

蔬菜冷、热加工后品质变化与力学性能 关系的研究进展

许丛丛, 李云飞*

(上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

摘要: 蔬菜加工往往使细胞组织软化、膨胀、分离甚至破碎, 导致蔬菜风味和口感下降。关于蔬菜加工后的质量问题, 虽然受到国内外许多学者的重视, 然而, 这些研究或者局限于加工条件与力学性能的关系; 或者局限在加工工艺与品质指标的关系上, 在生物化学指标与力学性能参数之间缺乏关联性研究。本文从冷、热加工后蔬菜细胞形态、力学性能及营养品质的变化三个方面入手, 介绍了目前国内外相关研究的进展。

关键词: 蔬菜; 加工; 品质; 力学性能

Advance in relationship between quality changes and mechanics of vegetables after thermal processing

XU Cong-Cong, LI Yun-Fei*

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Processing methods for vegetable usually result in tissue softening, expanding, brokening and unfavorable flavor. Vegetables processed quality have been studied by many researchers all the world, however, most of the works have been paid to either technologies with quality or technologies with textures. The studies on quantitative relationship between the qualities and mechanics are very few. In this paper, the research progress on the processed quality of vegetables were reviewed covering the effect of processing on cellular morphology, mechanical property and nutritional quality.

KEY WORDS: vegetable; processing; quality; mechanics

蔬菜加工往往经过清洗、烫漂、烹饪、杀菌、冷却甚至冻结等不同过程, 使细胞组织软化、膨胀、分离甚至破碎, 导致蔬菜风味和口感下降。从生物化学角度看, 反应底物、反应产物和相关酶的活性发生了变化, 导致蔬菜风味、色泽和营养变化。从材料和生物力学角度看, 构成蔬菜组织的物质成分、结构和聚集状态发生了变化, 导致材料的力学性能发生了变化。材料经历的温度、时间不同, 其微观结构与聚集态不同, 重组与恢复的程度也不同。在生物化学和材

料力学之间一定存在着内在的定量关系。科学地建立其对应关系对于提高蔬菜加工质量具有指导意义。

比较典型的加工蔬菜是调理食品(prepared foods; process foods; ready-meals)中的蔬菜, 是一种经过烹饪加工或者半加工、包装、冷藏、食用前(微波炉或者电热箱)再加热的快捷食品, 目前被广泛应用于动车组、飞机、商务活动以及远洋作业等方面。蔬菜在这个过程中经历了高温热处理和低温冷冻冷藏处理, 温度范围约在 130 °C 至 -30 °C 之间。在工业化中央厨

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271909)

*通讯作者: 李云飞, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品贮藏与加工研究。Email: yfli@sjtu.edu.cn

房生产模式下,为了满足特殊需求(如海军执行远洋任务)和社会批量需求,其中冷藏环节或者冻结环节可能持续时间从数天至数月^[1]。如此大的温度区别和时间跨度,蔬菜色泽、风味和口感损失非常严重,也限制了可用于调理加工的蔬菜品种。

国内外学者对蔬菜冷加工和热加工进行了多年研究,其中以调理食品和速冻食品为主,深度研究改善或者解决蔬菜加工过程中的质量变化问题。

1 热加工对蔬菜细胞形态和力学性能的影响

蔬菜热加工的主要目的有:钝化酶活性,破坏蔬菜中不必要的或有害的成分或因子,杀灭致病菌和其它有害微生物,熟化,改善蔬菜的品质与特性以及提高蔬菜中营养成分的可利用性、可消化性等。热加工温度范围在 50 °C~130 °C 之间。但是热加工会破坏植物材料细胞半透膜和细胞间结构,导致细胞压力和细胞间黏结作用丧失,细胞分离,脆度丧失和变软。另外,热加工会引起果蔬蛋白质变性、淀粉糊化、果胶水解以及半纤维素的部分溶解,进而导致蔬菜软化。研究表明,随着温度的增加和处理时间的延长,细胞组织软化和分离加剧。

