

超高压技术在粮食产品加工中的应用*

于勇 潘芳 苏光明 詹耀 朱松明

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 超高压技术是一种非热加工技术,因具有杀菌、保持食品原有营养成分、护色等特点,在食品行业的应用已越来越广泛。目前,超高压技术在粮食产品加工方面的应用发展较快,随着对该技术研究的不断深入,其在粮食产品加工中所发挥的作用也越来越受关注。阐述了国内外超高压技术在粮食产品淀粉改性、蛋白质改性、成分提取、致敏性降低、贮藏(灭菌灭芽)等方面的研究进展,分析了各方面研究结果的意义、应用价值和前景,并对今后应重点关注的研究方向提出了建议。

关键词: 粮食产品 超高压 应用

中图分类号: O521⁺.9; TS210.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0247-10

Application of Ultra High Pressure on Crop Produces Processing

Yu Yong Pan Fang Su Guangming Zhan Yao Zhu Songming

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Consumers demand foods which are fresh and with high nutrition and sensory quality. Therefore, processing produces minimally is necessary. In recent years, the food industry has shown increased interest in nonthermal preservation technologies. High pressure processing (HPP) is an alternative mild-technology which has become widely used to inactivate microorganisms and certain enzymes, retain the food original nutrients, and preserve the organoleptic characteristics of the produces. Moreover, HPP can induce conformational and functional changes of macromolecules which in turn can improve nutrient properties of food. Its application to the food industry has become increasingly widespread. At present, the application of HPP to crop produces processing obtained increasing attentions. Literature information on HPP application to crop produces processing was analyzed, including starch modification, protein modification, extraction, reduction of allergen, and storage extension (mold inactivation and viability prohibition). Meanwhile, the significance and prospects of HPP application to crop produces processing were discussed to guide its future development.

Key words: Crop produces Ultra high pressure Application

引言

超高压技术是指将食品物料密封于弹性容器或耐压装置系统中,在高静压(一般为100~700 MPa)下进行处理,常以水或其他流体介质作为传递压力的媒介,以达到灭菌、改变物料某些理化特性的目

的^[1]。超高压作为一种食品非热加工技术,其最大的优势在于保证食品安全的同时,尽可能降低食品的加工程度,保持食品原有的风味。超高压处理可破坏食品中非共价键如氢键、离子键等,而对共价键没有显著影响。因此,超高压可以通过破坏大分子物质中的次级键,使大分子物质(如淀粉、蛋白质

收稿日期:2014-11-23 修回日期:2014-12-24

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100801)和浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ14C200002)

作者简介: 于勇,副教授,主要从事农产品非热加工技术研究,E-mail: yyuzju@zju.edu.cn

通讯作者: 朱松明,教授,博士生导师,主要从事农产品非热加工技术研究,E-mail: zhsum@zju.edu.cn

等)改性或变性,而对维生素、矿物质、香气成分和色素这样以共价键构成的小分子物质没有显著影响。

近年来,超高压技术越来越广泛地被应用于粮食产品的加工中,粮食作物涉及谷类作物、薯类作物和豆类作物。目前超高压技术在粮食产品加工中的应用主要为淀粉和蛋白质的改性。此外,超高压技术在粮食产品加工中的研究还涉及与其风味和营养价值相关的理化特性。

本文从淀粉改性、蛋白质改性、成分提取、致敏性、贮藏(灭菌灭芽)5个主要方面论述超高压技术在粮食产品加工中的应用。

1 超高压对粮食中淀粉的改性作用

淀粉是粮食作物的重要组成部分,在食品工业中是一种重要的食品原料。然而未经改性的淀粉糊化特性和回生特性等易受到温度和 pH 值等因素的影响,限制了淀粉在食品工业中的进一步开发与利用。改性淀粉在一定程度上弥补了天然淀粉乳化能力低、水溶性差等缺点,使其在食品工业中得到更广泛的应用^[2]。超高压在淀粉改性方面的研究主要是针对淀粉的糊化和回生特性。

淀粉糊化是一个膨胀驱动过程,淀粉颗粒内部存在结晶结构和无定型结构,无定型区最先吸水并膨胀^[3]。无定型区的膨胀将对结晶区的支链淀粉结晶施加压力,引起支链淀粉双螺旋解聚,导致结晶结构的破坏,淀粉发生糊化^[4]。自 1982 年 Muhr 等发现超高压处理可降低淀粉糊化温度后^[5],学者们开始研究压力、保压时间、温度对淀粉理化性质的影响。研究发现在 450 ~ 650 MPa 压力范围内,随着压力的升高,大米淀粉的糊化程度增大,压力 550 MPa 时可使纯大米淀粉完全糊化^[6]。超高压处理时的温度变化对淀粉糊化的影响较大,温度升高时,淀粉糊化所需要的压力会降低^[7];只要压力足够高即使是温度较低,也会导致淀粉糊化。淀粉糊化程度除与压力、保压时间、处理温度有关外,还与淀粉浓度有关,淀粉浓度越低则糊化程度越高^[8]。研究发现在 600 MPa、25℃ 的条件下,质量分数为 15% 的玉米淀粉可完全糊化^[9],但质量分数达到 50% 时糊化不完全^[10]。另外,不同种类的淀粉粒对超高压的敏感程度也不一样。一般认为,A 型淀粉(主要来源是玉米、小麦等谷类淀粉)对压力比较敏感,如小麦淀粉在 25℃ 条件下压力达到 600 MPa 时可以完全糊化^[11];而 B 型淀粉(主要来源是马铃薯等块茎类淀

粉)比较耐压,如 600 MPa 对马铃薯淀粉无影响,800 MPa 时才能使其完全糊化^[12]。C 型介于 A、B 两种晶型,如香蕉淀粉、莲藕淀粉和多数豆类淀粉,耐压性介于 A、B 型淀粉之间。

超高压对淀粉糊化的作用机理目前尚无定论,有学者推测超高压促进了水分的再分配从而使无定型区淀粉塑化、结构发生变化;也可能是超高压促进了淀粉分子的分解使淀粉分子塑化,最后使双螺旋完全分散,淀粉发生糊化^[13]。另外,超高压处理可以增加淀粉颗粒的含水率,促进了水合作用,导致淀粉糊化^[14]。但目前尚未有一个系统的机理来全面解释超高压处理是如何影响淀粉糊化过程,因此探究压致糊化的机理非常有必要。

超高压除了可以影响淀粉糊化特性外,还会影响淀粉的回生过程。超高压处理后淀粉的回生与热处理后淀粉的回生特性不同。有学者研究发现,与热处理相比,超高压处理后普通大米淀粉的回生程度更小,而 2 种处理对糯米淀粉的影响并没有显著差别^[15],可见超高压对淀粉回生特性的影响与淀粉来源和组成密切相关。淀粉回生程度还与淀粉种类、淀粉浓度、储藏温度等因素有关,Kawai 等发现随着淀粉浓度的增加回生焓值也增加^[16]。Tian 等发现超高压可明显降低大米淀粉回生的焓变^[17]。超高压可降低大米淀粉的回生程度,有学者认为这是因为淀粉的回生与直链淀粉溶出有关^[18],而超高压处理可以保持淀粉颗粒的完整,且直链淀粉在颗粒内部溶出少,内部空间障碍大,淀粉不易回生^[19]。另外有学者认为这是因为超高压处理后淀粉颗粒内的可冻结水含量较少,导致回生程度低^[15]。

