

竹笋采后木质化研究进展

董春风^{1,2}, 赵一鹤^{2*}

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 云南昆明 650233; 2. 云南省林业和草原科学院, 云南昆明 650021)

摘要 综述了近几年国内外有关竹笋采后木质化机理的研究, 主要围绕木质素、纤维素、酚类物质以及活性氧展开, 阐述了这些因素在竹笋木质化过程中的变化以及对竹笋木质化的影响, 为竹笋的采后贮藏保鲜提供理论依据和科学依据; 此外还阐述了不同保鲜方式(物理保鲜方法、化学保鲜方法和生物保鲜方法)对竹笋木质化的影响。

关键词 竹笋; 木质化; 木质素; 保鲜

中图分类号 S644.2 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)13-0016-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.13.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Post-harvest Lignification of Bamboo Shoots

DONG Chun-feng^{1,2}, ZHAO Yi-he² (1. School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650233; 2. Yunnan Academy of Forestry and Grassland, Kunming, Yunnan 650021)

Abstract In recent years, the research on the mechanism of post-harvest lignification of bamboo shoots at home and abroad has been reviewed, mainly focusing on lignin, cellulose, phenolic substances and active oxygen, the changes of these factors in the process of bamboo shoot lignification and their impact on bamboo shoot lignification are expounded, providing theoretical and scientific basis for the post-harvest storage and preservation of bamboo shoots. In addition, the effects of different preservation methods (physical preservation method, chemical preservation method and biological preservation method) on the bamboo shoots' lignification are also described.

Key words Bamboo shoot; Lignify; Lignin; Preservation

竹笋是竹鞭或秆基上的芽萌发分化而形成的膨大的芽和幼嫩的茎, 是一种经典的高蛋白、低脂肪的森林蔬菜, 深受人们喜爱^[1]。竹笋营养价值高, 富含碳水化合物、蛋白质、膳食纤维和微量元素, 因此有“素食第一品”之称^[2]。采后竹笋仍是一个不断在进行各种形式生理活动的有机体, 生理活动的进行会加速消耗竹笋中含有的营养物质, 加上竹笋大多产于偏远的山区或是农村, 运输到被食用的过程时间跨度大, 对竹笋的外观和可食用性都产生影响。

竹笋采收后很快出现木质化, 丧失鲜嫩可口的食用品质, 成为竹笋产业发展的重要限制因素^[3]。木质化, 即竹笋中含有各种酚类物质, 聚合形成黑褐色物质, 而在有氧的情况下, PPO 将迅速地催化酚类物质氧化成醌类, 与此同时, PPO 通过参与酚类物质的氧化过程, 促进了木质素的合成^[4-5]。研究竹笋采后的木质化机理有利于确定竹笋的最佳贮藏保鲜流程, 对采后竹笋进行贮藏保鲜有利于维持竹笋采后到被食用前这段时期内的品质, 以达到市场对竹笋的需求。笔者从采后竹笋木质化机理和不同处理对竹笋木质化的影响 2 个方面综述了近几年国内外竹笋采后木质化的研究进展。

1 采后竹笋木质化机理研究进展

关于采后竹笋木质化的问题, 国内外的研究报道很多。大多都以绿竹笋^[6]、雷竹笋^[7-8]、毛竹笋^[4]、高节竹笋^[2]等为研究对象。竹笋采收后仍是一个活的有机体, 还会进行呼吸作用、蒸腾作用等生理活动。生理活动通常会加速维生素、

总糖等营养物质的消耗, 使其重量下降、水分丢失、贮藏物质转化、硬度迅速增加^[9-10]。竹笋的木质化主要表现在纤维素和木质素含量的增加, 笋体变硬, 含水量降低, 营养成分减少, 笋体颜色由白色变为黄色直至褐色等^[11], 这种竹笋木质化发生过程是在一系列酶促反应下进行的。研究表明, 竹笋采收后在常温下很容易发生木质化, 一般情况下来说, 常温贮藏 24 h 就会有 60% 的部位发生木质化, 48 h 后几乎失去使用价值^[12]。罗自生^[13]通过对竹笋贮藏期间的木质化变化及调控机理的研究, 认为木质素的积累是导致竹笋老化及影响其品质的重要原因。