1.1 传统热烫漂对蔬菜细胞形态和力学性能的影响

Roy^[2]和 Sila^[3]等研究发现低温烫漂(60 °C、40 min)为最佳烫漂条件,此时 PME 酶活性最高,导致胡萝卜甲酯化程度下降,果胶 β-消除的解聚反应降低,保证了胡萝卜质构的稳定性,并且采用光学显微镜观察到低温烫漂胡萝卜的细胞结构完整,组织有序,而烹饪胡萝卜的细胞分离且细胞壁加厚,这可能由果胶溶液化造成。Tansey 等进行胡萝卜真空调理试验,发现烫漂 50 °C、30 min 胡萝卜质构最好,而 90 °C、3 min 酶钝化效果好,并用光学显微镜和扫描电子显微镜分别观察胡萝卜的组织结构,在细胞形态变化方面进一步证明温度和时间对胡萝卜质量的影响^[4]。Jaworsks 等研究烫漂和冷冻对蘑菇质构的影响,分析了不同处理条件与蘑菇质构性能参数间的关系,得出 96 °C~98 °C 烫漂 3 min(蘑菇菌盖)、1.5 min(菌柄)使蘑菇硬度、咀嚼性和胶黏性下降,但是凝聚性增加。对质构影响最大的因素是冷冻条件,其次是烫漂条件^[5]。孔祥佳等从保鲜角度对果蔬热处理技术进行综述,其中重点讨论 35 °C~50 °C 这一温度区对果蔬

代谢的影响和对硬度等质构的影响^[6]。翟迪升研究热烫对荷兰豆的质构影响,认为 95 °C~96 °C 热烫 40~50 s 即可达到酶钝化的效果,也获得较好的口感和风味^[7]。张素文等对西兰花烫漂的玻璃化转变温度进行研究,得出水分含量、蔗糖、氯化钠调理与玻璃化转变温度之间的关系^[8]。Li 等研究甜薯的力学特性,给出甜薯的应力松弛和蠕变特性模型^[9]。

1.2 新型的烫漂工艺对蔬菜细胞形态和力学性能的影响

传统热烫漂处理极易过度,时间难以控制。为最大限度保持果蔬营养价值、口感和风味等品质,微波烫漂、欧姆烫漂、超声波辅助热处理(声热处理)等新型的烫漂工艺在食品工业中不断得到应用。

与传统的烫漂工艺相比,微波烫漂具有效率高,时间短以及能够精确操控等优点。Kidmose 等采用扫描电子显微镜和光学显微镜观察微波烫漂萝卜条的微观结构,发现了两种明显的异形细胞结构:保持良好的细胞群和收缩细胞、凹陷细胞的区域,细胞损伤较小,并且经过拉伸和压缩试验发现微波烫漂萝卜条比热水和热蒸汽烫漂过的萝卜条更坚固,剪切力值更大,这与细胞微观结构有着密切关系^[10]。李瑜等研究发现微波烫漂处理(407.6 W 和 60 s)的怀山药解冻后硬度和脆性明显比鲜样、护色处理和热烫处理(90 °C 热水烫漂 2 min)的大,而使咀嚼度较低^[11]。Hind 等研究发现欧姆烫漂(37 °C)可通过电热协同效应有效增加细胞膜渗透性,增强草莓渗透脱水中水和糖的扩散速率。长时间的烫漂也可到达同样效果,但这严重降低了草莓的质量和最终产量^[12]。Moreno 等通过电子扫描显微镜和透射电子显微镜观察梨薄壁组织的微观结构发现欧姆加热通过电热效应导致细胞缩小、中间薄层加厚和破碎细胞增加^[13]。超声波辅助热处理对果蔬内源酶起钝化作用,过氧化物酶活力再生现象出现频率低,而且这种技术还可以降低果蔬烫漂过程中的热强度,改善热处理果蔬的品质。许多研究发现超声波可以改善植物组织中颗粒(细胞壁颗粒、淀粉颗粒)的粘度。超声波处理使得更多的水分渗入细胞壁纤维网格中引起细胞壁颗粒膨胀,增加番茄酱的粘度^[14]。Curulli 等发现在特定的频率、时间和能量情况下,超声波可以修饰植物组织表面含有大量淀粉的微孔结构,使其在随后的高温处理中防止核心结构水分的丢失^[15]。

2 冷加工对蔬菜细胞形态与力学性能的影响

果蔬冷冻保存是一种高效的果蔬保存方法, 它既能保持果蔬的高品质, 又防止果蔬受到污染, 在国内外得到广泛的应用。但在食品冷藏工业中, 冰晶体的形成过程对果蔬保持原有品质十分重要。冰晶能够最直观地反映速冻食品品质。