此外,还有学者对淀粉表观粘度、淀粉粒结晶结构等进行了研究。近年来,淀粉改性方面的研究较多,国内外其他针对粮食淀粉改性的主要研究结果如表 1 所示。

根据超高压技术在粮食淀粉改性方面的研究结果来看,充分利用超高压技术来控制淀粉的糊化和回生的进程、从而使淀粉的理化特性朝着特定的方向改变是可以实现的。由此可以开发具有特定功能的食品,如非结晶或低晶淀粉用于开发婴幼儿或老年食品,高晶淀粉则可用于减肥产品。可见,针对淀粉结晶度的改性技术研究是该领域一个值得关注的方向。但我国在改性淀粉产业化应用方面以及此类产品的开发上还较薄弱,对淀粉糊化和回生控制技术的研究还不够深入,因此,深入系统的研究是促进超高压技术在改性淀粉产业中健康发展的重要支持。

表 1 超高压在粮食淀粉改性方面的研究应用

Tab.1 Application of HPP to crop starch modification

作者	年份	研究对象	研究指标	参数范围	结果
刘文婷等 ^[20]	2013	槟榔芋淀粉	冻融稳定性	压力:200、300 MPa	200 MPa 处理后,冻融稳定性明显改善;300 MPa 处理后,咀嚼性和胶黏性都显著增加
			咀嚼性		
			胶黏性		
Liu 等 ^[21]	2012	蜡质玉米	晶体结构	压力:300 ~ 600 MPa	450 MPa 使玉米淀粉颗粒变为非结晶颗粒;600 MPa 使木薯淀粉颗粒变为非结晶颗粒
		木薯淀粉		保压时间:30 min	
Li 等 ^[22]	2011	绿豆淀粉	峰值黏度	压力:120、240、360、480、600 MPa	随着压力升高,峰值、谷值黏度增大;晶体结构由 C 型向 B 型转变;
			谷值黏度		
			晶体结构		
Vallons 等 ^[23]	2010	小麦淀粉	储能模量 G'	压力:300 ~ 600 MPa	随着压力的增大,小麦淀粉糊的 G' 、 G'' 均增大
			耗能模量 G''		
Bárcenas 等 ^[24]	2010	小麦淀粉	硬度	压力:50 ~ 250 MPa	超高压显著增加小麦面团的硬度和黏着性
			黏着性	保压时间:1 ~ 4 min	

2 超高压对粮食中蛋白质的改性作用

蛋白质是粮食作物的另一重要组成部分,超高压蛋白质改性技术为蛋白资源的开发与应用提供了一个新思路。超高压会引起氢键、疏水键、盐键等非共价键的变化,而蛋白质三、四级结构的稳定主要靠非共价键来维持,因此超高压处理对蛋白质的影响主要表现在三、四级结构的变化。Ludikhuizen 等研究发现 150 ~ 200 MPa 的压力即可使蛋白质的三级空间结构发生改变,非极性氨基酸暴露,而二级结构的改变则需要大于 700 MPa 的压力^[25]。

有学者详细地研究了压力和温度对蛋白质变性的影响^[26],如图 1(图中 ΔH 、 ΔV 、 ΔG 分别表示蛋白质变性所需的焓变、体积变、吉布斯自由能变)所示:不同温度范围内,蛋白改性对于压力的要求变化趋势不同。当温度低于 300 K,随着温度的提高,蛋白变性所需的压力也提高;当温度高于 300 K,随着温度的提高,蛋白变性所需的压力则降低。可见,对于蛋白质改性,压力和温度两因素存在较强的交互作用。还有学者研究了超高压对谷朊粉结构的影响,发现压力大于 200 MPa 时,谷朊粉的巯基含量下降,压力达到 800 MPa 时谷朊粉蛋白的双硫键交联增多^[27-28]。超高压会对蛋白质结构产生一定的影响,从而使蛋白质的一些理化性质(起泡性、溶解性、凝胶特性和乳化性)发生相应的变化。

蛋白质的起泡性作为食品原料的一个重要功能性质,其在糕点、烘焙类行业应用相当广泛。有学者研究发现利用 300 MPa 压力处理麦醇溶蛋白、麦谷蛋白时,2 种蛋白质的起泡性都最好^[29]。刘国琴等采用 300 MPa 的压力处理大豆分离蛋白,发现超高压处理可以增加蛋白的起泡性^[30]。

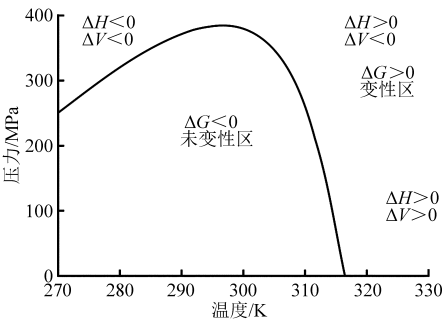


图 1 蛋白质的典型温度压力相图

Fig.1 Typical temperature and pressure phase diagram of protein

蛋白质的溶解性是水化作用的重要体现,是蛋白质品质的重要指标。钟昔阳等研究了超高压对麦醇溶蛋白、麦谷蛋白溶解度的影响,在 0.1 ~ 100 MPa 压力范围内,压力对 2 种蛋白的溶解度影响较大,在 100 ~ 300 MPa 压力范围内,压力对麦醇溶蛋白的溶解度影响不大,但麦谷蛋白的溶解度随压力增大而增大,300 ~ 500 MPa 2 种蛋白的溶解度都随压力增大而减少^[29]。李汴生等采用 400 MPa 高压处理低浓度大豆分离蛋白溶液,发现蛋白质溶解性显著提高^[31]。Torrezan 等研究发现在 pH 值为 2.66 条件下用 450 MPa 压力处理 2% 大豆蛋白溶液,此时大豆分离蛋白溶解性最大^[32]。从现有的研究结果可以看出,同一压力对不同蛋白的溶解度或是不同压力对同一蛋白溶解度的影响是有差异的。相关机理尚未明确,因此超高压处理对蛋白质溶解度的影响还有待于系统地分类研究。

蛋白质的凝胶性使得蛋白质在食品加工中具有很大的应用前景。蛋白凝胶的网状结构可吸附水分、糖、脂肪、风味物质及食品中其他成分,因此蛋白原料广泛用于香肠、午餐肉等碎肉制品中,以增加其

