

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.022

高静压对果蔬制品质构影响的研究进展*

姚佳 胡小松 廖小军 张燕

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对高静压技术对果蔬制品质构的双重影响,综述了果蔬制品质构与细胞结构的关系,并从细胞结构的3个层面(细胞壁、细胞膜和细胞间隙)阐明了高静压对果蔬制品质构的影响机制。通过总结国内外大量文献,论述了高静压对固体、液体果蔬制品质构变化的影响,最后提出了高静压对果蔬制品质构的研究重点和方向,为改善果蔬制品的质构提供思路。

关键词: 果蔬制品 高静压 质构 细胞结构

中图分类号: O521⁺.9; TS255.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)09-0118-07

Research Progress in Effect of High Hydrostatic Pressure on Texture of Fruit and Vegetable Products

Yao Jia Hu Xiaosong Liao Xiaojun Zhang Yan

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: For high hydrostatic pressure (HHP) had a dual role in preserving texture properties, the relationship between the texture of fruit and vegetable products and cell structure were reviewed. On that basis, the mechanism about how high pressure affects the fruit and vegetable texture was clarified from three levels of cell structure. Furthermore, based on the comprehensive analysis of a large body of literature, the research progress of high pressure on the texture of fruit and vegetable products was summarized. At last, the research direction in the field was pointed out so as to provide the ideas on how to improve the texture of fruit and vegetable products.

Key words: Fruit and vegetable products High hydrostatic pressure Texture Cell structure

引言

随着人们消费意识的增强和生活水平的提高,热加工生产的传统果蔬制品已不能充分满足人们对高品质食品的要求,而具有新鲜果蔬感官特性的最小加工食品正逐渐受到消费者的欢迎^[1]。因此,提高果蔬制品的品质,有效防止果蔬在加工过程中色泽、香气、滋味、质构、营养、功能和安全等品质特性的变化,满足消费者对高品质食品日益增长的消费需求,是食品加工领域的重要研究课题^[2]。非热加

工技术杀菌温度低、能更好保持食品原有的色、香、味等特点,是食品加工领域的一项新型加工技术。其中,高静压技术是将软包装或散装的食品放入密封的、高强度的施加压力容器中,以水或矿物油作为传压介质,施加高静压(100~1 000 MPa),在常温或较低温度(低于100℃)下维持一定时间后,达到杀菌、灭酶、改善食品品质等目的的一种加工方法。

质构是果蔬制品品质的重要指标。相关研究表明,高静压技术除能有效保持果蔬制品的色^[3~5]、香^[6]、味^[7~8]及营养成分^[9~11]外,也能基本保持果

收稿日期: 2012-12-12 修回日期: 2013-03-07

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD39B01)、北京市科技新星计划资助项目(Z121105002512068)和北京市科技计划重点项目(D101105046610000)

作者简介: 姚佳, 博士生, 主要从事食品科学与非热加工技术研究, E-mail: yaojia866@126.com

通讯作者: 张燕, 副教授, 主要从事食品非热杀菌技术理论与应用研究, E-mail: zhangyan-348@yahoo.cn

蔬制品的质构^[12~13],但目前主要集中于对果蔬制品处理前后及贮藏期间质构(硬度、脆度、咀嚼性等)变化的描述性研究^[14~15],而对其作用机制还未见报道。高静压处理果蔬制品时,容易使果蔬制品内部的组分分布和大分子物质的结构发生变化,从而导致果蔬制品质构的改变,由此也限制了该技术在固体果蔬制品上的应用。Cano等^[16]研究发现果蔬制品的质构主要由细胞壁和胞间层的结构决定,因此了解果蔬制品的细胞结构,不仅有助于找到稳定的质构测定新方法,且在细胞水平上也可有效阐明高静压对果蔬制品质构的影响机制。本文在细胞水平上(细胞壁、细胞膜和胞间隙)阐述高静压对果蔬制品质构的影响机制和研究进展,并对其未来的相关研究进行展望,以期改善高静压果蔬制品的质构和延长货架期提供理论依据。

1 果蔬质构与细胞结构的关系

食品质构是指通过接触所能感觉到的一组物理特性,与食品受力后的变形、破裂和流动有关^[17],属于机械和流变学的物理性质。果蔬制品的质构主要由果蔬成分和组织结构决定。果蔬在加工过程中,组织受到不同程度机械作用后,原料所具有的固有组织发生变化,化学成分改变,生理活性失调等,引起质构改变。

细胞是果蔬组织的基本结构,细胞的形态、结构、空间排列和完整性直接影响果蔬的机械特性,决定果蔬制品的质构^[18~20]。细胞壁主要由纤维素、半纤维素、果胶质、木质素等聚合物构成,果胶质在中胶层中起粘连相邻细胞的作用,细胞壁的任一结构成分降解或破坏都会影响细胞的结构,从而影响果蔬质构。细胞壁内侧紧贴着细胞膜,细胞膜主要由蛋白质和脂质组成,另外还含有少量的糖类物质。完整的细胞膜维持细胞内外的膨压,细胞膜结构的破坏会导致内容物渗出,细胞发生皱缩,宏观上则表现为组织软化。果蔬在成熟过程中,随着细胞壁果胶和半纤维素的降解,细胞会沿中胶层分离,细胞间结构变得松散,从而出现细胞间隙。正常情况下,细胞间隙内各种气体都要按照一定的分压梯度移动扩散,使细胞获得正常呼吸所必需的 O_2 ,并排出 CO_2 。当果蔬经过加工后,细胞间隙会发生不同形式和程度的变化,如:果蔬在真空冷冻干燥过程中,细胞间隙中的水分急剧气化、膨胀,间隙扩大,出现膨化现象,产生酥脆的口感。