许多学者利用改进的光学显微镜观察冰晶与食品材料组织的关系, 获得具有一定效果的图像信息^[16,17]。还有部分学者利用扫描电镜间接获得更微观的冰晶形态^[18], 利用 X 光微型 CT 断面扫描等技术获得更直观的 3D 结构变化^[19]。近年来, 激光共聚焦显微镜(CLSM)在生物材料实时成像方面更受人们青睐, 利用激光共聚焦显微镜研究冰晶形成、生长和融化过程。Chassagne-Berces 等采用生物光学显微镜、共聚焦激光显微镜和低温扫描电镜观察苹果块、芒果等水果冷冻过程中的细胞变化, 获得不同冷冻速率下两种苹果和芒果的显微图像, 以及硬度、弹性模量等质构参数, 但是, 试验研究未能获得细胞不可逆转损伤的关键点信息^[20,21]。Wang 等研究蘑菇、菜豆、西蓝花和豌豆等四种蔬菜冻结特性, 给出经过烫漂处理后不同冻结方式下细胞组织的变化和质量变化信息^[22]。Delgado 和 Rubiolo 研究草莓速冻问题, 利用扫描电镜观察冻结速率和解冻速率对细胞微观结构的影响, 给出 1.5 °C/min 的降温速率可获得较完整的组织结构, 而较高的解冻速率不能恢复已经损伤的细胞膜, 但是对于提高解冻后草莓的持水性有较好的效果^[23]。Sousa 等研究木莓和黑莓冷冻问题, 结合氯化钙和低甲氧基果胶渗透预处理, 发现降温速率木莓 3.3 °C/min、黑莓 2.2 °C/min 均可获得较好的质构^[24]。Maestrelli 等研究甜瓜冷冻预处理问题, 发现速冻前除去部分水分有利于保持甜瓜解冻后的质构^[25]。Goral 等研究甜菜红、孢子甘蓝、欧芹、胡萝卜、白萝卜、小红萝卜和马铃薯等 7 种蔬菜速冻问题, 用扫描电镜和剪切力等指标评价两种速冻方式对质量的影响, 认为用最大剪切力评价冷冻对蔬菜组织结构的影响缺乏可靠性, 并提出合理的弹性指标将能更好地评价细胞组织的完整性^[26]。超声波辅助食品冻结过程中可加速冰晶形成、影响冰晶大小及分布, 并且提高传热传质效率, 提高食品冻结速率, 改善冻结食品品质^[27]。Li 等采用 25 kHz、15.85 W

的超声波结合浸渍冷冻工艺加工马铃薯条, 与普通浸渍冷冻相比, 超声波辅助浸渍冻结的冷冻时间有显著缩短。从马铃薯条冷冻切片观察(CEM), 冰晶小、分布均匀都减小细胞的机械损伤^[28-29]。Zheng 等同样采用超声波辅助冷冻来提高食品冻结速率, 从而改善冻结食品的品质^[30]。

3 不同加工条件对蔬菜营养品质的影响

蔬菜除了能提供人类生命所需要的碳水化合物、脂肪和蛋白质等能量外, 还提供人类维持生命代谢过程中的重要物质, 包括维生素和维生素前体(如维生素 C、 β -胡萝卜素、番茄红素、叶黄素)和人体所需要的微量元素、矿物质以及生物活性物质。Lemmens 等研究了不同热处理条件下对胡萝卜细胞结构的影响, 并分析了细胞结构对胡萝卜素的释放影响, 研究发现胡萝卜组织硬度与细胞结构、营养释放和保持有着密切的关系^[31]。Houben 等比较研究了西兰花、胡萝卜和番茄的细胞结构差异, 从而发现不但三种蔬菜细胞壁物质果胶和半纤维素组成不同, 同一种蔬菜不同部位的组织成分也有所差异, 这种差异对蔬菜质构和营养吸收均产生影响^[32]。研究发现, 与蒸汽烫漂和微波烫漂相比, 热水烫漂具有较低的干物质和糖含量, 这与随温度升高, 时间延长, 细胞内部膨胀压力增加, 细胞膜和细胞壁破裂, 可溶性固体物质溶入烫漂水中, 造成营养物质流失有关^[33]。

