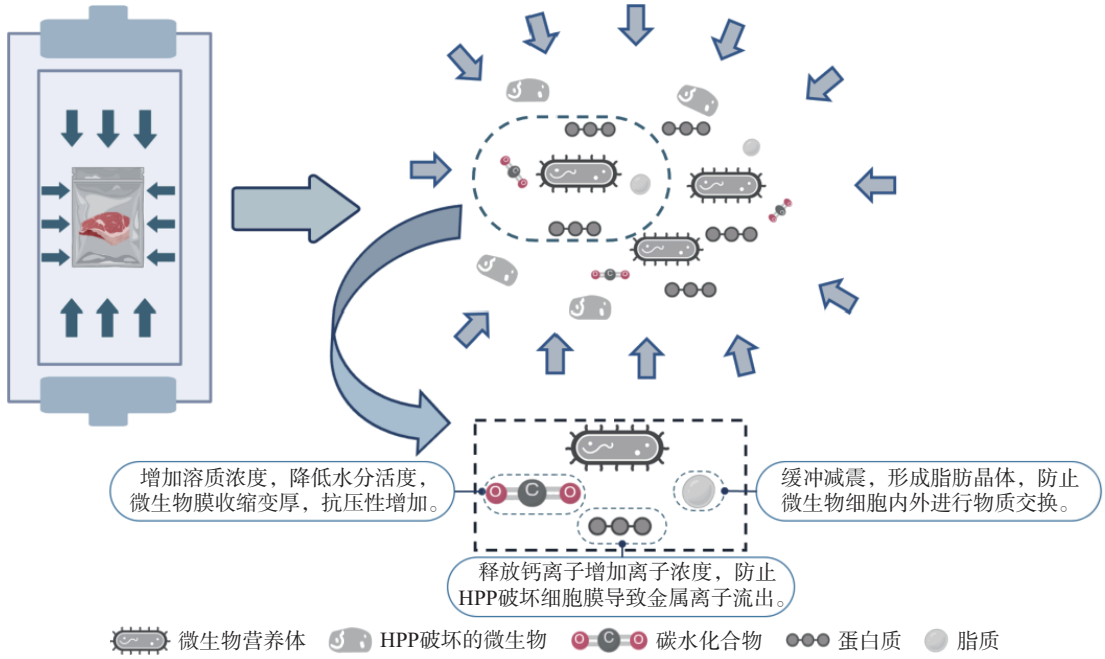


图 1 食品成分在微生物灭活过程中的保护作用

Fig.1 Protective role of food ingredients in the inactivation of microorganism

目前 HPP 技术与其他杀菌技术联用来提高微生物安全控制水平是研究的热点方向之一。研究者尝试使用 HPP 联合温度、pH、天然抗菌剂或其他非热技术等进行微生物营养体的灭活，发现相比于单独超高压处理，联合处理比单独使用 HPP 灭菌效果至少提高 1 个对数单位。例如，HPP 结合微热（50 ℃）处理苹果泥的大肠杆菌减少量比常温下增加 2 log CFU/g[21]；HPP 结合 Nisin 处理风干火腿后杀菌效果比单独使用 HPP 增加 1 log CFU/g[37]。因此，深入研究 HPP 协同手段和物理复合场加工，可能有效解决固态和半固态食品中耐压亚群、VBNC 状态和食品基质不同所带来的对微生物营养体的杀菌效果限制问题[24]。

2.2 细菌芽孢和真菌孢子

细菌芽孢和真菌孢子由于其特殊的结构导致其对 HPP 的抵抗力显著高于微生物营养体[34]。食品加工常见的细菌芽孢来源于蜡样芽孢杆菌、肉毒梭菌和产气荚膜梭菌等，若其在储存过程中萌发则会引发食源性疾病[38]。相比于细菌芽孢，真菌孢子对压力更敏感，导致食品腐败的真菌包括嗜旱真菌、耐热真菌等，其中毕赤酵母菌属、新萨托酵母属和塔拉酵母属的子囊孢子所表现出的耐压耐热特性，这些都对固态和半固态食品的加工安全控制带来更大挑战[39]。

单独 HPP 处理需要较高的压力才能将真菌孢子灭活，而对细菌芽孢几乎不产生灭活效果，但利用 HPP 对芽孢和孢子进行诱导萌发，再结合中高热、高压循环、降低水分活度、降低 pH 以及冷却等手段对固态和半固态食品中芽孢和孢子进行灭活的策略，在实际研究中被证实是有效的[40]。例如，在胡萝卜泥中，70 ℃ 结合 800 MPa 的压力处理 4 min，可以达到枯草芽孢杆菌芽孢减少 6 log CFU/g 的杀灭效果，而仅使用超高压，即便压力提升至 1000 MPa 也不能灭活肉毒梭菌或枯草芽孢杆菌芽孢。Palou 等[41] 采用 5 次 689 MPa，每次 1 s 的高压循环，结合降低水分活度对蓝莓果酱进行处理，发现白粉病菌的子囊孢子灭活近 4 log CFU/g，证实了萌发-灭活策略的可行性。