1.1 木质素含量的变化 植物的细胞壁成分主要包括木质素、纤维素、半纤维素三大组成部分。木质素主要由 4-羟基苯丙素类(4-hydroxyphenylpropanoids)氧化生成, 是一种不均一的大分子聚合物^[14]。木质素是经莽草酸-苯丙烷途径所产生的对香豆醇、芥子醇和松柏醇经过氧化物酶脱氢聚合而形成的^[2, 15-16]。木质素在细胞壁中的憎水性最强, 可对多糖组分起包围和结壳作用, 主要作用是通过形成交织网来硬化细胞壁, 为次生壁主要成分^[14]。

竹笋的木质化以酚类物质为前体, 在植物体内经过一系列的酶促作用下进行。在竹笋木质化过程中 PAL 和 POD 起着重要作用。PAL 是苯丙烷途径的限速酶, 它的活性高低制约着木质素 3 种芳香醇的产量, POD 则把这 3 种芳香醇聚合成木质素。PAL 和 POD 活性变化可以反映植物组织木质化速率^[17]。Harborne^[18]关于多种植物的研究表明, 在植物木质化组织中不仅有着较高的 PAL 活性, 还伴随着木质素含量的增加, 而在植物的非木质化组织中不能检测到 PAL 活性, 表明 PAL 与木质素的形成息息相关。

竹笋木质化与木质素息息相关。席屿芳等^[19]研究发现, 木质素的含量在贮藏过程中都逐渐增加, 直观的表现就

基金项目 云南省高新技术产业发展项目(云高新产业发展 201706); 云南省“云岭产业技术领军人才”项目(云发改人事[2018]212 号)。

作者简介 董春风(1994—), 女, 云南大理人, 硕士研究生, 研究方向: 竹笋采后生理变化。* 通信作者, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事丛生竹资源高效利用研究。

收稿日期 2020-01-03; **修回日期** 2020-02-24

是竹笋的衰老。刘尊英^[20]在绿芦笋采后木质化机理的研究中发现,贮藏过程中绿芦笋木质素含量增加,且绿芦笋顶部木质素含量始终低于基部。毛竹笋不同部位木质化程度不同,木质素含量也不同,沿着竹笋生长方向,木质素含量由上部到下部逐渐增加^[3]。张慧^[2]以高节竹笋和毛竹笋为试验材料,研究了2种竹笋的采后木质化发生,发现常温条件下,高节竹笋6 d内分别增加了8.22%和6.24%,毛竹笋9 d内分别增加了7.50%和5.94%。谢碧霞等^[21]研究发现,由笋尖到基部竹笋PAL和POD活性逐渐增强,纤维素和木质素含量逐渐增大。周琦等^[7]研究指出,在冷藏过程中,鲜切雷竹笋木质素含量呈一直上升趋势。

新采挖的竹笋鲜嫩,其纤维素、木质素含量都较低^[21],在竹笋采后木质化的过程中,木质素含量增加,木质素深入到细胞壁中,填充于纤维素骨架内,加大了细胞壁的厚度与硬度^[12,22],从而造成了竹笋木质化。

1.2 纤维素的沉积 纤维素、半纤维素是竹笋细胞壁的主要成分。竹笋采后的木质化进程不仅包括木质素含量的变化,还包括纤维素、半纤维素的沉积。纤维素、半纤维素含量随着生长发育时期和环境条件的变化而变化。多糖是构成细胞壁物质纤维素、半纤维素的主要成分,细胞壁多糖在细胞壁中大量沉积会使细胞壁增厚,纤维素大量合成并形成纤维束,随之也进行着木质素合成并沉积于纤维束网格中,从而发生木质化,影响果蔬品质^[23-24]。