嫩度和改善风味。超高压使蛋白质凝胶化的机理大致是压力使水分子距离缩短,自由水与氨基酸侧链结合,使蛋白质水溶液体积减小,导致离子键和疏水作用被破坏,使蛋白分子之间形成更多氢键,最后使蛋白质内部的氨基酸侧链外露形成凝胶^[26]。经超高压处理的大豆分离蛋白凝胶结构较热处理更致密、均匀。何轩辉在研究超高压对花生分离蛋白凝胶特性的影响时,发现质量分数为 3.11% 的花生分离蛋白在 115 MPa 压力下处理 5 min,凝胶硬度、弹性达到最佳^[33]。Puppo 等研究超高压对大豆蛋白 7S 球蛋白和 11S 球蛋白的影响时,发现 400 MPa、60℃ 可促进 7S 球蛋白的凝胶化^[34]。从现有的研究结果可见适当的压力处理有利于蛋白质凝胶的形成和一定程度的改善凝胶特性,这给蛋白质凝胶生产提供了一个新方法。

超高压处理对蛋白质的乳化性、疏水性也会产生影响。Molina 等在研究超高压处理对大豆分离蛋白乳化性的影响时,发现 7S 球蛋白在 400 MPa 时乳化性和疏水性最好,11S 球蛋白在 200 MPa 时乳化性和疏水性最好,而大豆分离蛋白经过 400 MPa 压力处理后,此时乳化性最好,但疏水性较差,可能是 400 MPa 使 7S 球蛋白解离成单体,增强了表面活性,从而改善了大豆分离蛋白的乳化性,而 400 MPa 使 11S 球蛋白聚合,降低了大豆分离蛋白的疏水性^[35]。王岁楼等研究发现适当的超高压处理可明

显地提高小麦蛋白的乳化性,但同时乳化稳定性却有一定的降低^[36]。

超高压改性后的蛋白质消化性也发生一定的变化,主要体现为改性后蛋白质在酶解时的特性会发生改变。Peñas 等研究了超高压处理对大豆乳清蛋白水解作用的影响,发现在 100 MPa、37℃ 条件下处理 15 min,大豆乳清蛋白被胰蛋白酶、糜蛋白酶和胃蛋白酶水解的程度增加^[37],而利用 200 MPa 处理可增加大豆乳清蛋白被碱性蛋白酶水解的程度^[38]。类似的研究发现采用 200 ~ 400 MPa 的压力处理大豆蛋白后,其被蛋白酶酶解的水解度提高,同时加快了酶解的速度^[39]。研究发现适当的压力处理可以改变蛋白质的结构使其紧密的结构伸展或松散,暴露出分子内部的酶作用位点^[40],利于酶解的进行。另外,有研究表明适当的压力处理可提高蛋白质的溶解性,溶解性的增加使蛋白质更易被肠道消化吸收。基于这两点研究基础,笔者推测超高压技术将是一种改善粮食蛋白质消化吸收率的有效方法。但是从目前的研究现状来看超高压技术对蛋白质在人体内消化吸收的影响相关的研究仍然不全面,因此有待于进一步研究。

其他学者在超高压技术应用于蛋白质改性方面的一些研究列于表 2。根据国内外关于超高压技术在植物蛋白质改性方面的研究分析可得,采用适当的压力对蛋白质进行处理,对其某些性质有改善作

表 2 超高压在粮食蛋白质改性中的研究应用
Tab.2 Application of HPP to crop protein modification

作者	年份	研究对象	研究指标	参数范围	结果
Li 等 ^[41]	2012	大豆分离蛋白	游离巯基含量 疏水性	压力:200 ~ 500 MPa 保压时间:5 ~ 20 min	200 ~ 300 MPa、5 ~ 15 min 处理游离巯基增加,疏水性增强;大于 300 MPa 时巯基含量减少
Wang 等 ^[42]	2008	大豆蛋白	乳化性	压力:200 ~ 600 MPa	超高压处理提高大豆蛋白的乳化活性,但乳化稳定指数下降
Puppo 等 ^[43-44]	2008 2004	大豆蛋白	凝胶特性 疏水性	压力:200 ~ 600 MPa	200 MPa 可使大豆分离蛋白疏水性和聚集程度增加,大于 400 MPa 利于蛋白质聚集状态的离解,降低凝胶化
姜绍通等 ^[45]	2010	谷朊粉	结构	压力:400 MPa 保压时间:10 min	超高压使谷朊粉结构均一,交联程度增大
周婷婷等 ^[46]	2013	花生分离蛋白	溶解性 乳化性 乳化稳定	压力:300 ~ 600 MPa	可有效改善花生分离蛋白和花生球蛋白的溶解性和乳化性,但会降低其乳化稳定性
Yin 等 ^[40]	2008	红豆蛋白	溶解性 乳化性	压力:200 ~ 600 MPa	400 MPa 处理明显增加了红豆蛋白的溶解性和乳化性
陆军等 ^[47]	2013	玉米醇溶蛋白	黏度	压力:100 ~ 600 MPa 保压时间:10 min	400 MPa 处理后玉米醇溶蛋白的黏度最大
McCann 等 ^[48]	2013	小麦蛋白	凝胶性	压力:100 ~ 600 MPa	处理压力大于 400 MPa 时,小麦蛋白发生凝聚
蓝琳等 ^[49]	2008	小麦胚芽蛋白	溶解性 乳化性	压力:100 ~ 500 MPa	超高压可有效提高小麦胚芽蛋白的溶解度,而乳化性则随着超高压处理时间的延长而降低
王章存等 ^[50]	2012	大米蛋白	酶解特性	压力:100 ~ 700 MPa	超高压处理后米蛋白的水解度增加

用,但可能对其它一些性质又有消极作用,这与蛋白质的种类、组成、结构以及蛋白质所处的微环境(浓度、pH 值、溶剂的种类、温度等)有关。因此寻找最合理的高压参数以及高压协同温度、pH 值等共同作用的高压处理过程将是今后的一个重点研究方向。最终达到可以采用超高压处理对蛋白质的性质进行宏观调控,使其应用前景更加广阔。

3 超高压在粮食有效成分提取中的应用

超高压提取技术(High pressure extraction, HPE)是指在常温下用大于 100 MPa 的流体静压力作用于所提取的对象,保持压力一段时间使原料细胞内外压力达到平衡后迅速卸压,导致细胞内外渗透压力差瞬间增大,细胞膜结构发生改变,因此细胞内的有效成分容易穿过细胞膜,转移到细胞外的提取液中,从而达到提取目标成分的目的^[51]。

由于粮食作物原料价格低廉,却又含有丰富的活性成分,是很多功能物质理想的提取源。超高压提取技术应用于粮食作物中有效功能物质的提取已有相关报道。研究表明,采用 200 ~ 400 MPa 高静压处理糙米后,其所含的游离 GABA(γ -氨基丁酸)将提高 80% ~ 120%,并同时检测到谷氨酸的含量提高,增加了 GABA 的提取率^[52]。这可能与特定压力处理使谷氨酸脱羧酶(GAD)活性提高有关,如图 2^[53-54]所示。另外超高压提取技术还可应用于其他功能物质的提取如花生白藜芦醇^[55]、大豆皂甙^[56]、异黄酮^[57]等。林执绚等研究发现利用超高压提取豆科类植物葛根中的异黄酮,高压提取时间比浸提法节约 3 h^[57]。奚海燕等利用 400 MPa 的压