综上所述,果蔬质构主要取决于以下3个方面:细胞壁构成物的机械强度;细胞大小、形状和紧张度;细胞间的结合力,即表现为细胞壁、细胞膜和细

胞间隙的完整性。

2 高静压对果蔬制品质构影响的机制

高静压处理果蔬制品时,果蔬体积在液体介质中被压缩,生物高分子立体结构在高压下受到破坏,引起氢键、离子键和疏水键等非共价键变化和蛋白质、淀粉等大分子变性,从而使果蔬细胞结构变形或破裂,影响果蔬质构。

2.1 对细胞壁的影响

植物细胞壁是决定果蔬质构的主要因素。在细胞壁的绳网状结构模型中,纤维素晶体与半纤维素之间以氢键相连,形成纤维素和半纤维素的网络,亲水性的果胶和少量的结构蛋白则填充在网状结构的空隙里。细胞壁的这些结构物质中,果胶多糖是影响质构的主要物质^[21]。研究发现,大多果胶类物质以共价键或非共价键的形式与细胞壁中的纤维素、半纤维素等大分子缔合,果胶结构一旦破坏,便会引起植物细胞分解,果蔬质构软化。因此,目前有关果蔬质构变化的研究多集中在细胞壁果胶变化及影响其变化的相关内源酶上。尽管有学者预计纤维素结构的变化可能与果实软化有关,但对许多果实的研究结果显示,纤维素的解聚并不是软化的关键因子^[22]。

高静压加工过程中,细胞壁和中胶层的主要结构物质——果胶会不断发生降解,使果蔬细胞的机械强度下降。Kato等^[23]研究发现胡萝卜在700 MPa下处理45 min,果胶甲酯酶活性增大,催化果胶去甲酯化,从而使组织软化。Roeck等^[24]对腌制胡萝卜分别进行了高温(80℃,常压)和高压联合高温(80℃,600 MPa)处理,发现高温处理后胡萝卜的细胞分离,水溶性果胶含量增加,螯合性果胶和碱溶性果胶含量下降,组织变软;高压联合热处理后细胞间粘性较好,组织硬度几乎不变,这一结果表明,热处理和高压处理对果胶的影响不同,此结论与Christiaens等^[25]的研究结论相似。另外,持水性是细胞壁物质的主要功能特性,能够反映其存在于细胞间对细胞的支撑情况,且持水性的变化与细胞壁中果胶的变化相关^[26]。Butz等^[27]研究发现高压处理改变了胡萝卜、西兰花和番茄细胞壁的持水力,与95℃处理60 min和空白对照组相比,高压处理后的番茄酱水分释放量更大,这一结果表明高压对大分子的结构产生了影响,使其与底物的结合能力下降。

此外,影响果胶组分变化的相关内源酶——多聚半乳糖醛酸酶(Polygalacturonase, PG)和果胶甲基酯酶(Pectin methylesterase, PME)也是果蔬质构软化的主要因素。在果蔬制品中,PG和PME的相

互作用可使果蔬组织软化;对于果蔬汁,粘度下降,浊汁还会出现分层等现象。高静压处理果蔬制品时,可钝化 PG 酶活,而保留 PME 酶活,因而对果蔬质构有一定的保持作用。果胶质是构成细胞壁和胞间层的主要成分,果实中原果胶在 PG 酶的作用下降解为可溶性果胶,当细胞壁中的原果胶降解时,胞间层和初生壁被分解,细胞结构受损,果肉硬度下降^[28~29]。纵伟等^[30]研究发现,经过高静压处理后,猕猴桃果片的 PG 酶活性大大降低,与处理前相比,差异显著,贮藏期间活性基本不变;猕猴桃果片的硬度和其中的可溶性果胶含量在贮藏期间也基本不变。PME 可使果胶去甲酯化,进一步使组织软化。某种程度上,PME 还可增加果蔬制品的硬度^[31],但会导致浊汁的分层,因此在加工浊汁之前,需将 PME 钝化。

脂肪氧化酶(LOX)是影响果蔬质构的另外一种酶,它是一种含非血红素铁的蛋白质,可专一催化具有顺戊二烯结构的多元不饱和脂肪酸发生加氧反应,生成具有共轭双键的氢过氧化物。在植物生长、发育过程中,氢过氧化物使蛋白质合成及叶绿体的光化学反应失活并破坏细胞膜的结构,从而促进植物的衰老进程。在加工及贮藏过程中,氢过氧化物可引起果蔬颜色、风味、质构和营养价值的改变。而高静压技术可部分钝化或完全钝化 LOX 酶活,从而减小其对果蔬制品品质的影响。Indrawati 等^[32]研究了高压对青豆中脂肪氧化酶的钝化效果,结果表明高压结合高温可完全钝化 LOX 活性,降低其对质构的影响。