纤维素的含量是衡量竹笋老化的指标之一。张慧^[2]比较高节竹笋和毛竹笋采后贮藏过程中的各项指标发现,常温条件下,2种竹笋的硬度随着时间的变化逐渐升高,表明2种竹笋随着时间的变化都在发生木质化。结果显示在竹笋的贮藏过程中,随着木质化加深,纤维素和木质素含量均有显著增加,且高节竹笋采后贮藏过程中的木质化速率高于毛竹笋,这与王敬文^[25]的研究结果一致,王敬文研究发现高节竹笋、毛竹笋在25℃下放置4 d, PAL、POD活力大幅度增加,木质素和纤维素不断积累,最后丧失可食性。赵丹^[26]研究不同贮藏温度下采后麻竹笋的品质变化发现,纤维素含量随着时间的延长逐渐增加,且33℃贮藏条件下增加的幅度大于23℃。Luo等^[27]研究表明,采后雷竹笋的硬度增大,纤维素和木质素含量也增加,硬度与木质素、纤维素含量之间呈正相关关系。余学军^[28]测定不同贮藏温度下绿竹笋的各项指标发现,木质素和纤维素含量持续增加,且常温贮藏竹笋纤维素含量增加速率比低温贮藏的快,这与王敬文^[25]的研究结果一致。刘尊英等^[29]研究发现,绿芦笋贮藏过程中,以纤维素为主要来源的葡萄糖残基含量逐渐增加,以半纤维素为主要来源的木糖残基、岩藻糖残基含量也显著增加,表明绿芦笋采收后,在无外源营养物供应的条件下,其组织中的纤维素、半纤维素合成代谢仍在继续进行,这与Redondo-Cuenca等^[30]的研究结果是一致的。

1.3 酚类物质的变化 酚类物质是植物的主要次生代谢产物,广泛分布于蔬菜、水果、香料、谷物、豆类和果仁等各种高等植物器官中,对植物的品质、色泽、风味等有一定的影

响^[31]。酚类物质是合成木质素的前体,其含量和种类对木质素合成有重要影响,酚类物质自身的氧化交联和形成的二聚体也可使细胞壁增厚,促进植物组织木质化^[32]。其次,竹笋老化过程中发生褐变的实质是醌类物质聚合形成黑褐色的物质,在有氧的情况下PPO迅速地催化酚类物质氧化成醌类^[4];与此同时,PPO通过参与酚类物质的氧化过程,促进了木质素的合成。

周琦等^[7]研究表明,鲜切雷竹笋在冷藏过程中多酚含量下降而木质素含量上升,这是由于酚类物质作为木质素合成的前提物质,在鲜切雷竹笋冷藏过程中参与了木质素的合成。这与Lichanporn等^[33]研究龙宫果褐变机制中多酚含量的变化趋势一致。赵宇瑛^[34]研究栅栏技术对毛竹笋采后品质劣变的调控作用发现,总酚含量呈上升趋势,且栅栏技术处理的总酚含量显著高于对照,表明处理组抑制了竹笋的木质化进程。赵丹^[26]研究大叶麻竹笋采后品质劣化机理发现,麻竹笋33℃贮藏时总酚含量上升幅度大于23℃贮藏,表明温度提高会加速麻竹笋总酚含量的下降。刘尊英等^[29]研究发现,绿芦笋木质化过程中木质素合成前体香豆酸、咖啡酸和阿魏酸的变化情况各不相同,表明3种前体物质在绿芦笋木质过程中所起的作用可能不同。总酚含量呈下降趋势,木质素含量则呈上升趋势,表明总酚参与了木质素的合成。

1.4 活性氧代谢 活性氧是一类氧化能力很强的含氧物质的总称,活性氧的增加能加速木质化进程,提高植物组织的木质化程度^[35]。竹笋的衰老与活性氧代谢失衡密切相关。竹笋在生长过程中有着完善的清除活性氧的防卫系统,当竹笋处于正常环境中时,细胞内活性氧的产生和清除处于动态平衡,竹笋采摘后,机械损伤、微生物感染、呼吸作用加剧等使竹笋遭到衰老和逆境胁迫,活性氧平衡遭到破坏,活性氧的产生加快,活性氧清除酶活性和内源抗氧化物质含量下降,导致竹笋体内自身活性氧代谢失调,活性氧大量积累,诱发膜脂过氧化,促进膜脂过氧化产物(MDA等)的增加和细胞膜结构的破坏,从而加快竹笋组织衰老^[36]。