影响高压诱导萌发芽孢和孢子的外源因素主要是 pH、压力和温度，总体上，中性 pH 有利于高压下芽孢和孢子萌发[38]。例如研究发现，在不同 pH 缓冲液中，pH 为 7 的枯草芽孢杆菌萌发率最高[42]。此外，较高或较低的压力都会大幅降低萌发的效率。而最佳萌发范围是中高压（50~300 MPa，MHP）和极高压（400~600 MPa，VHP），MHP 会启动 GerA 型 GRs 萌发，而 VHP 则可能打开 SpoVA 通道释放 Ca-DPA 触发萌发[43]。压力和温度的变化还会改变基质中 pKa 和解离平衡，进一步影响高压下芽孢和孢子的萌发效率。而主要内源影响因素是食品基质。有研究表明，在营养丰富的固态和半固态食品中形成的芽孢比营养贫乏的培养基中芽孢萌发速度快 4 倍[44]。

萌发-灭活的策略体现了 HPP 在灭活细菌芽孢和真菌孢子领域的潜力，未来需要进一步克服深休眠芽孢的问题，并探索不同芽孢属萌发机制差异，以期更有针对性地提高芽孢和孢子的灭活效果。

2.3 病毒

典型的食源性病毒包括诺如病毒（HuNoV）、轮状病毒（HRV）以及甲型（HAV）和戊型（HEV）肝炎病毒等。病毒在加工、运输和储存过程中不会在食品和水中大量繁殖，但由于少量病毒即可致病，因此通过受污染的食物或水感染病毒的风险很高[45−46]。大部分食源性病毒属于非包膜病毒，因其缺乏脂质包膜外壳，相较于微生物营养体对超高压具有更强的

抗性，其中最具有代表性的是 HuNoV 和 HAV[47]。HPP 通过破坏无包膜病毒中衣壳的结构和功能，导致病毒感染能力的丧失，从而实现病毒的灭活。但 HPP 不会破坏共价键，因此不能对病毒的遗传物质 RNA 造成损坏[46]。

研究表明，HPP 压力和时间的增加可以促进病毒失活，且 400 MPa 以下的压力无法完全灭活病毒[48−49]。值得注意的是，增加 HPP 压力水平比延长保压时间更有利于病毒失活。例如 Chen 等[50] 研究发现在常温下 200 MPa 处理 20 min 会导致猫杯状病毒（FCV）减少 2.8 log PFU/mL，而将保压时间延长到 72 min 也只能额外获得 0.9 log PFU/mL 的减少。类似地，在 HuNoV 的灭活过程中也得出了同样的结论[51]。另一方面，包膜病毒较非包膜病毒耐压性低，这是由于在 HPP 下，包膜中的脂质和蛋白质不稳定，容易发生三级和四级结构的丢失[52]。水分活度和食品基质也会导致食源性病毒灭活的差异，病毒在高水分环境下的存活率比干燥环境更高[53]。与微生物营养体灭活类似，固态和半固态食品中所含的丰富营养成分也会成为病毒灭活的障碍。Murchie 等[54] 报告称与液态的海水和培养基相比，贻贝和牡蛎在超高压处理过程中对 FCV和牛肠道病毒（HAV 的替代物）表现出更高的抵抗力。特别地，盐对病毒有明显保护作用，例如，在添加 0、1%、3% 或 6% 氯化钠的缓冲液中，在 50 ℃ 下以 400 MPa 的高压处理 1 min，HAV 分别下降 4 log CFU/mL、4.1 log CFU/mL、1.3 log CFU/mL和 0.4 log CFU/mL。而 pH 对灭活效果的影响存在争议。Kingsley 等[55] 研究发现增加酸性有助于超高压对 HAV 的灭活。但 Lou 等[56] 在不同 pH 的 HPP 复合果泥的实验中则发现中性 pH 中 HPP 对果泥中 HAV 的杀灭效果比酸性 pH 高 2 个对数。

3　超高压加工在固态/半固态食品质构调控方面的进展

质构是决定食品物理形态的重要因素，HPP 处理食品的质构特性变化可能对其产品品质和感官属性有较大影响，因此值得重点关注。表 3 为超高压对代表性固态及半固态食品质构变化的调控情况，由于植物源食品和动物源食品的细胞结构和组成成分有较大差异，下文主要从这两类食品来源的固态和半固态食品进行总结探讨。

3.1　植物源食品

植物源食品中包括固态的各类生鲜果蔬、腌渍产品以及半固态的果蔬泥、酱料等。对于固态植物源食品，其质构特性取决于植物细胞的形状大小、细胞壁的厚度和组成、相邻细胞间的黏附性以及细胞膨压[65]。超高压处理会通过酶促和非酶促反应对植物细胞产生显著影响，包括细胞形态改变、膜结构破坏和细胞壁组成变化等，具体作用效果受植物种类，压力大小与时间的影响。

超高压处理后植物细胞壁折叠、屈曲和细胞间接触减少，细胞内的物质如离子、酶和底物，可能被释放并相互作用，发生生化反应[66]。一方面 HPP 压力可以增强果胶甲基酯酶（PME）的作用，将果胶去甲氧基化，而多聚半乳糖醛酸酶（PG）可以解聚已被 PME 去甲基化的果胶，使得果蔬硬度下降；另一方面，PME 产生的低甲氧基果胶能够与二价离子形成凝胶网络，由于超高压降低多聚半乳糖醛酸酶（PG，解聚已被 PME 去甲基化的果胶）活性[67−68]，导致硬度升高。同时，细胞膜也可能直接在压力作用下变形或破裂，细胞成分泄漏溶解，膨压损失[69]；由于各向同性机械应力，物品体积随着压力的增加而减小。由此可见，不同种类的果蔬由于其酶和初始质构特性的不同，在 HPP 条件下的质构调控规律差异较大。Préstamo 等[70] 使用 400 MPa 处理 30 min 花椰菜和菠菜，发现菠菜叶片的弹性模数（测量细胞的硬度，数值高则表示非弹性细胞多）较低，花椰菜弹性细胞少，高压对菠菜叶片结构的影响显著高于花椰菜，超高压后细胞塌陷，细胞间隙被液体填充。卢靖辉等[63] 使用 100~600 MPa 处理 10 min 新鲜淮山片，发现 HHP 会增加干燥后淮山片的硬度和脆度，推测硬度的增加源于细胞结构及孔隙率改变导致的组织收缩和紧密连接，孔隙减小带来的断裂距离缩短可使断裂所做功减少，带来脆度增加。相比而言，浆果类食品由于其易损伤的特点，及其在超高压下使其硬度下降，比如草莓、蓝莓与蔓越莓等，因此其超高压样品多为加工后的果酱。