力结合酶处理从大米中提取蛋白质,提取率达 78.72%,提取率较一般碱法高^[58]。

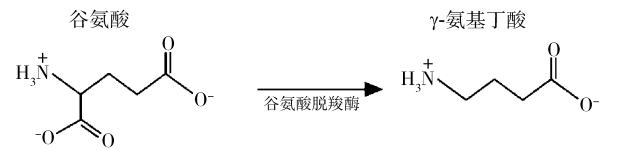


图 2 γ -氨基丁酸的合成机理
Fig.2 Synthesized mechanism of GABA

超高压提取技术在粮食有效成分提取的研究应用中粮食脂类物质的提取最值得关注。粮食中提取的油脂含有大量的不饱和脂肪酸如亚油酸、亚麻酸等,而且含有维生素 E、维生素 K 以及矿物质如钙、铁等,若能成功高效地从粮食中提取,经济效益是无法估量的。而超高压技术是一种非热加工手段,使得其具有操作温度低的优势,有利于保持油脂原有的品质。超高压技术还具有提取率高、耗时少、耗能少等优点,有利于脂类提取产业化生产。已有相关报道将超高压技术应用于大豆中卵磷脂的提取,大豆卵磷脂的得率可达 10.51 mg/g,最佳提取工艺参数为:压力 280 MPa 处理 5 min,提取溶剂为 85% 的乙醇,液料比为 45 mL/g^[59]。

其他学者的相关研究情况见表 3。从目前的研究资料来看,超高压提取技术应用于粮食中有效成分提取的相关报道较少,因此急需开展相关的基础研究,相应的设备问题、提取工艺参数的协同调整还需要进一步深入研究。笔者认为这方面应充分利用超高压技术在有效成分提取方面的独特优势,提高粮食资源的利用率,这将是有效成分提取领域的一个重要研究方向。

表 3 超高压提取在粮食产品中的研究应用
Tab.3 Application of HPE to crop produces

作者	年份	研究对象	提取物质	参数范围	结果	对照
陈琼玲等 ^[55]	2013	花生	白藜芦醇	压力:208 MPa	提取率 73.76%	一般提取法
				保压时间:4 min		
				溶剂:72% 乙醇 液料比:30 mL/g		
王居伟等 ^[56]	2012	大豆	皂苷	压力:439 MPa	皂苷得率 1.252%	回流提取法
				保压时间:16 min		
				溶剂:83% 乙醇 液料比:32 mL/g		
秦晓健等 ^[60]	2010	豆粕	大豆卵磷脂	压力:200 MPa	大豆卵磷脂得率 11.33 mg/g	
				保压时间:20 min		
				溶剂:75% 乙醇 液料比:40 mL/g		
Tang 等 ^[61]	2002	米糠	蛋白质	压力:500 ~ 800 MPa	提取率 66%	

4 超高压对粮食致敏性的影响

在生活中,常见的引起过敏的 8 大类食品主要有花生、大豆、小麦、坚果、鸡蛋、牛奶、贝类、鱼类,其中粮食作物花生、大豆过敏性较强。像花生、小麦这样的大宗粮食作物一旦出现问题,其后果是不堪设想的,因此研究和开发降低粮食作物过敏性的方法非常重要,而且市场前景非常广阔。

食品中有多种成分可引起过敏反应,但主要的过敏原是蛋白质成分。虽然超高压对过敏原的作用机理尚不清楚,但基于超高压可通过影响氢键、疏水键等非共价键来改变蛋白质空间结构的原理,推测超高压可改变过敏原蛋白的空间结构从而影响其过敏性表位,改变其致敏性^[62]。

大豆、花生、小麦是粮食中的主要过敏食物,目前花生、小麦的脱敏方法主要采用热处理和酶处理^[63-64],而采用超高压处理的研究较少,但已有研究证实超高压处理可改变大豆蛋白结构,降低大豆蛋白的致敏性。李慧静等采用 369 MPa、18 min 处理大豆分离蛋白,使其致敏性降低了 49.33%^[65]。相关的还有 Peñas 等研究了超高压对大豆过敏原

(Gly m 1)的影响,发现超高压处理减弱了大豆过敏原(Gly m 1)的免疫应答反应,这可能与超高压提高了相关蛋白水解酶的活性从而降低了 Gly m 1 的反应效力有关^[38]。相关研究成果可应用于低敏性大豆分离蛋白的生产,也为其他粮食作物花生、小麦等提供了一个很好的降低致敏性的方法,但相关的研究还有待于进一步深入。

虽然大米是公认的低致敏性的食品,但也有相关报道指出大米中的球蛋白具有致敏性,中国、日本等亚洲多国已出现较多的对大米过敏的患者^[66]。有学者对超高压处理作用于大米致敏蛋白进行了研究,研究表明利用 100~400 MPa 的压力处理大米过敏原(主要是 16 kDa 的白蛋白、 α -球蛋白、33 kDa 的球蛋白)后,大米过敏原减少^[67],这可能与超高压的破壁作用有关。

关于其他超高压对粮食过敏性影响的研究列于表 4。根据目前的研究现状,虽然还没有很好的方法可以完全消除各类食品中的过敏原,但超高压技术结合一些其他处理方法如酶解等,即复合处理方式可以较好地满足相关要求。

表 4 超高压对粮食致敏性的影响的研究应用
Tab.4 Effect of HPP on allergenicity in crop produces

作者	年份	研究对象	参数范围	结果
Cabanillas 等 ^[68]	2014	核桃过敏原	压力:256 MPa 温度:138℃	核桃过敏原致敏性降低
Li 等 ^[41]	2012	大豆分离蛋白	压力:300 MPa 时间:15 min	相比未高压处理的大豆分离蛋白致敏性降低了 48.6%
罗春萍 ^[69]	2011	花生过敏原 Ara h 6	压力:60、120、180 MPa 压力:300 MPa	随着处理压力的增加,Ara h 6 纯化蛋白与抗体的结合能力降低,抗原性降低
Peñas 等 ^[70]	2011	大豆	时间:15 min 温度:40℃	经过超高压处理后的大豆萌发出来的豆芽致敏性比未处理的低

5 超高压对粮食贮藏的影响

据估计,全世界每年仅粮食霉变造成的损失就达总产量的 3% 以上,而且有些霉菌还能产生毒素,如曲霉属,严重影响了消费者的健康^[71]。目前主要应用熏蒸防霉、低温储藏等方法控制谷物贮藏期间的霉变。利用超高压处理粮食中的霉菌已有相关报道。

Huang 等发现 600 MPa 和 800 MPa 处理花生后可以有效地抑制黄曲霉的生长^[72]。笔者曾研究超高压对稻谷表面亮白曲霉的杀灭作用,发现当压力大于 300 MPa 时,亮白曲霉存活量开始有明显的下降,且保压时间越长亮白曲霉存活量下降幅度越大。