综上,目前对果蔬质构软化的研究主要集中于对其相关内源酶变化及由此引起的细胞壁果胶等组分的变化研究,而对于钝化内源酶后,果蔬加工制品的质构变化研究还相对较少,仅有一些硬度、脆度变化等描述性报道,尚未见对其机理的研究。因此,未来可对罐头制品等,在钝化内源酶的基础上,研究高静压对其质构保持的机制。

2.2 对细胞膜的影响

细胞膜是植物胁迫反应的第一目标,许多食品加工过程都会影响细胞膜的完整性,导致食品质构改变。研究表明,完整的细胞膜是一种半透性膜,在平衡水环境中,细胞膜可维持细胞内外的渗透压平衡,从而维持植物组织的硬度^[33~34]。高静压对细胞膜结构的影响主要表现为以下两方面:

一方面,高静压通过改变细胞膜生物大分子的构象而改变细胞膜结构,如引起细胞膜多糖结构改变、蛋白质凝胶化、脂肪结晶等,而目前对这些现象的研究只通过电镜或间接指标加以推测,并未对其

特定的结构物质进行活体定位检测。Prestamo 等^[35]运用冷冻断层扫描电镜观察发现,压力为 400 MPa 时,西兰花和菠菜叶的细胞膜出现了褶皱。Butz 等^[36]通过对大蒜酶的主要产物(2-甲基-2-戊烯醛)含量的测定,间接推测 300 MPa/25℃ 严重破坏了大蒜的表皮细胞,使大蒜酶与其底物充分接触,2-甲基-2-戊烯醛含量上升,大蒜风味改变。Luscher 等^[37]指出蔬菜组织细胞膜的受损程度可由细胞膜蛋白质凝胶化的程度加以衡量,如高压引起的细胞存活率、汁液流失率和膨压改变程度均可由细胞膜的相变程度所度量。另外,最大光化学效率是光合作用的一个生理标志,可表示细胞的完整性。Schlüter 等^[38]通过测定莴苣的最大光化学效率发现,细胞膜结构的受损程度主要由压力和保压时间决定,压力小于 150 MPa 时,叶绿体膜发生短暂的变化(24 h 之内恢复),最大光化学效率下降;压力达到 150 MPa 时,莴苣细胞的叶绿体膜完整性消失,无最大光化学效率。Tauc 等^[39]研究发现高压增大了饱和及不饱和脂肪酸的有序性排列,而温度可降低这种排列方式。

另一方面,由于细胞膜具有一定的电势, Na^+ 和 K^+ 可凭借 ATP 产生的能量发生转移。当压力大于 100 MPa 时,细胞膜表面的 ATP 酶结构破坏,细胞膜渗透压改变,结构破坏^[40]。Kato^[41]指出高压可诱导与细胞膜结合的 Na^+/K^+ -ATP 酶发生三步变化:当压力在 100 MPa 以内,脂质层流动性降低,跨膜蛋白发生可逆性构象变化, Na^+/K^+ -ATP 酶活性紊乱;压力在 100~200 MPa 之间,脂质层发生可逆转变,蛋白质亚结构消失,蛋白质和脂质层分离,产生跨膜通道;压力在 200 MPa 以上,不可逆蛋白去折叠化,脂质层断裂,细胞膜结构破坏。

2.3 对细胞间隙的影响

果蔬质构在微观结构上的表现主要由细胞内外的压力决定,液泡和细胞内容物对细胞壁产生的压力表现为细胞内压,即膨压;细胞壁形成的与其方向相反、大小相等的压力表现为胞外压力。因此,细胞要保持一定的形态结构,必须维持内、外压力的平衡。细胞多面体结构的各端都有一个气室结构,它是气体释放和交换的空间。果蔬作为活的有机体采后仍进行呼吸作用,因而细胞间隙充满气体。当进行高静压处理时,细胞间隙的气体被压缩,促进细胞的破坏,压力进一步增大,细胞膜破坏,内容物流出,细胞区室化消失,组织变形软化。同时,由于气体比液体、固体的压缩率更大,当挤压时,被压缩的气体迅速膨胀,细胞通透性增大,进一步增加 PME 和 PL 酶的活性,从而加速组织结构的破坏。

Kuroki 等^[42]用 X-射线断层摄影技术对黄瓜细胞间气隙的结构进行了观察,结果表明细胞间气隙并非完全联通,HHP 只对某些部位造成破坏;在贮藏过程中,随衰老进程的加快,细胞间隙被水溶物填充,影响气体交换。Ximenita^[43]研究发现,与对照组相比,600 MPa 下,胡萝卜体积减小了 6%,这一变化主要来自细胞间隙的局部塌陷和细胞壁厚度的减小。Tanwongchai 等^[44]发现在降压过程中,细胞间隙中被压缩的气体会迅速膨胀而破坏细胞膜的结构,流出的内容物则占据胞间气隙,降低气体的扩散速率,使组织进行厌氧呼吸,腐烂和软化加快。因此,设想高压处理前用水充填胞间气隙从而阻止高压引起的细胞压缩性破坏是一种非常有效的方法^[45]。