综上可知，通过调控植物源食品中的酶活性是

表 3　超高压加工对固态及半固态食品质构的影响

Table 3　Influence of high pressure processing on the texture of non-liquid foods

名称	食品状态	HPP参数	质构变化
罗非鱼鱼糜[57]	固体	100~400 MPa/15 min	随压力增加，弹力和咀嚼性显著上升
金线鱼肉肠[58]	固体	100 MPa/5 min	硬度、弹性、胶着性和咀嚼性提高
大黄鱼[59]	固体	200~300 MPa/10 min	压力升高，鱼肉的硬度、弹性、咀嚼性逐渐增大
小根蒜泡菜[60]	固体	200~400 MPa/10 min	硬度轻微下降，且随压力增大下降幅度增大
核桃酱[61]	半固体	500 MPa/4 min	硬度、粘附性、咀嚼性提高
柑橘酱[62]	半固体	500 MPa/10 min	黏弹性增加，硬度、黏性、胶着度以及咀嚼度均显著下降
淮山片[63]	固体	100~600 MPa/10 min	干燥后样品硬度与脆度均显著增加
牦牛肉[64]	固体	100~500 MPa/10 min	剪切力显著降低

HPP 改变质构的主要方式之一, 而酶活性的变化受超高压压力、时间以及食品物性的显著影响。例如, 番茄 PME 是压力最稳定的酶之一, 在高达 800 MPa 处理 5 min 仍抗失活, 而橙汁在 600 MPa 下处理 1 min, PME 失活率为 92%; 番茄丁 600 MPa 处理 1 min 后番茄 PG 失活 60%[67]。不同酶活的变化差异导致植物源食品质构的表观变化具备一定特征[69]。例如, PG 活性在压力超过 300 MPa 时急剧下降, 在 500 MPa 及以上压力下几乎降至为零[71]; 增加压力会增强胡萝卜 PME 活性, 但一旦压力达到 300 MPa 及以上, 活性便开始下降[72]。但是酶活变化对植物源食品质构的影响还不明确[69]。另一方面, HPP 的压力可能改变膜渗透性, 使植物组织水分重排, 细胞呈现“浸湿”的外观[69], 导致 HPP 处理的果蔬呈现出一种柔韧且橡胶状质地[73]。细胞结构发生变化也是 HPP 改变质构的主要方式之一, 保压时间可能在细胞壁破裂中起重要作用。Denoya 等[73] 使用 400~600 MPa 处理 1~9 min 桃子, 发现 HPP 加工时间越长, 硬度和嚼劲降低幅度越大, 质地损失越明显; 5 min 以上的压力处理的样品中出现了细胞壁的破坏。固态植物源食品可能存在一个临界压力阈值, 超过此压力阈值后超高压对植物源食品硬度影响变缓[69]。Trejo 等[72] 使用 100~300 MPa 处理 2~30 min 胡萝卜, 发现 2 min 时, 100、200 和 300 MPa 处理组的硬度分别降低 5%、25% 和 50%, 但超过 300 MPa 时, 未发现进一步显著地硬度降低, 推测可能是预计植物存在“最大压力阈值”, 超过某个压力阈值可能不会进一步压缩或被破坏。

半固态植物源食品的代表性产品包括鹰嘴豆泥, 草莓果酱, 鳄梨酱等。一方面, HPP 可通过调控酶活间接改变决定半固态植物源食品质构的大分子, 例如, 高甲氧基果胶(HMP)需要低 pH 环境和蔗糖等共溶剂才能形成凝胶, HPP 可以激活 PME 活性, 将 HMP 转化成低甲氧基果胶(LMP), LMP 只需要与 Ca^{2+}即可结合形成稳定结构[74−75], 这可以减少果酱中糖的使用量, 降低对糖的依赖。Yun 等[76] 使用 600 MPa 处理 5 min 高糖果酱与低糖果酱, 发现 HPP 使低糖果酱的硬度显著提升了 98%, 但对高糖果酱的硬度未产生明显影响。果胶浓度也会影响果酱类产品的质构特性, Dervisi 等[77] 使用 400 MPa 的压力处理了草莓果酱, 随着果胶浓度的增加, 其储能模量的值也随之增加, 表现出更强的固体特性, 在质构上即为表现出更好的黏弹性[62]。另一方面, HPP 可能直接改变半固态植物源食品中的颗粒和大分子结构。Xu 等[78] 比较了香蕉泥分别经高压加工(500 MPa, 10 min)与热力巴氏杀菌(90 ℃, 2 min)处理后品质特性变化, 发现 HPP 能有效维持香蕉泥的粒径分布和黏度, 热力巴氏杀菌处理则会使小粒径颗粒数量增加, 黏度升高, 可能是由于高温下香蕉淀粉糊化, 热处理香蕉泥表现出更高的黏度。Lin 等[79] 在 100~500 MPa 下处理的菜豆粉糊, 发现样品黏弹性整体增强, 且压力大小影响显著, 推测在低压处理期间施加在淀粉颗粒上的压缩力可能优先于颗粒溶胀, 保压时间不足以引起分散体系网络强度的显著变化。随着压力增加更多水渗透到淀粉颗粒中, 促进溶胀和糊化, 使较高压力即使在短保压时间内也能形成更强的由部分糊化淀粉和/或变性蛋白质的交联排列主导的网络。