而在超高压处理前对稻谷进行预浸泡也可有效提高超高压的杀菌效果,且预浸泡时间越长提高效果越明显。另外笔者还发现利用 100 MPa 相对较低的压力处理后,可诱导亮白曲霉孢子萌发^[73]。类似的研究有 100~300 MPa 可促进酸土脂环酸芽孢杆菌(*Alicyclobacillus acidoterrestris*)孢子的萌发^[74]。而促进大孢篮状菌(*Talaromyces macrosporus*)子囊孢子的萌发则需 400~800 MPa 的压力并短时处理^[75]。

另外,笔者通过研究发现超高压处理可有效抑制稻谷的发芽,在较低压力(100 MPa、10 min)下即可使稻谷完全失去萌发能力^[73]。类似的研究有龙国徽等发现在 50~250 MPa 范围内,随着压力增大,小麦种子发芽率越低,250 MPa 可使小麦种子失去

发芽能力^[76]。Saraiva 等在研究超高压对马铃薯块茎发芽的影响时,则发现采用 100 MPa 压力处理马铃薯块茎后,有效抑制了马铃薯块茎的发芽^[77]。

其他关于超高压技术在粮食贮藏方面的应用列

于表 5。从国内外的研究成果中可以看出超高压不仅可以对粮食进行杀菌,还可以有效防止粮食在贮藏期间发芽,这将为粮食在贮藏期内环境条件控制要求的降低提供一个有效的方法。

表 5 超高压在粮食贮藏中的应用
Tab.5 Application of HPP to crop produces storage

作者	年份	研究对象	参数范围	结果
Gao 等 ^[78]	2014	燕麦、米	压力:600 MPa 保压时间:15 min	显著降低燕麦和米的细菌总数
赵东等 ^[79]	2012	豇豆	压力:300、400 MPa 保压时间:30 min	超高压处理使菌落总数下降,霉菌和酵母未被检出
Peñas 等 ^[80]	2008	绿豆	压力:100、250、400 MPa 保压时间:5、10、15 min	超高压处理使霉菌和酵母菌落总数下降
Alexandre 等 ^[81]	2014	豌豆种子	压力:50 MPa 保压时间:10 min	超高压抑制了种子的发芽,增加了根的长度,减少了茎的长度
梁灵等 ^[82]	2005	小麦种子	压力:50、65、80、95 MPa 保压时间:4、8、12 h	真空包装的小麦种子均丧失发芽能力;加水包装的小麦种子,发芽受到显著抑制

虽然超高压对粮食有一定的灭菌效果,但不同种类的微生物其耐压性不同,且超高压的灭菌效果受食品成分的影响较大,如糖对酵母、霉菌有保护作用,而且高压可使溶质浓度增加,从而增强了微生物的耐压性。因此超高压对粮食杀菌作用的研究还需要更深入。另外在工业上粮食处理量较大,受超高压设备的限制,其在工业上的应用较少,因此加快此类超高压设备的研究与开发是今后的一个发展方向。

6 展望

超高压加工技术是一种全新的食品加工方法,为开发新产品提供了一个新思路。虽然超高压技术在粮食产品中的研究与应用已取得较大的发展,但我国仍未实现超高压产品的产业化及商品化。

我国是一个农业大国,粮食产量较大,超高压加工技术应用于粮食产品加工将是一个重要的研究方向。结合粮食作物产品的特点,笔者认为,在今后一段时间,超高压加工技术在粮食产品中的研究与应用应集中在以下几个方面:

(1) 针对稻谷、小麦等大宗粮食作物,结合淀粉改性、蛋白质改性、抑制过敏原技术,以及营养、质地

等方面的优化,开发新型粮食产品,充分利用我国丰富的粮食资源,提升粮食产品的附加值。

(2) 将温度控制、pH 值调节等手段与常规的压力和保压时间控制手段相结合,充分利用影响加工效果的各因素之间的协同作用,探索淀粉改性、蛋白质改性、活性物质提取等的优化工艺,提高加工效率,满足产业化实施需求。

(3) 加强粮食中有效成分提取技术的研究与应用。尤其是超高压应用于植物油脂压榨提取的前处理,这方面应结合植物细胞经高压处理后细胞膜通透性增加的特性,充分发挥超高压技术的优势,提高出油率。

(4) 超高压对粮食中蛋白质、淀粉影响的研究较多,但对粮食中的其他生物大分子,如脂类、膳食纤维等的研究较少,尤其是对粮食中脂类物质品质的影响。今后这方面研究是一个重点,同时还应研究各生物大分子间相互作用的规律。

(5) 超高压技术比较依赖设备,而目前超高压设备大多属于通用型设备。针对粮食产品进行物质改性和活性物质提取等技术的产业化所需的专用型超高压设备亟待研制。

参 考 文 献

1 朱松明,苏光明,王春芳,等. 水产品超高压加工技术研究与应用[J]. 农业机械学报,2014,45(1):168 – 177.
Zhu Songming, Su Guangming, Wang Chunfang, et al. Research and application on high-pressure processing of aquatic products[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):168 – 177. (in Chinese)

2 刘晶,李桂琴,韩清波. 变性淀粉及其在食品工业中的应用[J]. 西部粮油科技,2003,28(2):38 – 40.
Liu Jing, Li Guiqin, Han Qingbo. Modified starch and its application on food industry [J]. China Western Cereals & Oils Technology, 2003, 28(2):38 – 40. (in Chinese)

3 Jenkins P J, Donald A M. Gelatinisation of starch: a combined SAXS/WAXS/DSC and SANS study[J]. Carbohydrate Research, 1998, 308(1):133 – 147.