综上,HHP 应用于鲜切果蔬的贮藏时,在升压或降压阶段,胞间气隙会被来自组织或传压介质中的水充填,影响气室中气体的交换,而目前此方面的研究只停留在电镜的观察层面上^[46],并没有从生理生化特性的变化上深入探索高静压对果蔬制品品质构的影响机制,如高静压对果蔬呼吸速率、酶活变化等

理化特性的影响尚未见报道。因此,压力循环过程中气室被水填充的程度及呼吸速率与细胞膜破坏程度的关系是未来的一个研究方向。

3 高静压对果蔬制品品质构的影响

目前,国际市场上的高压果蔬产品有果蔬预制品、果酱、果冻、沙司、果蔬汁、果蔬罐头等,按物质的状态分类,高压果蔬产品可分为固体果蔬制品和液体果蔬制品。质构的主要评价指标有粘着性、硬度、脆度、咀嚼性、粘弹性和拉伸强度等。研究表明固体食品的硬度在咀嚼过程中变化最显著,粘弹性等其他指标变化不显著,而液体食品则主要表现为粘弹性的变化^[47]。因此,目前高静压对果蔬食品品质构的影响研究,固体食品大多以硬度为考察指标,而液态食品则以粘度为考察指标。

3.1 对固体果蔬制品品质构的影响

如表 1 所示,鲜切果蔬经高静压处理后,其硬度变化因果蔬种类及压力大小而异,多数果蔬品种硬度下降,少数品种硬度不变或增大。

表 1 高静压对固体果蔬制品品质构的影响

Tab. 1 Effect of high hydrostatic pressure on texture of solid fruit and vegetable products

鲜切果蔬种类	高压条件	质构变化	文献来源
绿豆	400 ~ 900 MPa, 5 ~ 10 min	硬度下降 40%	[48]
	100 MPa, 20 min, 20℃	硬度增大 21%	
胡萝卜	300 ~ 500 MPa, 20 min, 20℃	前 10 min 硬度基本不变,后 10 min 硬度增大 1 倍	[49]、[50]
	600 MPa, 90 min, 80℃	硬度基本不变	
菠菜	100 MPa, 20 min	硬度基本不变,凝聚力基本不变,弹性下降约 15%,咀嚼度下降约 12%	
	300 ~ 500 MPa, 20 min	硬度前 5 min 下降,后 15 min 增大 33% ~ 50%,凝聚力基本不变,弹性下降 23% ~ 41%,咀嚼度下降 7% ~ 23%	[49]
西芹,绿、黄、红辣椒	100 MPa, 0 ~ 60 min, 20℃	前 10 min 硬度迅速下降,后 50 min 硬度增大,60 min 后硬度增大了 10% ~ 40%	
	200 ~ 400 MPa, 0 ~ 60 min, 20℃	前 10 min 硬度迅速下降,后 50 min 基本保持不变,60 min 后硬度下降了 30% ~ 60%	[51]、[52]、[53]
竹笋	600 MPa, 10 min, 25℃	硬度基本不变,并延缓了贮藏过程中硬度的增大	[54]
绿扁豆	1 000 MPa, 2 min, 75℃	硬度下降了 40%	[55]
苹果、梨、橙子、菠萝	100 ~ 200 MPa, 60 min, 20℃	前 15 min 硬度迅速下降,后 45 min 硬度恢复升高,60 min 后硬度下降了 13% ~ 68%	[53]
圣女果	200 ~ 400 MPa, 20 min, 20℃	硬度下降了 86%	
	500 ~ 600 MPa, 20 min, 20℃	硬度下降了 50%	[44]
黄桃罐头	600 MPa, 30 min	硬度下降 6%,贮藏 180 d 后硬度下降了 17.2%	[56]

一般地,常温下,在低压范围内(一般小于 200 MPa),固体果蔬制品的硬度随作用时间的延长呈先下降后增大的趋势。这可能是由于压力瞬间增大时,细胞膜被破坏,膨压下降,果蔬硬度下降;随作

用时间的延长,果胶甲酯酶从细胞中释放,并与底物接触,使高甲酯化果胶去甲基而形成低甲酯化果胶,低甲酯化果胶与金属离子结合形成共价键,从而增大了果蔬的硬度。在较高的压力作用下(大于

200 MPa), 固体果蔬制品的硬度又会随压力的增大而减小。这可能是由于压力增大, 细胞破坏程度增大, 细胞的通透性增大, 另外, 高压同时激发了 PME 和 PG 酶的活性, PME 使果胶去甲酯化, PG 使低甲酯化果胶发生降解, 这 2 种酶共同作用使固体果蔬制品硬度下降。但某些研究结果显示, 同一样品在同一压力和同一时间处理下, 质构变化的趋势也不相同, 这可能是由于研究过程中所使用的高静压装置不同, 传压介质不同, 升降压速率不同等因素对质构影响的差异。

另外, 温压结合技术在一定程度上也可保持果蔬的硬度。这是由于温压结合钝化了与质构变化相关的酶活, 从而终止了某些化学反应的发生, 如 β -消除降解等, 从而保持了固体果蔬制品的质构。