3.2 动物源食品

动物源固态与半固态食品的质构特性很大程度上取决于蛋白质的变化。肉类蛋白通常分为三大类: 肌原纤维蛋白(占肌肉蛋白的 55%~60%, 包括肌球蛋白、肌动蛋白等)、肉浆蛋白(可溶于水, 约占肌肉蛋白的 25%~30%, 包括肌红蛋白和蛋白酶等)和结缔组织蛋白(主要是胶原蛋白和弹性蛋白)[80]。HPP 处理条件可能改变肉类蛋白质的构象, 诱导酶活变化、蛋白质变性、聚集或凝胶化, 从而改变肉的嫩度、弹性和咀嚼性。

动物源食品的种类会影响 HPP 对食品质构的调控效果。对于禽畜肉类, HPP 对质构的改变主要是嫩度的提高, 主要作用机制是酶促反应与机械挤压。研究表明超过 200 MPa 的压力会导致溶酶体破裂[81], 释放组织蛋白酶[82]; 同时, 高压还可以促进肌质网中 Ca^{2+}的释放, 激活钙蛋白酶系统[64], 两者都可以水解肌原纤维蛋白[83], 和 HPP 一起使肌原纤维发生断裂缩短[84]。宋晓玥等[64] 使用在 100~500 MPa 处理 10 min 牦牛肉, 发现超高压处理能显著提高牦牛肉的嫩度(P<0.05), 随着压力的升高, 预调理牦牛肉的剪切力从 28.16 N 下降至 11.22 N, 并在 300 MPa 时达到最低点。与肌原纤维蛋白相比, 结缔组织在 HPP 过程中的变化较小。Simonin 等[82] 发现在 400 MPa 处理的禽肉中, 胶原蛋白在任何温度下的压力处理过程中都保持不变, 因此对于结缔组织含量高的肉类 HPP 的嫩化效果可能不显著[82]。对于水产品, de Oliveira 等[85] 发现鱼类的肌球蛋白在 100~200 MPa 之间变性, 肌动蛋白在 200 MPa 之间变性; 相比较而言, 相对稳定的猪肉肌球蛋白和肌动蛋白在 400 MPa 后才出现结构变化和溶解度显著下降[86], 这种特性使鱼类制品相较其他肉类而言对 HPP 反应更敏感, 较低压力就会对鱼类蛋白质结构产生影响。除了组织蛋白酶, HPP 还可能通过肌原纤维蛋白重排导致的凝胶化来提高其剪切力、硬度等。在加压作用下, 肌球蛋白展开, 暴露出活性位点或疏水区域, 通过疏水相互作用和二硫键迅速聚集结合形成凝胶[87]。潘卓官等[58] 发现 100 MPa 处理 5 min 的鱼肠煮熟后硬度、弹性、胶着性和咀嚼性显著高于未超高压处理组。Ramirez-Suarez 等[88] 发现超高压处理后的长鳍金枪鱼鱼肉, 硬度明显提高, 推测是由于超高压处理促进了分子间二硫键的形成, 诱导肌球蛋白聚集变性等引起的。

由此可见, HPP 通过压力来调控动物源半固态

或固态食品质构的分子机制是蛋白质空间结构及蛋白酶活性的变化。在超高压加工压力范围内（<1000 MPa）分子共价键基本不受影响[85]，因此蛋白质的一级结构得以保留；HPP 破坏蛋白质分子间氢键结构，从而削弱分子间相互作用，氢键网络重排，二级结构变化；疏水相互作用对压力敏感，压力导致非极性氨基酸残基被迫暴露并与水接触以及多肽链解离，三、四级结构改变[89]，这些共同导致了蛋白质结构的变化。通常肌原纤维蛋白第四级结构在中等压力（100~200 MPa）下解离，三级结构在 200 MPa 以上压力水平受影响，二级结构在更高压力（300~700 MPa）下发生变化[89]。因此，质构指标呈现出低压力嫩化，高压力蛋白质聚集硬化的现象，显著被压力水平调控。

此外，HPP 处理肉制品生熟度也对质构调控产生影响。对于生肉，HPP 按照以上所述破坏溶酶体，释放组织蛋白酶以及激活钙蛋白酶系统，对肉制品的剪切力造成影响。但对于熟肉，加热易发生肌原纤维蛋白的变性和胶原蛋白的收缩[90]，使肉中蛋白质形成较为稳定的物理结构，因此熟肉制品的质构特性在施加高压后不会发生明显变化[91]。Mor-Mur 等[92] 使用 500 MPa 处理 5/15 min 香肠，发现其与未处理香肠的弹性、剪切力变化不大，唐静怡等[91] 使用 200 和 300 MPa 处理白切鸡，发现 HPP 前后白切鸡剪切力略微波动，但无显著性差异。动物屠宰后因能量成分（ATP）消耗但不再合成，肌肉会先僵直，然后内源性蛋白水解肌原纤维诱导肉质变软[93]。Sun 等[94] 发现 HPP 对僵直前牛肉使用可以软化肉类，但是对僵直之后的肉类效果有限。Kaur 等[83] 发现，对牛僵直前肌肉进行 175 MPa 的高压处理可显著提高嫩度，但同时降低钙蛋白酶的活性，这也表明高压处理对僵直前肉的主要影响可能是物理性的，而非酶促性的。