- 4 Ann-Charlotte Eliasson. 食品淀粉的结构、功能及应用[M]. 赵凯,译. 北京:中国轻工业出版社,2009:87-89.
- 5 Muhr A H, Wetton R E, Blanshard J M V. Effect of hydrostatic pressure on starch gelatinisation, as determined by DTA[J]. Carbohydrate Polymers, 1982, 2(2): 91-102.
- 6 Ahmed J, Ramaswamy H S, Ayad A, et al. Effect of high-pressure treatment on rheological, thermal and structural changes in Basmati rice flour slurry[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(2): 148-156.
- 7 Kawai K, Fukami K, Yamamoto K. Effects of treatment pressure, holding time, and starch content on gelatinization and retrogradation properties of potato starch-water mixtures treated with high hydrostatic pressure[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(3): 590-596.
- 8 Katopo H, Song Y, Jane J. Effect and mechanism of ultrahigh hydrostatic pressure on the structure and properties of starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 47(3): 233-244.
- 9 King A, Kaletunç G. Retrogradation characteristics of high hydrostatic pressure processed corn and wheat starch[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 98(1): 83-89.
- 10 Kweon M, Slade L, Levine H. Role of glassy and crystalline transitions in the responses of corn starches to heat and high pressure treatments: prediction of solute-induced barostability from solute-induced thermostability[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 72(2): 293-299.
- 11 Douzals J P, Perrier Cornet J M, Gervais P, et al. High-pressure gelatinization of wheat starch and properties of pressure-induced gels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(12): 4824-4829.
- 12 Stolt M, Stoforos N G, Taoukis P S, et al. Evaluation and modelling of rheological properties of high pressure treated waxy maize starch dispersions[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(4): 293-298.
- 13 Liu Y, Selomulyo V O, Zhou W. Effect of high pressure on some physicochemical properties of several native starches[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(1): 126-136.
- 14 Tian Yaoqi, Zhao Jianwei, Xie Zhengjun, et al. Effect of different pressure-soaking treatments on color, texture, morphology and retrogradation properties of cooked rice[J]. LWT—Food Science and Technology, 2014, 55(1): 368-373.
- 15 Hu Xiuting, Xu Xueming, Jin Zhengyu, et al. Retrogradation properties of rice starch gelatinized by heat and high hydrostatic pressure (HHP) [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(3): 262-266.
- 16 Kawai K, Fukami K, Yamamoto K. Effect of temperature on gelatinization and retrogradation in high hydrostatic pressure treatment of potato starch-water mixtures[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 314-321.
- 17 Tian Yaoqi, Li Dandan, Zhao Jianwei, et al. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) on slowly digestible properties of rice starches[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 225-229.
- 18 Leelayuthsoontorn P, Thipayarat A. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions [J]. Food Chemistry, 2006, 96(4): 606-613.
- 19 Stolt M, Oinonen S, Autio K. Effect of high pressure on the physical properties of barley starch[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000, 1(3): 167-175.
- 20 刘文婷, 郭泽滨, 曾绍, 等. 超高压处理对槟榔芋淀粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(5): 80-84.
Liu Wenting, Guo Zebin, Zeng Shao, et al. The influence of ultra high pressure treatment on the physicochemical properties of Areca Taro Starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(5): 80-84. (in Chinese)
- 21 Liu Peiling, Zhang Qing, Shen Qun, et al. Effect of high hydrostatic pressure on modified noncrystalline granular starch of starches with different granular type and amylase content[J]. LWT - Food Science and Technology, 2012, 47(2): 450-458.
- 22 Li Wenhao, Zhang Fusheng, Liu Peilin, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical, thermal and morphological properties of mung bean (*Vigna radiata* L) starch[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(4): 388-393.
- 23 Vallons K J R, Arendt E K. Understanding high pressure-induced changes in wheat flour-water suspensions using starch-gluten mixtures as model systems[J]. Food Research International, 2010, 43(3): 893-901.
- 24 Bárcenas M E, Altamirano-Fortoul R, Rosell C M. Effect of high pressure processing on wheat dough and bread characteristics[J]. LWT—Food Science and Technology, 2010, 43(1): 12-19.
- 25 Ludikhuizen L, Van Loey A, Indrawati, et al. Effect of combined pressure and temperature on enzymes related to quality of fruits and vegetables: from kinetic information to process engineering aspects[J]. Critical Review in Food Science and Nutrition, 2003, 43(5): 527-586.
- 26 陈复生. 食品超高压加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 102-109.
- 27 Apichartsrangkoon A, Ledward D A, Bell A E, et al. Physicochemical properties of high pressure treated wheat gluten [J]. Food Chemistry, 1998, 63(2): 215-220.
- 28 Kieffer R, Schurer F, Köhler P. Effect of hydrostatic pressure and temperature on the chemical and functional properties of wheat gluten: studies on gluten, gliadin and glutenin[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(3): 285-292.
- 29 钟昔阳, 姜绍通, 潘丽军, 等. 超高压对麦醇溶蛋白/麦谷蛋白功能性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 28(8): 8-11.
Zhong Xiyang, Jiang Shaotong, Pan Lijun, et al. Effects of ultra high pressure on functional properties of gliadin and glutenin[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 28(8): 8-11. (in Chinese)
- 30 刘国琴, 李琳, 李冰, 等. 超声和超高压处理对大豆分离蛋白特性影响的研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2005, 26(3): 1-4.

- Liu Guoqin, Li Lin, Li Bing, et al. Study on the effect of power ultrasound and high-pressure on solubility and foaming properties of soybean protein isolate and mechanism[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 26(3): 1 – 4. (in Chinese)
- 31 李汴生, 曾庆孝, 彭志英, 等. 高压处理后大豆分离蛋白溶解性和流变特性的变化及其机理[J]. 高压物理学报, 1999, 13(1): 22 – 29.
Li Biansheng, Zeng Qingxiao, Peng Zhiying, et al. Changes of solubility and rheological property of the isolated soybean protein after high pressure treatment and its mechanism[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(1): 22 – 29. (in Chinese)
- 32 Torrezan R, Tham W P, Bell A E, et al. Effects of high pressure on functional properties of soy protein[J]. Food Chemistry, 2007, 104(1): 140 – 147.
- 33 何轩辉. 超高压对花生分离蛋白凝胶特性的影响及其机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- 34 Puppo M C, Beaumal V, Speroni F, et al. B-Conglycinin and glycinin soybean protein emulsions treated by combined temperature-high-pressure treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(3): 289 – 397.
- 35 Molina E, Papadopoulou A, Ledward D A. Emulsifying properties of high pressure treated soy protein isolate and 7S and 11S globulins [J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(3): 263 – 269.
- 36 王岁楼, 张国超. 超高压对小麦蛋白乳化性和乳化稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(2): 9 – 11.
Wang Suilou, Zhang Guochao. Effects of ultra-high pressure on the emulsification activity and stability of wheat protein[J]. Food & Machinery, 2008, 24(2): 9 – 11. (in Chinese)
- 37 Peñas E, Préstamo G, Gomez R. High pressure and the enzymatic hydrolysis of soybean whey proteins[J]. Food Chemistry, 2004, 85(4): 641 – 648.
- 38 Peñas E, Préstamo G, Polo F, et al. Enzymatic proteolysis, under high pressure of soybean whey: analysis of peptides and the allergen Gly m 1 in the hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2006, 99(3): 569 – 573.
- 39 王章存, 徐贤. 超高压处理对大豆蛋白酶解物的影响[J]. 中国酿造, 2009(2): 132 – 134.
Wang Zhangchun, Xu Xian. Effects of ultrahigh pressure on enzymolysis of soybean protein[J]. China Brewing, 2009(2): 132 – 134. (in Chinese)
- 40 Yin Shouwei, Tang Chuanhe, Wen Qibiao, et al. Functional properties and *in vitro* trypsin digestibility of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolate: effect of high-pressure treatment[J]. Food Chemistry, 2008, 110(4): 938 – 945.
- 41 Li Huijing, Zhu Kexue, Zhou Huiming, et al. Effects of high hydrostatic pressure treatment on allergenicity and structural properties of soybean protein isolate for infant formula[J]. Food Chemistry, 2012, 132(2): 808 – 814.
- 42 Wang Xiansheng, Tang Chuanhe, Li Biansheng, et al. Effects of high-pressure treatment on some physicochemical and functional properties of soy protein isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22: 560 – 567.
- 43 Puppo M C, Beaumal V, Chapleau N, et al. Physicochemical and rheological properties of soybean protein emulsions processed with a combined temperature/high-pressure treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(6): 1079 – 1089.
- 44 Puppo M C, Chapleau N, Speroni F, et al. Physicochemical modifications of high-pressure-treated soybean protein isolates[J]. Journal of Agricultural Food and Chemistry, 2004, 52: 1564 – 1571.
- 45 姜绍通, 钟昔阳, 潘丽军, 等. 超高压改性谷朊粉对面条加工品质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 153 – 158.
Jiang Shaotong, Zhong Xiyang, Pan Lijun, et al. Effect of addition of ultra-high pressure treated wheat gluten on the quality of noodle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 153 – 158. (in Chinese)
- 46 周婷婷, 吕茜, 张玉玉, 等. 高静压处理对花生蛋白的改性研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(1): 18 – 22.
Zhou Tingting, Lü Qian, Zhang Yuyu, et al. Effects of high-pressure treatment on modification of peanut protein[J]. Food Research and Development, 2013, 34(1): 18 – 22. (in Chinese)
- 47 陆军, 陈洁, 盛奎川, 等. 超高压处理玉米醇溶蛋白的流变性和热特性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 259 – 265.
Lu Jun, Chen Jie, Sheng Kuichuan, et al. Rheological properties and calorimetric analysis on zein under high pressure treatment [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 259 – 265. (in Chinese)
- 48 McCann T H, Leder A, Buckow R, et al. Modification of structure and mixing properties of wheat flour through high-pressure processing[J]. Food Research International, 2013, 53(1): 352 – 361.
- 49 蓝琳, 王丹丹, 杨丽, 等. 超高压对小麦胚芽蛋白功能性质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2008(3): 122 – 124.
Lan Lin, Wang Dandan, Yang Li, et al. Study on influence of ultra-high pressure on functional property of WGP[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(3): 122 – 124. (in Chinese)
- 50 王章存, 田卫环, 赵学伟, 等. 高压处理对热变性米蛋白酶解特性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 11 – 15.
Wang Zhangcun, Tian Weihuan, Zhao Xuwei, et al. Effect of hydrostatic pressure treatment on enazymolysis characteristic of thermo-denatured rice protein[J]. Food Science, 2012, 33(7): 11 – 15. (in Chinese)
- 51 郭文晶, 张守勤, 张格. 超高压提取雨生红球藻中虾青素的工艺优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 201 – 203.
Guo Wenjing, Zhang Shouqin, Zhang Ge. Optimization of high pressure processing extracting astaxanthin from pluvialis algae[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 201 – 203. (in Chinese)
- 52 Kinefuchi M, Sekiya M, Yamazaki A, et al. Manufacture of processed brown rice enriched with GABA accumulation using high pressure treatment part I—accumulation of GABA in brown rice by high pressure treatment[J]. Journal of the Japanese Society for