席屿芳等^[19]研究发现,竹笋贮藏期间随着H₂O₂含量持续上升的同时木质素含量也在增加,表明采后竹笋的木质化过程与活性氧代谢密切相关。Milosevic等^[37]研究发现,由于赤豆中活性氧清除酶系统的不协调而导致的H₂O₂积累和POD活性的上升,使木质素含量显著增加。芮怀瑾等^[38]研究表明,抑制活性氧代谢失调造成的H₂O₂积累和POD活性的升高,可抑制冷藏枇杷果实的木质素合成,延缓木质化进程。陈惠云^[35]研究表明,毛笋在贮藏过程中SOD、CAT和APX活性呈下降趋势,而O₂⁻和H₂O₂产生量不断增加,导致活性氧的积累,加剧了细胞膜脂的过氧化进程,使细胞膜区域化遭到破坏,细胞膜透性上升,膜脂过氧化产物MDA大量积累,最终导致了组织木质化。刘尊英^[20]研究表明,绿竹笋贮藏过程中,H₂O₂含量显著增加,木质素含量增加,表明采后绿芦笋木质化过程与活性氧代谢密切相关,O₂⁻、H₂O₂含量的增加促进采后绿芦笋木质化进程。这与桃^[39]、杏鲍

菇^[40]、苹果^[41]和枇杷^[42]等的贮藏过程中, H₂O₂ 含量呈上升趋势, 随 H₂O₂ 升高, 乙烯合成加速, 同时促进酶蛋白降解和膜脂过氧化, 加速衰老的研究结果一致。

2 不同保鲜方法对竹笋木质化的影响

竹笋为竹的嫩芽, 其营养价值丰富, 是一种高纤低脂高蛋白的天然保健食品。我国虽具有丰富的竹类资源, 但竹笋出笋季节集中, 常温下很容易木质化, 限制了竹笋大规模的生产和流通。延缓竹笋的木质化进程对延缓竹笋的老化, 保持竹笋的品质, 实现竹笋的食用价值和经济价值具有重要意义。目前, 对于竹笋的保鲜方法非常多。将其分为物理保鲜方法、化学保鲜方法、生物保鲜方法等。保鲜方法多种多样, 但其重点都在于在采后贮藏过程中降低细胞生理活动、减少病源危害, 减少因竹笋的生理活动和微生物侵染引起的失重、褐变和老化, 以达到保持竹笋食用品质和功能特性的目的^[43]。

2.1 物理保鲜方法对竹笋木质化的影响 竹笋的物理保鲜方法包括低温贮藏、减压贮藏、热处理、气调包装、超声波以及辐射技术等方法。主要是使用控制贮藏环境条件和微生物控制的手段来延缓竹笋贮藏过程中的木质化进程。

2.1.1 低温贮藏。竹笋在常温下贮藏 24 h 便会有 60% 的部位发生木质化, 48 h 后便会丧失食用性, 这是由于竹笋采摘离体后仍在进行一系列的生理活动, 水分流失、呼吸作用加剧、贮藏物质转化等, 而采摘竹笋给竹笋带来的机械损伤和微生物侵染也会加快竹笋的变质。低温能够抑制微生物的生长繁殖、酶活性及采后果蔬自身呼吸作用, 也可降低非酶因素引起的化学反应速率, 以达到延长果蔬保质期的目的^[43]。李素清等^[44]以楠竹笋为研究对象, 将热处理后的楠竹笋分别置于 (5±1) °C、(10±1) °C 贮藏条件下进行贮藏, 结果表明, 在 5 °C 左右低温贮藏能够有效降低竹笋的失重率, 减缓总糖含量及含酸量, 降低楠竹笋木质化的速率, 减轻褐变, 延缓竹笋衰老。目前, 有研究往冰温贮藏方向发展, 与冷藏相比, 冰温贮藏能有效抑制麻竹笋的呼吸作用和木质化进程, 延缓麻竹笋老化^[45], 但在实际应用中, 冰温贮藏技术还有待进一步研究。