4　结论与展望

超高压作为最先成功在食品工业生产中应用的非热加工技术，其技术拓展和研究前沿始终是关注热点。本文综述了目前研究对生鲜果蔬、肉类、水产品、预制菜、果蔬泥、酱料等复杂多组分、低酸性、低水分活度的各类固态或半固态食品进行超高压加工杀菌保鲜的应用效果，也对食品组分、酶活性及水分含量等对超高压杀菌或质构调控的共性影响机制展开了分析和归纳。基于目前的研究进展，提出了通过协同复合提升 HPP 技术食品微生物安全和品质提升的可行途径，以及区分动、植物源食品质构变化规律来针对性调控终产品物理感官特性的适用性提升方案。

未来研究需要进一步探明更多类型固态或半固态食品体系在超高压不同加工参数和杀菌条件下的响应规律，明确水分活度、大分子组分、空隙率等内在因素在超高压条件下的变化机制，为超高压加工技术的应用拓展提供理论支撑。此外，应筛选优化超高压与其他技术复合的联用技术，加强其在不同食品体系中对微生物的杀灭效果，利用协同效应减少单一处理强度，在平衡对质构、颜色、风味等负面影响的前提下突破对难杀灭芽孢和 VBNC 细胞的抑制效果。下一步研究还应该强化跨学科交叉融合，通过装备创制突破更高压力范围的技术瓶颈和创新压力施加方式，针对性地开发出精准、智能的超高压加工新技术，为超高压技术在各类食品中的全面应用奠定基础。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] LI Shuyi, ZHANG Rui, LEI Dan, et al. Impact of ultrasound, microwaves and high-pressure processing on food components and their interactions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 1−15.

[2] GHASAMKHANI N, MORSHEDI A, POURSHARIF Z, et al. Microbiological effects of high pressure processing on food[J]. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 2014(4): 133−145.

[3] 李立, 孙智慧, 苗卿华, 等. 超高压加工技术在食品工业中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 337−342. [LI Li, SUN Zhihui, MIAO Qinghua, et al. New research progress of high pressure processing technology in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 337−342.]

[4] 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.

[5] ORTIZ A, LEÓN L, SÁNCHEZ M, et al. Effect of storage temperature and high-pressure processing on the preservation of sliced Duroc vacuum-packed dry-cured ham[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 40: 101199.

[6] ZHU Yingchun, YAN Yuwen, YU Zhihui, et al. Effects of high pressure processing on microbial, textural and sensory properties of low-salt emulsified beef sausage[J]. Food Control, 2022, 133: 108596.

[7] CETIN-KARACA H, CRUZEN S M, EBBING D. Survival of *Listeria monocytogenes* on cooked and high pressure treated bacon[J]. Applied Food Research, 2023, 3(1): 100259.

[8] 陈启航, 文丽华, 陈小娥, 等. 超高压辅助脱壳对虾夷扇贝肌原纤维蛋白生化特性及结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 102−107. [CHEN Qihang, WEN Lihua, CHEN Xiao'e, et al. Effect of ultra-high pressure assisted shelling on biochemical characteristics and structure of myofibrillar protein in *Patinopecten yessoensis* [J]. Food Science, 2021, 42(11): 102−107.]

[9] HUANG H W, WU S J, LU J K, et al. Current status and future trends of high-pressure processing in food industry[J]. Food Control, 2017, 72: 1−8.

[10] REESMAN C, SULLIVAN G, DANAO M G, et al. Effects of high-pressure processing on cooked color and eating qualities of dark-cutting beef[J]. Applied Food Research, 2023, 3(1): 100260.

[11] 姜志东, 张君怡, 马嘉欣, 等. 超高压杀菌效果及机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 145−154. [JIANG Zhidong, ZHANG Junyi, MA Jiaxin, et al. Research progress on the microbial inactivation effect and mechanism of high hydrostatic