- Food Science and Technology,1999,46(5):323-328.
- 53 Katsaros G I,Katapodis P,Taoukis P S. Modeling the effect of temperature and high hydrostatic pressure on the proteolytic activity of kiwi fruit juice[J]. Journal of Food Engineering,2009,94(1):40-45.
- 54 Kazuhito A. Rice transformation: development of GABA-enriched rice[J]. Journal of Pesticide Science,2010,35(2):157-159.
- 55 陈琼玲,刘红芝,刘丽,等. 高压-微波法提取花生根中白藜芦醇[J]. 食品科学,2013,34(20):43-48.
Chen Qiongling,Liu Hongzhi,Liu Li,et al. High pressure-microwave assisted extraction of resveratrol from peanut roots[J]. Food Science,2013,34(20):43-48. (in Chinese)
- 56 王居伟,马挺军,贾昌喜. 超高压提取大豆皂苷的工艺优化及动力学模型[J]. 中国食品学报,2012,12(4):8-18.
Wang Juwei,Ma Tingjun,Jia Changxi. Optimization of the technology and dynamic model for ultrahigh pressure extraction of soyasaponin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2012,12(4):8-18. (in Chinese)
- 57 林执绚. 超高压提取技术对葛根异黄酮提取率的影响[J]. 化学工程与装备,2009(2):36-37.
Lin Zhixuan. Effects of ultrahigh pressure processing on the extraction rate of isoflavones from Kudzu[J]. Chemical Engineering & Equipment,2009(2):36-37. (in Chinese)
- 58 奚海燕,欧小庆,张晖,等. 超高压辅助酶法提取大米蛋白的研究[J]. 粮食与饲料工业,2007(10):26-28.
Xi Haiyan,Ou Xiaoqing,Zhang Hui,et al. Studies on extraction of rice protein by super-high pressure assisted enzymatic method [J]. Cereal & Feed Industry,2007(10):26-28. (in Chinese)
- 59 马挺军,秦晓健,贾昌喜. 超高压提取大豆卵磷脂的工艺研究[J]. 中国农学通报,2010,26(19):46-51.
Ma Tingjun,Qin Xiaojian,Jia Changxi. Extraction of soybean lecithin using ultrahigh pressure extraction technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(19):46-51. (in Chinese)
- 60 秦晓健,马挺军,贾昌喜. 超高压提取豆粕中卵磷脂的工艺研究[J]. 农产品加工:创新版,2010(6):29-31.
Qin Xiaojian,Ma Tingjun,Jia Changxi. Extraction of soybean lecithin from soy flakes using ultrahigh pressure extraction technology [J]. Innovation Edition of Farm Products Processing,2010(6):29-31. (in Chinese)
- 61 Tang S,Hettiarachchy N S,Shellhammer T H. Protein extraction from heat-stabilized defatted rice bran. 1. physical processing and enzyme treatments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2002,50(25):7444-7448.
- 62 Yamamoto S,Mikami N,Matsuno M,et al. Effects of a high-pressure treatment on bovine gamma globulin and its reduction in allergenicity[J]. Bioscience,Biotechnology, and Biochemistry,2010,74(3):525-530.
- 63 Tatham A S,Shewry P R. Allergens to wheat and related cereals[J]. Clinical & Experimental Allergy,2008,38(11):1712-1726.
- 64 白卫东,沈棚,钱敏,等. 花生过敏原物质及其脱敏方法研究进展[J]. 广东农业科学,2012,39(7):233-236.
Bai Weidong,Shen Peng,Qian Min,et al. Research advancement of peanut allergy and desensitization method[J]. Guangdong Agricultural Sciences,2012,39(7):233-236. (in Chinese)
- 65 李慧静. 超高压静压协同酶法降低专用大豆分离蛋白致敏性的研究 [D]. 无锡:江南大学,2013.
- 66 Shibasaki M,Suzuki S,Nemoto H,et al. Allergenicity and lymphocyte-stimulating property of rice protein[J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology,1979,64(4):259-265.
- 67 Kato T,Katayama E,Matsubara S,et al. Release of allergenic proteins from rice grains induced by high hydrostatic pressure[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2000,48(8):3124-3129.
- 68 Cabanillas B,Maleki S J,Rodríguez J,et al. Allergenic properties and differential response of walnut subjected to processing treatments[J]. Food Chemistry,2014,157:141-147.
- 69 罗春萍. 热加工、辐照及超高压微射流对花生过敏原 Ara h 6 结构与抗原性的影响[D]. 南昌:南昌大学,2011.
- 70 Peñas E,Gomez R,Frias J,et al. High hydrostatic pressure effects on immunoreactivity and nutritional quality of soybean products [J]. Food Chemistry,2011,125(2):423-429.
- 71 蔡静平,黄淑霞,张晓云,等. 仪器法快速检测储藏霉菌的可靠性研究[J]. 粮食储藏,2003,32(4):33-36.
Cai Jingping,Huang Shuxia,Zhang Xiaoyun,et al. Study on the reliability of fast detection of cereals microorganism[J]. Grain Storage,2003,32(4):33-36. (in Chinese)
- 72 Huang H W,Yang B B,Wang C Y. Effects of high pressure processing on immunoreactivity and microbiological safety of crushed peanuts[J]. Food Control,2014,42:290-295.
- 73 詹耀,王为民,田凤,等. 基于超高压的稻谷亮白曲霉杀菌效应及其萌发特性研究[J]. 中国粮油学报,2012,27(11):72-76.
Zhan Yao,Wang Weimin,Tian Feng,et al. Study on the sterilization effect of *Aspergillus candidus* and germination characteristics of rice basing on ultra-high pressure technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2012,27(11):72-76. (in Chinese)
- 74 Vercammen A,Vivijs B,Lurquin I,et al. Germination and inactivation of *Bacillus coagulans* and *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores by high hydrostatic pressure treatment in buffer and tomato sauce[J]. International Journal of Food Microbiology,2012,152(3):162-167.
- 75 Dijksterhuis J,Teunissen P G M. Dormant ascospores of *Talaromyces macrosporus* are activated to germinate after treatment with ultra high pressure[J]. Journal of Applied Microbiology,2004,96(1):162-169.