4 总 结

综上所述, 国内外学者对蔬菜烫漂、速冻等单一环节进行了大量的研究, 并获得一定加工条件下的组织变化信息。然而, 在力学性能与营养品质关系研究方面, 这些研究或均局限于加工工艺对材料力学性能的影响; 或局限于加工条件对酶活性等品质的影响, 在食品化学和力学之间缺乏内在关联性的研究。利用生物化学分析方法、微观结构检测方法和力学性能分析方法, 找出蔬菜加工过程中更一般性的化学成分变化与细胞组织物理凝聚态变化、力学性能变化之间的内在关系, 对于提高蔬菜加工质量具有指导意义。从食品科学与工程角度看, 解决了蔬菜营养、卫生和质构三方面的内在关联问题, 为蔬菜加工与配送提供了更全面、更合理的分析与评价方法。

参考文献

- [1] 李中华, 王学辉. 含气调理食品加工新技术在舰艇远航食品中的应用[J]. 海军医学杂志, 2007, (28): 330-332
- [2] Roy SS, Taylor TA, Kramer HL. Textural and ultrastructural changes in carrot tissue as affected by blanching and freezing[J]. J Food Sci, 2001, 66(1): 176-180.
- [3] Sila DN, Smout C, Elliot F, *et al.* Non-enzymatic depolymerization of carrot pectin: toward a better understanding of carrot texture during thermal processing[J]. J Food Sci, 2006, 71(1): E1-E9.
- [4] Tansey F, Gormley R, Butler F. The effect of freezing compared with chilling on selected physico-chemical and sensory properties of sous vide cooked carrots[J]. Innov Food Sci Emerg, 2010, (11): 137-145.
- [5] Jaworska G, Bernas E. Effects of pre-treatment, freezing and frozen storage on the texture of *Boletus edulis*(Bull. Fr.) mushrooms[J]. Int J Refrig. 2010, (33): 877-885.
- [6] 孔祥佳, 郑俊峰, 林河通, 等. 热处理对果蔬贮藏品质和采后生理的影响及应用. 2010 国际农业工程大会论文集, 4-149-4-519
- [7] 翟迪升. 速冻荷兰豆生产中热烫和单体速冻工艺的优化研究[J]. 食品工业科技, 2002, 7: 51-54
- [8] 张素文, 张懋, 孙金才. 水分含量对西蓝花玻璃化转变温度的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2008, 27(3): 28-32
- [9] Li Q, Li D, Wang LJ, *et al.* Dynamic viscoelastic properties of sweet potato studied by dynamic mechanical analyzer[J]. Carbohydr Polym, 2010, (79): 520-525.
- [10] Kidmose U, Kaack K. Changes in Texture and Nutritional Quality of Green Asparagus Spears (*Asparagus officinalis* L.) during Microwave Blanching and Cryogenic Freezing [J]. Soil Plant Sci, 1999, 49: 110-116.
- [11] 李瑜, 郑磊, 詹丽娟. 微波烫漂对速冻怀山药品质的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(17): 1002-6630.
- [12] Hind A, Luc M, Eugène V. Blanching of Strawberries by Ohmic Heating: Effects on the Kinetics of Mass Transfer during Osmotic Dehydration[J]. Food Biotechnol, 2010, 3: 406-414.
- [13] Moreno J, Simpson R, Sayas M, *et al.* Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. Packham's Triumph) [J]. J Food Eng, 2011, 104: 621-627.
- [14] Bates DM, Bagnall WA, Bridges MW. Modifying viscosity of pureed vegetable matter, includes applying low-frequency ultrasonic energy to puree via sonotrode such that cavitation of water fraction in puree is induced, in: Mars Inc. CSIRO, 2004, pp. 1562446-A1562441.
- [15] Curulli F, Klingler M, Mawson RF, *et al.* potato elements, of plant tissue involves applying acoustic energy with selected frequency, energy and time profile to modify cellular structure of the food elements, in: SIMPLOT AUSTRALIA PTY LTD (SIMP-Nonstandard) CURULLI F (CURU-Individual) KLINGLER M (KLIN-Individual), 2007, pp. 1937086-A1937081.
- [16] Pertaya N, Marshall CB, Celik Y. Direct Visualization of Spruce Budworm Antifreeze Protein Interacting with Ice Crystals: Basal Plane Affinity Confers Hyperactivity[J]. Biophys J, 2008, (95): 333-341.
- [17] Inada T, Modak PR. Growth control of ice crystals by poly(vinyl alcohol) and antifreeze protein in ice slurries[J]. Chem Eng Sci, 2006, (61): 3149-3158.
- [18] Faydi E, Andrieu J, Laurent P. Experimental study and modeling of the ice crystal morphology of model standard ice cream. Part I: Direct characterization method and experimental data[J]. J Food Eng, 2001, (48): 283-291
- [19] Mousavi R, Miri T, Cox PW, *et al.* A novel technique for ice crystal visualization in frozen solids using X-ray micro-computed tomography[J]. J Food Sci, 2005, 70(7): E437-E442.
- [20] Chassagne-Berces S, Poirier C, Devaux MF, *et al.* Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing[J]. Food Res Int, 2009, (42):788-797.
- [21] Chassagne-Berces S, Fonseca F, Citeau M, *et al.* Freezing protocol effect on quality properties of fruit tissue according to the fruit, the variety and the stage of maturity[J]. Lwt, 2010, (43): 1441-1449.
- [22] Wang HY, Zhang SZ, Chen GM. Experimental study on the freezing characteristics of four kinds of vegetables[J]. Lwt, 2007, (40): 1112-1116.
- [23] Delgado AE, Rubiolo AC. Microstructural changes in strawberry after freezing and thawing processes[J]. Lwt, 2005, (38): 135-142.
- [24] Sousa MB, Canet W, Alvarez MD, *et al.* Effect of processing on the texture and sensory attributes of raspberry(cv. Heritage) and blackberry(cv. Thornfree)[J]. J Food Eng, 2007, (78): 9-21.
- [25] Maestrelli A, Scalzo RL, Lupi D, *et al.* Partial removal of water before freezing: cultivar and pre-treatments as quality factors of frozen muskmelon[J]. J Food Eng, 2001, (49): 255-260.
- [26] Goral D, Kluza F. Cutting test application to general assessment of vegetable texture changes caused by freezing[J]. J Food Eng, 2009, (95): 346-351.
- [27] McClements J. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing[J]. Trends Food Sci Tech, 1995, 6: 293-