pressure[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 145−154.]
[12] 孟秋宇, 吕风至, 杨东, 等. 超高压技术对牛乳品质影响的研究进展: 从微生物安全到营养功能提升[J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 514−524. [MENG Qiuyu, LÜ Fengzhi, YANG Dong, et al. Advances in the effects of high-pressure processing on milk quality: From microbial safety to nutritional enhancement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 514−524.]
[13] KOUTSOUMANIS K, ALVAREZ-ORDÓÑEZ A, BOLTON D, et al. The efficacy and safety of high-pressure processing of food[J]. EFSA Journal, 2022, 20(3): e07128.
[14] de JESUS A L T, CRISTIANINI M, dos SANTOS N M, et al. Effects of high hydrostatic pressure on the microbial inactivation and extraction of bioactive compounds from açaí (*Euterpe oleracea* Martius) pulp[J]. Food Research International, 2020, 130: 108856.
[15] 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 Meng, RAN Peiling, HUANG Yechuan, 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.]
[16] CAP M, PAREDES P F, FERNÁNDEZ D, et al. Effect of high hydrostatic pressure on *Salmonella* spp inactivation and meat-quality of frozen chicken breast[J]. LWT, 2020, 118: 108873.
[17] EKONOMOU S I, BULUT S, KARATZAS K A G, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* in raw and hot smoked trout fillets by high hydrostatic pressure processing combined with liquid smoke and freezing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 64: 102427.
[18] PEREZ-WON M, LEMUS-MONDACA R, HERRERA-LAVADOS C, et al. Combined treatments of high hydrostatic pressure and CO_2 in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*): Effects on enzyme inactivation, physicochemical properties, and microbial shelf life[J]. Foods, 2020, 9(3): 273.
[19] TIMÓN M L, PALACIOS I, LÓPEZ-PARRA M, et al. Effect of single and two-cycles of high hydrostatic pressure treatment on the safety and quality of chicken Burgers[J]. Foods, 2023, 12(20): 3820.
[20] CUI Yan, ZHU Lin, SHANG Haitao, et al. Effects of combined *ε*-polylysine and high hydrostatic pressure treatment on microbial qualities, physicochemical properties, taste, and volatile flavor profile of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(4): 3610−3627.
[21] LEE E J, PARK S H. Antimicrobial effect of combination treatment with high pressure processing and mild heat against foodborne pathogens in apple puree[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(3): 736−746.
[22] 马新雨, 毕秀芳, 任书凝, 等. 蓝莓复合果泥超高压和热杀菌的比较分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 206−214. [MA Xinyu, BI Xiufang, REN Shuning, et al. Comparative analysis of ultra-high pressure and thermal sterilization of a blueberry-strawberry-apple puree[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(4): 206−214.]
[23] WOLDEMARIAM H W, EMIRE S A, TESHOME P G, et al. Microbial inactivation and quality impact assessment of red pepper paste treated by high pressure processing[J]. Heliyon, 2022, 8(12): e12441.
[24] YANG Xuan, DING Haoyue, LUO Sijia, et al. Comparison of high hydrostatic pressure and thermal processing on microorganisms and quality of anthocyanin-rich fruit puree[J]. Frontiers in Food Science and Technology, 2022, 2: 911283.
[25] SOTO-CABALLERO M C, CANO-MONGE E E, CANO-MONGE S M, et al. Effect of high hydrostatic pressures on microorganisms, total phenolic content and enzyme activity of mamey (*Pouteria sapota*) nectar[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(7): 2599−2604.
[26] HUANG H W, LUNG H M, YANG B B, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing[J]. Food Control, 2014, 40: 250−259.
[27] SERMENT-MORENOV,BARBOSA-CÁNOVASG,TORRES J A, et al. High-pressure processing: Kinetic models for microbial and enzyme inactivation[J]. Food Engineering Reviews, 2014, 6(3): 56−88.
[28] 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.
[29] HUISMAN G W, SIEGELE D A, ZAMBRANO M M, et al. Morphological and physiological changes during stationary phase[J]. Microbiological Quality Assurance, 2018: 106−127.
[30] MAÑAS P, MACKEY B M. Morphological and physiological changes induced by high hydrostatic pressure in exponential- and stationary-phase cells of *Escherichia coli*: Relationship with cell death[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(3): 1545−1554.
[31] MALONE A S, CHUNG Y K, YOUSEF A E. Genes of *Escherichia coli* O157: H7 that are involved in high-pressure resistance[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(4): 2661−2671.
[32] DURU I C, BUCUR F I, ANDREEVSKAYA M, et al. High-pressure processing-induced transcriptome response during recovery of *Listeria monocytogenes*[J]. BMC Genomics, 2021, 22: 117.
[33] MALTINI E, TORREGGIANI D, VENIR E, et al. Water activity and the preservation of plant foods[J]. Food Chemistry, 2003, 82(1): 79−86.
[34] SEHRAWAT R, KAUR B P, NEMA P K, et al. Microbial inactivation by high pressure processing: Principle, mechanism and factors responsible[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(1): 19−35.
[35] MUÑOZ M, de ANCOS B, SÁNCHEZ-MORENO C, et al. Evaluation of chemical and physical (high-pressure and temperature) treatments to improve the safety of minimally processed mung bean sprouts during refrigerated storage[J]. Journal of Food Protection, 2006, 69(10): 2395−2402.
[36] DUONG T, BALABAN M, PERERA C, et al. Microbial and sensory effects of combined high hydrostatic pressure and dense phase carbon dioxide process on *Feijoa* puree[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(11): 13083.
[37] de ALBA M, BRAVO D, MEDINA M. Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 in dry-cured ham by high-pressure treatments combined with biopreservatives[J]. Food Control, 2013, 31(2): 508−513.
[38] DELBRÜCK A I, ZHANG Y F, HEYDENREICH R, et al. *Bacillus*spore germination at moderate high pressure: A review on underlying mechanisms, influencing factors, and its comparison with nutrient germination[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 4159−4181.
[39] PINTO C A, MOREIRA S A, FIDALGO L G, et al. Effects