3.2 对液体果蔬制品质构的影响

液体食品在力的作用下发生流动, 流变性是液

体果蔬制品质构的一个重要表现。很多浓缩果汁、果酱都属于假塑性流体, 对于这一类食品在加工时应注意其剪切变稀的流变性质。

高静压对果蔬汁、果酱流变特性的影响主要依赖于高压条件、果蔬种类、果蔬汁中的果胶、PME、PG 等内源酶的活性及果蔬汁粒度等因素。一般地, 果蔬汁的粘稠性由果胶分子与其他可溶性物质联结而成的三维结构决定。如表 2 所示, 高静压处理果蔬汁时, 在一定压力范围内, 果蔬汁的粘度随压力的增大而增大, 这可能是由于压力升高, 一方面增大了果胶从果浆中的溶出率; 另一方面降低了多聚半乳糖醛酸酶的活性, 减少了对果胶的降解, 从而使果蔬汁的粘度增大。当压力更大时, 随着果胶三维结构的破坏及 PME 酶的失活, 果蔬汁的粘度又会随压力的增大而下降。

表 2 高静压对液体果蔬制品流变性的影响

Tab. 2 Effect of high hydrostatic pressure on rheology of liquid fruit and vegetable products

果蔬汁	高压条件	流变特性变化	文献来源
西瓜汁	300 MPa, 5 min, 60℃	粘度增大 粘度与对照组相似	[57]
	600 MPa, 60 min, 60℃		
	900 MPa, 20 ~ 60 min, 60℃		
甜橙汁	600 MPa, 4 min, 40℃	粘度值高于热处理, 但在贮藏过程中会逐渐下降, 而热处理的不变	[58]
猕猴桃汁	100 ~ 300 MPa, 15 min, 26℃	随压力的增大, 果汁粘度增大	[59]
	300 ~ 500 MPa, 15 min, 26℃	随压力的增大, 果汁粘度减小	
芒果酱	100 ~ 200 MPa, 15 min 或 30 min, 20℃	随压力的增大, 流变参数增大	[60]
	300 ~ 400 MPa, 15 min 或 30 min, 20℃	随压力的增大, 流变参数减小	
番茄酱	50 ~ 400 MPa, 15 min, 25℃	粘度随压力的增大而减小	[61], [62]
	50 ~ 200 MPa, 15 min, 25℃, 添加 0.2% NaCl	粘度随压力的增大而减小	
	200 ~ 400 MPa, 15 min, 25℃, 添加 0.2% NaCl	粘度随压力的增大而增大	
	400 ~ 700 MPa, 2 min, 20℃	随压力的增大, 粘稠度增大	

4 结束语

由于高静压技术不能完全钝化内源酶活, 处理过程中会引起果蔬制品的品质劣变, 而高温杀菌技术虽能钝化酶活, 但对果蔬制品的营养和感官品质影响较大。因此, 为了加大高静压技术的应用范畴, 温压结合技术应运而生, 目前该技术已成功应用于低酸性食品的开发。然而, 目前对其改善鲜切果蔬质构的机理还鲜有报道。结合本文综述的高静压对果蔬细胞结构的影响机制, 可对阐明温压结合技术如何改善果蔬质构的机理提供一定的思路。

为了降低单纯使用高静压技术对果蔬质构的破

坏作用, 对某些鲜切果蔬, 在高压处理之前可应用某些前处理技术改善果蔬质构。如低温热处理技术, 渗透前处理^[63], 真空注入果胶甲酯酶技术, 基因修饰技术等。有研究指出, 将高压技术作为一种预处理方法, 对成熟度适中的果蔬也是提高组织硬度的一种方式, 这也是未来果蔬加工业所采用的一种补充或辅助加工手段。

类似于热诱导的热激蛋白, 高压处理过程中, 果蔬细胞是否会产生一种保护质构的物质也是未来的研究方向; 另外, 利用转录组学和代谢轮廓谱分析技术, 研究高压诱导的基因调控代谢可为优化加工工艺提供理论依据。

参 考 文 献

- Garcia E L, Barrett D M. Preservative treatments for fresh-cut fruits and vegetables[M]//Olusola Lamikanra. Fresh-cut fruits and vegetables. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002: 267 ~ 303.