- 299.
- [28] Li B, Sun DW. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing [J]. *J Food Eng*, 2002, 55(3): 277–282.
- [29] Li B, Sun DW. Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing [J]. *J Food Eng*, 2003, (57): 337–345.
- [30] Zheng LY, Sun DW. Ultrasonic acceleration of food freezing. In D. W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing*[J]. London, UK: Academic Press, Elsevier, 2005.
- [31] Lemmens L, Van Buggenhout S, Oey I, *et al.* Towards a better understanding of the relationship between the b-carotene in vitro bio-accessibility and pectin structural changes: A case study on carrots[J]. *Food Res Int*, 2009, (42): 1323–1330.
- [32] Houben K, Jolie RP. Comparative study of the cell wall composition of broccoli, carrot, and tomato: Structural characterization of

the extractable pectins and hemicelluloses[J]. *Carbohydr Res*, 2011, (346): 1105–1111.

- [33] Oliveira FFA, Silva CLM. Freezing influences diffusion of reducing sugars in carrot cortex[J]. *J Food Sci*, 1992, 57: 932–934.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



许丛丛, 博士研究生, 主要从事食品生物技术研究。

E-mail: 18801900840@163.com



李云飞, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品贮藏与加工研究。

E-mail: yfli@sjtu.edu.cn

“食品农药残留检测”专题约稿

食品中农药超标、违规使用, 正在成为农产品质量安全的源头之祸。近来出现的有毒豇豆、毒韭菜事件都与之相关。与此同时, 食品中农药残留检测技术发展也越来越快。

鉴于此, 本刊特别策划了“食品农药残留检测”专题, 由国家食品安全风险评估中心赵云峰教授担任专题主编, 围绕食品中农药残留的**检测方法(检测新技术、快速检测技术、多残留检测技术等)**、**残留分布与消除规律、风险评估、检测机理**等多方面展开讨论, 计划在**2013年初**出版。编辑部特向各位专家诚征惠稿, 综述、研究论文均可, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。请在**2012年12月15日**前通过网站或Email投稿。我们将快速处理并优先发表专题论文。

投稿方式:

网站: www.chinafoodj.com

Email: jfoodsq@126.com

《食品安全质量检测学报》编辑部