of high-pressure processing on fungi spores: Factors affecting spore germination and inactivation and impact on ultrastructure[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(2): 553−573.
[40] BLACK E P, SETLOW P, HOCKING A D, et al. Response of sopres to high-pressure processing[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2007, 6(4): 103−119.
[41] PALOU E, LOPEZ-MALO A, BARBOSA-CANOVAS G V, et al. Effect of oscillatory high hydrostatic pressure treatments on *Byssochlamys nivea* ascospores suspended in fruit juice concentrates[J]. Letters in Applied Microbiology, 1998, 27(6): 375−378.
[42] WUYTACK E Y, MICHIELS C W. A study on the effects of high pressure and heat on *Bacillus subtilis* spores at low pH[J]. International Journal of Food Microbiology, 2001, 64(3): 333−341.
[43] LYU Fengzhi, ZHANG Tianyu, GUI Meng, et al. The underlying mechanism of bacterial spore germination: An update review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 2728−2746.
[44] DOONA C J, GHOSH S, FEEHERRY F F, et al. High pressure germination of *Bacillus subtilis* spores with alterations in levels and types of germination proteins[J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 117(3): 711−720.
[45] AGANOVIC K, HERTEL C, VOGEL R F, et al. Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 3225−3266.
[46] LOU F F, NEETOO H, CHEN H Q, et al. High hydrostatic pressure processing: A promising nonthermal technology to inactivate viruses in high-risk foods[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2015, 6: 389−409.
[47] KISHIDA T, CUI F D, OHGITANI E, et al. High pressure treatment under subfreezing temperature results in drastic inactivation of enveloped and non-enveloped viruses[J]. Biotechnology Letters, 2013, 35(8): 1297−1301.
[48] JOHNE R, WOLFF A, GADICHERLA A K, et al. Stability of hepatitis E virus at high hydrostatic pressure processing[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 339: 109013.
[49] KULAWIK P, RATHOD N B, OZOGUL Y, et al. Recent developments in the use of cold plasma, high hydrostatic pressure, and pulsed electric fields on microorganisms and viruses in seafood[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(29): 9716−9730.
[50] CHEN H Q, HOOVER D G, KINGSLEY D H. Temperature and treatment time influence high hydrostatic pressure inactivation of feline calicivirus, a norovirus surrogate[J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(11): 2389−2394.
[51] LOU F F, HUANG P W, NEETOO H, et al. High-pressure inactivation of human norovirus virus-like particles provides evidence that the capsid of human norovirus is highly pressure resistant[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(15): 5320−5327.
[52] GOVARIS A, PEXARA A. Inactivation of foodborne viruses by high-pressure processing (HPP)[J]. Foods, 2021, 10(2): 215.
[53] RZEŻUTKA A, COOK N. Survival of human enteric viruses in the environment and food[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2004, 28(4): 441−453.
[54] MURCHIE L W, KELLY A L, WILEY M, et al. Inactivation of a calicivirus and enterovirus in shellfish by high pressure[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2007, 8(2): 213−217.
[55] KINGSLEY D H, CHEN H Q. Influence of pH, salt, and temperature on pressure inactivation of hepatitis A virus[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 130(1): 61−64.
[56] LOU F F, NEETOO H, CHEN H Q, et al. Inactivation of a human norovirus surrogate by high-pressure processing: Effectiveness, mechanism, and potential application in the fresh produce industry[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(5): 1862−1871.
[57] LU Wangwei, QIN Yuyue, RUAN Zheng. Effects of high hydrostatic pressure on color, texture, microstructure, and proteins of the tilapia (*Orechromis niloticus*) surimi gels[J]. Journal of Texture Studies, 2021, 52(2): 177−186.
[58] 潘卓官, 吴志钦, 周斯南, 等. 不同处理方式对金线鱼肉肠冷藏期间品质特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 172−181. [PAN Zhuoguan, WU Zhiqin, ZHOU Sinan, et al. Effects of different treatments on the quality characteristics of *Nemipterus virgatus* sausages during refrigerated storage[J]. Food Science, 2024, 45(19): 172−181.]
[59] 崔燕, 刘韩欣, 朱麟, 等. 超高压杀菌对大黄鱼理化性质及滋味、风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 44−55. [CUI Yan, LIU Hanxin, ZHU Lin, et al. Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the physicochemical properties, taste, and flavor of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 44−55.]
[60] 高煜, 王洁婷, 王颖地, 等. 超高压处理对小根蒜泡菜胀袋及品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 219−225. [GAO Yu, WANG Jieting, WANG Yingdi, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on bag swelling and quality of *Allium macrostemon* bunge pickles[J]. Food Science, 2025, 46(6): 219−225.]
[61] 牛逍瞳, 马燕, 张健, 等. 超高压杀菌对低脂核桃酱品质的影响及其货架期预测[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 408−421. [NIU Xiaotong, MA Yan, ZHANG Jian, et al. Effect of ultra-high pressure sterilization on the quality of low-fat walnut sauce and its shelf life prediction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 408−421.]
[62] 吴思宇, 徐阳, 熊思慧, 等. 超高压和热处理对低糖柑橘酱品质及流变特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 89−95. [WU Siyu, XU Yang, XIONG Sihui, et al. Effects of high hydrostatic pressure versus heat treatment on the quality and rheological properties of low-sugar *Citrus* jam[J]. Food Science, 2023, 44(7): 89−95.]
[63] 卢靖辉, 余元善, 李璐, 等. 超高压预处理调控淮山片干燥特性、质构品质及果胶组分含量研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 126−133. [LU Jinghui, YU Yuanshan, LI Lu, et al. High hydrostatic pressure pretreatments regulating drying characteristics, texture quality, and pectin fractions content of yam slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 126−133.]
[64] 宋晓玥, 彭鹰翘, 廖秋红, 等. 超高压处理对预调理牦牛肉嫩度及贮藏期的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 410−418. [SONG Xiaoyue, PENG Yingqiao, LIAO Qiuhong, et al. Effects of high-pressure processing on the tenderness and shelf life of preconditioned yak meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 410−418.]
[65] MERCADO J A, MATAS A J, POSÉ S. Encyclopedia of Food Chemistry[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019: 1-7.
[66] PANDRANGI S, BALASUBRAMANIAM V M. Emerging Technologies for Food Processing[M]. Amsterdam: Elsevier, 2005: 33-45.