- 2 廖小军. 高静压技术在果蔬加工中大有可为[J]. 农业工程技术·农产品加工业, 2009(9): 36~38.
- 3 van Loey A, Ooms V, Weemaes C, et al. Thermal and pressure-temperature degradation of chlorophyll in broccoli (*Brassica oleracea* L. *italica*) juice: a kinetic study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(12): 5 289~5 294.
- 4 Suthanthangjai W, Kajda P, Zabetakis I. The effect of high hydrostatic pressure on the anthocyanins of raspberry (*Rubus idaeus*) [J]. Food Chemistry, 2005, 90(1~2): 193~197.
- 5 de Ancos B, Gonzalez E, Cano M P. Effect of high-pressure treatment on the carotenoid composition and the radical scavenging activity of persimmon fruit purees [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3 542~3 548.
- 6 Krebbers B, Matser A, Koets M, et al. High pressure/temperature processing as an alternative for preserving basil[J]. High Pressure Research, 2002, 22(3~4): 711~714.
- 7 Dalmadi I, Polyak-Feher K, Farkas J. Effects of pressure and thermal pasteurization on volatiles of some berry fruits[J]. High Pressure Research, 2007, 27(1): 169~172.
- 8 Oey I, Lille M, van Loey, 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 and Technology, 2008, 19(6): 320~328.
- 9 Sancho F, Lambert Y, Demazeau G, et al. Effect of ultra-high hydrostatic pressure on hydro-soluble vitamins[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 39(3): 247~253.
- 10 Vila Real H J, Alfaia A J, Calado A R T, et al. High pressure-temperature effects on enzymatic activity: naringin bioconversion [J]. Food Chemistry, 2007, 102(3): 565~570.
- 11 McInerney J K, Seccafien C A, Stewart C M, et al. Effects of high pressure processing on antioxidant activity, and total carotenoid content and availability in vegetables[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2007, 8(4): 543~548.
- 12 Knockaert G, de Roeck A, Lemmens L, et al. Effect of thermal and high pressure processes on structural and health-related properties of carrots (*Daucus carota*) [J]. Food Chemistry, 2011, 125(3): 903~912.
- 13 Jung Lae-Seung, Lee Seung Hwan, Kim Sungkyun. Effect of high pressure processing on microbiological and physical qualities of carrot and spinach[J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(3): 899~904.
- 14 Matser A M, Knott E R, Teunissen P G M, et al. Effects of high isostatic pressure on mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(1): 11~16.
- 15 Krebbers B, Matser A M, Koets M, et al. Quality and storage-stability of high pressure preserved green beans[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(1): 27~33.
- 16 Cano M P, de Ancos B. Advances in use of high pressure to processing and preservation of plant foods[M]//Barbosa-Canovas G V, Tapia M S, Cano M P. Novel food processing technologies Ch 13. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005: 283~309.
- 17 Bourne M C. Texture evaluation of horticulture crops[J]. HortScience, 1980, 15: 51~56.
- 18 Rojas A M, Castro M A, Alzamora S M, et al. Turgor pressure effects on textural behavior of honeydew melon[J]. Journal of Food Science, 2002, 66(1): 111~117.
- 19 Liano K M, Haedo A S, Gerchenson L N, et al. Mechanical and biochemical response of kiwifruit tissue to steam blanching[J]. Food Research. International, 2003, 36(8): 767~775.
- 20 Gonzalez M E, Jernstedt J A, Slaughter D C, et al. Influence of cell integrity on textural proper ties of raw, high pressure and thermally processed onions[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(7): E409~E416.
- 21 van B J. The chemistry of texture in fruits and vegetables[J]. Journal of Texture Studies, 1979, 10(1): 1~23.
- 22 Brummell D A. Cell wall disassembly in ripening fruit[J]. Functional Plant Biology, 2006, 33(2): 103~119.
- 23 Kato N, Teramoto A, Fuchigami M. Pectin substance degradation and texture of carrots as affected by pressurization[J]. Journal of Food Science, 1997, 62(2): 359~398.
- 24 de Roeck A, Sila D N, Duvetter T, et al. Effect of high pressure/high temperature processing on cell wall pectic substances in relation to firmness of carrot tissue[J]. Food Chemistry, 2008, 107(3): 1 225~1 235.
- 25 Christiaens S, Mbong Victor B, van Buggenhout S. Influence of processing on the pectin structure-function relationship in broccoli puree[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 15: 57~65.
- 26 Redgwell R J, Melton L D, Brasch D J. Cell-wall polysaccharides of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*): effect of ripening on the structural features of cell wall materials[J]. Carbohydrate Research, 1991, 209: 191~202.
- 27 Butz P, Edenharter R, Fernandez Garcia A, et al. Change in functional properties of vegetables induced by high pressure treatment[J]. Food Research International, 2002, 35(2): 295~300.
- 28 Habibi Y, Heyraud A, Mahrouz M, et al. Structural features of pectic polysaccharides from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits[J]. Carbohydrate Research, 2004, 339(6): 1 119~1 127.
- 29 茅林春, 应铁进, 张上隆. 桃果实絮败与果胶质变化和细胞壁结构的关系[J]. 植物生理学报, 1999, 25(2): 121~126. Mao Linchun, Ying Tiejin, Zhang Shanglong. Changes of pectic substances and cell wall structure associated with the development of woolliness in peaches[J]. Plant Physiology Journal, 1999, 25(2): 121~126. (in Chinese)
- 30 纵伟, 赵光远. 超高压对鲜切猕猴桃果片多聚半乳糖醛酸酶及品质的影响[J]. 食品与机械, 2006, 22(5): 40~42. Zong Wei, Zhao Guangyuan. Effects of ultra-high pressure on polygalacturonase activity and the quality of fresh-cut kiwi fruit[J]. Food and Machinery, 2006, 22(5): 40~42. (in Chinese)