- antioxidant/oxidative balance of Argentine beef[J]. *Meat Science*, 2005, 70(1): 35–44.
- 14 Marino R, Albenzio M, Della Malva A, et al. Changes in meat quality traits and sarcoplasmic proteins during aging in three different cattle breeds[J]. *Meat Science*, 2014, 98(2): 178–186.
- 15 Bolumar T, Bindrich U, Toepfl S, et al. Effect of electrohydraulic shockwave treatment on tenderness, muscle cathepsin and peptidase activities and microstructure of beef loin steaks from Holstein young bulls[J]. *Meat Science*, 2014, 98(4): 759–765.
- 16 Jeremiah L E, Gibson L L. The influence of storage temperature and storage time on color stability, retail properties and case-life of retail-ready beef[J]. *Food Research International*, 2001, 34(9): 815–826.
- 17 Hopkins D L, Lamb T A, Kerr M J, et al. Examination of the effect of ageing and temperature at rigor on colour stability of lamb meat[J]. *Meat Science*, 2013, 95(2): 311–316.
- 18 Hansen E, Juncher D, Henckel P, et al. Oxidative stability of chilled pork chops following long term freeze storage[J]. *Meat Science*, 2004, 68(3): 479–484.
- 19 Tolstorebrov I, Eikevik T M, Indergård E. The influence of long-term storage, temperature and type of packaging materials on the lipid oxidation and flesh color of frozen Atlantic herring fillets (*Clupea harengus*) [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 40: 122–130.
- 20 Gao X, Wang Z, Miao J, et al. Influence of different production strategies on the stability of color, oxygen consumption and metmyoglobin reducing activity of meat from Ningxia Tan sheep[J]. *Meat Science*, 2014, 96(2): 769–774.
- 21 Herring J L, Jonnalongadda S C, Narayanan V C, et al. Oxidative stability of gelatin coated pork at refrigerated storage[J]. *Meat Science*, 2010, 85(4): 651–656.
- 22 Tang J, Faustman C, Mancini R A, et al. The effects of freeze-thaw and sonication on mitochondrial oxygen consumption, electron transport chain-linked metmyoglobin reduction, lipid oxidation, and oxymyoglobin oxidation[J]. *Meat Science*, 2006, 74(3): 510–515.
- 23 Benjakul S, Bauer F. Biochemical and physicochemical changes in catfish (*Silurus glanis* Linne) muscle as influenced by different freeze-thaw cycles[J]. *Food Chemistry*, 2001, 72(2): 207–217.
- 24 Ngapo T M, Babare I H, Reynolds J, et al. Freezing rate and frozen storage effects on the ultrastructure of samples of pork[J]. *Meat Science*, 1999, 53(3): 159–168.
- 25 Benjakul S, Sutthiphan N. Muscle changes in hard and soft shell crabs during frozen storage[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2009, 42(3): 723–729.
- 26 李银, 孙红梅, 张春晖, 等. 牛肉解冻过程中蛋白质氧化效应分析[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(7): 1426–1433.
Li Yin, Sun Hongmei, Zhang Chunhui, et al. Analysis of frozen beef protein oxidation effect during thawing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1426–1433. (in Chinese)
- 27 Zhou F, Zhao M, Zhao H, et al. Effects of oxidative modification on gel properties of isolated porcine myofibrillar protein by peroxyl radicals[J]. *Meat Science*, 2014, 96(4): 1432–1439.
-

(上接第 256 页)

- 76 龙国徽, 纪媛, 余涛, 等. 高压对大麦种子萌发的影响及诱变的 DNA 分子指纹分析[J]. *吉林大学学报: 理学版*, 2007, 45(2): 305–310.
Long Guohui, Ji Yuan, Yu Tao, et al. Molecular analysis of high pressure induced barley DNA structure and effect of high pressure on germination of barley seed[J]. *Journal of Jilin University: Science Edition*, 2007, 45(2): 305–310. (in Chinese)
- 77 Saraiva J A, Rodrigues I M. Inhibition of potato tuber sprouting by pressure treatments[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(1): 61–66.
- 78 Gao Jiaqi, Yang Haixia, Rong A, et al. Effects of HHP on microorganisms, enzyme inactivation and physicochemical properties of instant oats and rice[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2014, 37(2): 191–198.
- 79 赵冬, 蒲彪, 黎雪梅, 等. 超高压处理对泡豇豆杀菌效果的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(21): 78–80.
Zhao Dong, Pu Biao, Li Xuemei, et al. Effect of inactivation on microorganisms in pickled cowpea by high hydrostatic pressure[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(21): 78–80. (in Chinese)
- 80 Peñas E, Gómez R, Frías J, et al. Application of high-pressure treatment on alfalfa (*Medicago sativa*) and mung bean (*Vigna radiata*) seeds to enhance the microbiological safety of their sprouts[J]. *Food Control*, 2008, 19(7): 698–705.
- 81 Alexandre E M C, Carvalho A M, Saraiva J A. Effect of high pressure on green pea seeds germination and plantlets development [J]. *High Pressure Research*, 2014, 34(1): 133–146.
- 82 梁灵, 张正茂, 段旭昌, 等. 高压对小麦种子发芽和幼苗生长的影响初探[J]. *高压物理学报*, 2005, 19(3): 241–246.
Liang Ling, Zhang Zhengmao, Duan Xuchang, et al. Effect of high pressure on seed germination and seedling growth of wheat[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(3): 241–246. (in Chinese)