[67] HOUŠKA M L, SILVA F V M, EVELYN, et al. High pressure processing applications in plant foods[J]. Foods, 2022, 11(2): 223.
[68] OEY I, LILLE M, van LOEY A, et al. Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit- and vegetable-based food products: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(6): 320−328.
[69] HEANEY D, PADILLA-ZAKOUR O I. Microstructural and enzymatic contributions to texture in high pressure processed fruits and vegetables[J]. Foods, 2025, 14(18): 3267.
[70] PRÉSTAMO G, ARROYO G. High hydrostatic pressure effects on vegetable structure[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(5): 878−881.
[71] HERNÁNDEZ-CARRIÓN M, HERNANDO I, QUILES A. High hydrostatic pressure treatment as an alternative to pasteurization to maintain bioactive compound content and texture in red sweet pepper[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 76−85.
[72] TREJO A X I, HENDRICKX M, VERLINDEN B E, et al. Understanding texture changes of high pressure processed fresh carrots: A microstructural and biochemical approach[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 873−884.
[73] DENOYA G I, POLENTA G A, APÓSTOLO N M, et al. Optimization of high hydrostatic pressure processing for the preservation of minimally processed peach pieces[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 84−93.
[74] HUANG Shuixian, ZHANG Yanbing, CHEN Qin, et al. Pectin based gels and their advanced application in food: From hydrogel to emulsion gel[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110841.
[75] JAVANMARD M, CHIN N L, MIRHOSSEINI S H, et al. Characteristics of gelling agent substituted fruit jam: Studies on the textural, optical, physicochemical and sensory properties[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2012, 47(9): 1808−1818.
[76] YUN Yurou, LI Jian, PAN Fei, et al. A novel strategy for producing low-sugar pomegranate jam with better anthocyanin stability: Combination of high-pressure processing and low methoxyl & amidated pectin[J]. LWT, 2023, 179: 114625.
[77] DERVISI P, LAMB J, ZABETAKIS I. High pressure processing in jam manufacture: Effects on textural and colour properties[J]. Food Chemistry, 2001, 73(1): 85−91.
[78] XU Zhenzhen, WANG Yongtao, REN Pengyan, et al. Quality of banana puree during storage: A comparison of high pressure processing and thermal pasteurization methods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(3): 407−420.
[79] LIN T T, FERNÁNDEZ-FRAGUAS C. Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours[J]. LWT, 2020, 127: 109325.
[80] LI H H, LI C H, SHOAIB M, et al. Advances in non-thermal processing of meat and monitoring meat protein gels through vibrational spectroscopy[J]. Foods, 2025, 14(11): 1929.
[81] 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.
[82] SIMONIN H, DURANTON F, de LAMBALLERIE M. New insights into the high-pressure processing of meat and meat products[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2012, 11(3): 285−306.
[83] KAUR L, HUI S X, MORTON J D, et al. Endogenous proteolytic systems and meat tenderness: Influence of Post-mortem storage and processing[J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(4): 589−607.
[84] de AGUIAR B Y A, do ROSARIO D K A, CONTE-JUNIOR C A. Principles, application, and gaps of high-intensity ultrasound and high-pressure processing to improve meat texture[J]. Foods, 2023, 12(3): 476.
[85] de OLIVEIRA F A, NETO O C, dos SANTOS L M R, et al. Effect of high pressure on fish meat quality-A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 66: 1−19.
[86] GROSSI A, OLSEN K, BOLUMAR T, et al. The effect of high pressure on the functional properties of pork myofibrillar proteins[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 1005−1015.
[87] ZHANG Ziye, YANG Yuling, ZHOU Peng, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 678−686.
[88] RAMIREZ-SUAREZ J C, MORRISSEY M T, et al. Effect of high pressure processing (HPP) on shelf life of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) minced muscle[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2006, 7:19-27.
[89] LIU Huipeng, XU Yiyuan, ZU Shuyu, et al. Effects of high hydrostatic pressure on the conformational structure and gel properties of myofibrillar protein and meat quality: A review[J]. Foods, 2021, 10(8): 1872.
[90] 曾馨瑶, 孙颖, 焦德新, 等. 超高压结合真空低温烹饪技术制备即食虾及其品质特性[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 193−200. [ZENG Xinyao, SUN Ying, JIAO Dexin, et al. Preparation and quality characteristics of ready-to-eat shrimp using ultra-high pressure combined with sous-vide technology[J]. Food Science, 2024, 45(5): 193−200.]
[91] 唐静怡, 闫怡君, 张立彦. 冰温协同壳聚糖及超高压处理对广式白切鸡贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 1−9. [TANG J Y, YAN Y J, ZHANG L Y. Effects of synergic methods of ice temperature storage, chitosan and high static pressure treatment on storage quality of cantonese soft-boiled chicken [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 1−9.]
[92] MOR-MUR M, YUSTE J. High pressure processing applied to cooked sausage manufacture: Physical properties and sensory analysis[J]. Meat Science, 2003, 65(3): 1187−1191.
[93] ABRIL B, BOU R, GARCÍA-PÉREZ J V, et al. Role of enzymatic reactions in meat processing and use of emerging technologies for process intensification[J]. Foods, 2023, 12(10): 1940.
[94] SUN X D, HOLLEY R A. High hydrostatic pressure effects on the texture of meat and meat products[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): 17−23.