- 31 Villarreal-Alba E G, Contreras-Esquivel J C, Aguilar-Gonzalez C N, et al. Pectinesterase activity and the texture of Jalapeno pepper[J]. *European Food Research and Technology*, 2004, 218 (2):164 ~ 166.
- 32 Indrawati A M, Vanloey L R, Ludikhuyze, et al. Pressure-temperature inactivation of lipoxygenase in green peas (*Pisum sativum*): a kinetic study[J]. *Food Engineering and Physical Properties*, 2001, 66(5):686 ~ 693.
- 33 Taiz L, Zeiger E. *Plant physiology*[M]. 4th ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2006: 764.
- 34 Ilker R, Szczesniak A. Structural and chemical bases for texture of plant food stuffs[J]. *Texture Stud.*, 1990, 21(1): 1 ~ 36.
- 35 Prestamo G, Arroyo G. High hydrostatic pressure effects on vegetable structure[J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(5): 878 ~ 881.
- 36 Butz P, Koller W, Tauscher B, et al. Ultra-high pressure processing of onions: chemical and sensory changes[J]. *Lebensm-Wissu-Technol*, 1994, 27(5): 463 ~ 467.
- 37 Luscher C, Schlüter O, Knorr D. High pressure-low temperature processing of foods: impact on cell membranes, texture, color, and visual appearance of potato tissue[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2005, 6(1): 59 ~ 71.
- 38 Schlüter O, Foerster J, Geyer M, et al. Characterization of high hydrostatic pressure effects on fresh produce using chlorophyll fluorescence image analysis[J]. *Food Bioprocess Technol.*, 2008, 2(3):291 ~ 299.
- 39 Tauc P, Mateo R, Brochon J C. Pressure effects on the lateral distribution of cholesterol in lipid bilayers; a time resolved spectroscopy study[J]. *Biophysics Journal*, 1998, 74(4): 1 864 ~ 1 870.
- 40 Kato M, Hayashi R. Effects of high pressure on lipids and biomembranes for understanding high-pressure induced biological phenomena[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 1999, 63(8):1 321 ~ 1 328.
- 41 Kato M, Hayashi R, Tsuda T, et al. High pressure induced changes of biological membrane. Study on the membrane-bound Na⁺/K⁺-ATPase as a model system[J]. *European Journal of Biochemistry*, 2002, 269(1): 110 ~ 118.
- 42 Kuroki S, Oshita S, Sotome I, et al. Visualization of 3-D network of gas-filled intercellular spaces in cucumber fruit after harvest [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 33(3): 255 ~ 262.
- 43 Araya X I T. Effects of high pressure processing on carrot tissue: a micro-structure approach [D]. New Zealand: Massey University, 2011.
- 44 Tanwongchai R, Ledward D A, Ames J M. Effect of high-pressure treatment on the texture of cherry tomato[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(5): 1 434 ~ 1 441.
- 45 Ludikhuyze L, Hendrickx M E G. Effects of high pressure on chemical reactions related to food quality[M]//Hendrickx M E C, Knorr D. *Ultra high pressure treatment of foods*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001: 67 ~ 188.
- 46 Azquez-Gutierrez J L, Hernandez-Carrion M, Quiles A. Impact of high hydrostatic pressures on the structure, diffusion of soluble compounds and textural properties of persimmon “Rojo Brillante”[J]. *Food Research International*, 2012, 47(2): 218 ~ 222.
- 47 Katsuyoshi N I. Rheology, food texture and mastication[J]. *Journal of Texture Studies*, 2004, 35(2): 113 ~ 124.
- 48 Krebbers B, Matser A M, Koets M, et al. Quality and storage-stability of high-pressure preserved green beans[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 54(1): 27 ~ 33.
- 49 Jung Lae-Seung, Lee Seung Hwan, Kim Sungkyun, et al. Effect of high pressure processing on microbiological and physical qualities of carrot and spinach[J]. *LWT-Food Science and Biotechnology*, 2012, 21(3): 899 ~ 904.
- 50 de Roeck A, Sila D N, Duvetter T, et al. Effect of high pressure/high temperature processing on cell wall pectic substances in relation to firmness of carrot tissue[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(3): 1 225 ~ 1 235.
- 51 Castro S M, Saraiva J A, Fernando M J. Effect of mild pressure treatments and thermal blanching on yellow bell peppers (*Capsicum annuum* L.) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(2): 363 ~ 369.
- 52 Castro S M, Saraiva J A, Lopes-da-Silva J, et al. Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(4): 1 436 ~ 1 449.
- 53 Basak S, Ramaswamy H S. Effect of high pressure processing on the texture of selected fruits and vegetables[J]. *Journal of Texture Studies*, 1998, 29(5): 587 ~ 601.
- 54 MiaoMing, Wang Qingxin, Zhang Tao. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) treatment on texture changes of water bamboo shoots cultivated in China[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 59(3): 327 ~ 329.
- 55 Krebbers B, Matser A M, Koets M, et al. Quality and storage-stability of high-pressure preserved green beans[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 54(1): 27 ~ 33.
- 56 Zhang Fusheng, Dong Peng, Lun Feng, et al. Textural changes of yellow peach in pouches processed by high hydrostatic pressure and thermal processing during storage[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(8): 3 170 ~ 3 180.
- 57 Zhang Chao, Trierweiler B, Li Wu, et al. Comparison of thermal, ultraviolet-c, and high pressure treatments on quality parameters of watermelon juice[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(1): 254 ~ 260.
- 58 Polydera A C, Stoforos N G, Taoukis P S. Quality degradation kinetics of pasteurised and high pressure processed fresh navel orange juice: nutritional parameters and shelf life[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2005, 6(1): 1 ~ 9.
- 59 赵玉生,姚二民,赵俊芳. 超高压处理对猕猴桃汁品质的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(1): 60 ~ 63.
Zhao Yusheng, Yao Ermin, Zhao Junfang. Effects of UHP treatment on kiwi juice quality [J]. *Food Science*, 2008, 29(1): 60 ~ 63. (in Chinese)

229 ~ 379.

- 3 Caro J, Noack M, Kölsch P, et al. Zeolite membrane and their potential use in catalysis [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2000, 38(1): 3 ~ 24.
- 4 Jansen K C, Coker E N. Zeolite membranes [J]. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 1996, 1(1): 65 ~ 68.
- 5 Ruiz A Z, Li H, Calzaferri G. Organizing supramolecular functional dye-zeolite crystals [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2006, 45(32): 5 282 ~ 5 287.
- 6 Snyder M A, Tsapatsis M. Hierarchical nanomanufacturing: from shaped zeolite nanoparticles to high performance separation membranes [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007, 46(40): 7 560 ~ 7 573.
- 7 Li S G, Alvarado G, Richard D N, et al. Effects of impurities on CO₂/CH₄ separations through SAPO-34 membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 251(1 ~ 2): 59 ~ 66.
- 8 Caro J, Marlow F, Hoffmann K, et al. News from APO-5: microwave synthesis, application as medium to organise molecules for spectroscopy and nonlinear optics applications, material for one-dimensional membranes [C] // Caro J, Marlow F, Hoffmann K, et al. *Progress in Zeolite and Microporous Materials, Studies in Surface Science and Catalysis*, 1997, 105: 2 171 ~ 2 178.
- 9 Wang D, Tang Z K, Li G D, et al. Single-walled 4 angstrom carbon nanotube arrays [J]. *Nature*, 2000, 408: 50 ~ 51.
- 10 Hu E P, Li Y, Lai Z P. Synthesis of highly c-oriented AFI membranes by epitaxial growth [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, 126(1 ~ 2): 81 ~ 86.
- 11 Yang W S, Zhang B Q, Liu X F. Synthesis and characterization of SAPO-5 membranes on porous α -Al₂O₃ substrates [J]. *Microporous Mesoporous Mater*, 2009, 117(1 ~ 2): 391 ~ 394.
- 12 Yang W S, Liu X F, Zhang B Q. In situ synthesis and microstructure manipulation of SAPO-5 films over porous α -Al₂O₃ substrates [J]. *Langmuir*, 2009, 25(4): 2 271 ~ 2 277.
- 13 Trinidad M J, Kenneth J J. Preparation of FeAPO-5 molecular sieve thin films and application as a capacitive type humidity sensor [J]. *Chemistry of Materials*, 1998, 10(12): 4 114 ~ 4 122.
- 14 Lin J C, Yates M Z. Growth of oriented molecular sieve thin films from aligned seed layers [J]. *Chemistry of Materials*, 2006, 18(17): 4 137 ~ 4 141.
- 15 Lang L, Liu X F, Zhang B Q. Synthesis and characterization of h0h-oriented silicalite-1 films on α -Al₂O₃ substrates [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(8): 2 353 ~ 2 358.
- 16 Holt J K, Park H G, Wang Y M, et al. Fast mass transport through sub-nanometer carbon nanotubes [J]. *Science*, 2006, 312: 1 034 ~ 1 037.
- 17 宋成文, 姜大伟, 王同华, 等. PMDA - ODA 型聚酰亚胺炭/碳纳米管杂化膜的制备及气体分离性能研究 [J]. *无机化学材料学报*, 2012, 27(9): 923 ~ 927.
Song Chengwen, Jiang Dawei, Wang Tonghua, et al. Preparation and gas separation properties of carbon/carbon nanotubes hybrid membranes derived from PMDA - ODA polyimide [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, 27(9): 923 ~ 927. (in Chinese)

(上接第 124 页)

- 60 Ahmed J, Ramaswamy H S, Hiremath N. The effect of high pressure treatment on rheological characteristics and colour of mango pulp [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2005, 40(8): 885 ~ 895.
- 61 Krebbers B, Matser A M, Hoogerwerf S W, et al. Combined high-pressure and thermal treatments for processing of tomato puree: evaluation of microbial inactivation and quality parameters [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2003, 4(4): 377 ~ 385.
- 62 Plaza L, Munüz M, de Ancos B, et al. Effect of combined treatments of high-pressure, citric acid and sodium chloride on quality parameters of tomato puree [J]. *European and Food Research and Technology*, 2003, 216(6): 514 ~ 519.
- 63 Mavroudis N E, Gidley M J, Sjöholm I. Osmotic processing: effects of osmotic medium composition on the kinetics and texture of apple tissue [J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 839 ~ 847.