2.1.2 气调包装贮藏。竹笋采后的气调贮藏就是调整竹笋贮藏环境的气体成分, 造成低氧高二氧化碳环境, 以抑制笋体的新陈代谢和微生物的活动, 达到保鲜目的^[12]。陆胜民等^[46]用聚乙烯袋内充气体成分为 2% O₂、5% CO₂ 和 93% N₂ 的气调袋装去壳雷笋并于 10 °C 下贮藏, 显著抑制了酶的活性及木质素和纤维素的合成, 延长了保鲜期。陈学红等^[47]使用高氧气调包装贮藏绿芦笋, 研究结果表明高氧气调包装可以减缓绿芦笋的失重, 抑制叶绿素的降解, 抑制 PAL 和 POD 的酶活性的上升进而抑制木质素含量的上升, 对保持绿芦笋的品质、抑制绿芦笋的木质化起到明显的作用。陆东和等^[48]研究发现, 采用 MAP 冷藏(最适温度为 1.9 °C)并结合不同的包装材料能有效控制竹笋的失重、木质化、褐变程度和硬度增加, 冷藏 49 d 后仍能保持较好的食用价值。

2.1.3 减压贮藏。减压贮藏是指在传统的低温和气调贮藏

的基础上, 降低贮藏环境内气体压力到一定程度, 使果蔬处于低氧环境中, 并始终持恒定的低压水平的一种保鲜方法^[49]。减压贮藏给竹笋造就了一个低 O₂ 高 CO₂ 的环境, 在减压条件下, 乙烯的合成受到抑制, 呼吸作用减弱, 还抑制了微生物的生长发育, 还有杀灭害虫的作用, 防止和减少了某些生理病害的产生, 延长了果蔬的贮藏期, 保持了新鲜果蔬的品质、硬度和色泽等^[35]。陈惠云^[35]使竹笋在 50 kPa、(2±1) °C、90%~95% 相对湿度条件下存储 35 d, 结果表明减压贮藏显著抑制木质素、纤维素的累积、硬度的增加和乙烯生产, 陈文烜等^[50]的研究结果与其一致, 在 (0±0.5) °C、减压条件下贮藏春笋, 结果表明, 减压贮藏可以显著降低春笋贮藏期的呼吸强度, 能较好地防止木质化的发生和硬度的上升, 能够有效控制 SOD 和 POD 活性, 并减少 H₂O₂ 的积累, 从而有效地保持了膜完整性、减缓衰老进程、大幅延长贮藏时间。

2.1.4 热处理。热处理就是使用微波处理、热烫处理等杀死或钝化竹笋表面的害虫和病原菌, 同时改变果蔬采后某些代谢过程, 达到保鲜贮藏的目的。热处理是国内外广泛研究的一种安全高效的物理保鲜技术^[51], 它可以提高果蔬的抗冷性^[52]、增强细胞抗氧化胁迫能力^[53]。罗自生等^[54]研究发现, 竹笋经过 80 °C 热处理后在 (4±1) °C 下贮藏, 硬度、纤维素、木质素和原果胶含量低于对照。李素清等^[44]研究发现用 45 °C 热水处理楠竹笋 5 min, 可以降低呼吸强度、抑制酶活性, 在 (5±1) °C 贮藏 12 d 后, 仍具有良好的感官品质, 但罗自生等^[55]研究发现 50 °C 热水处理会对笋体产生热伤害, 不利于竹笋的贮藏。

2.2 化学保鲜方法对竹笋木质化的影响 化学保鲜法主要是利用单一或多种外源化学物质对竹笋进行浸泡、喷洒等处理达到降低竹笋褐变程度, 进而保持竹笋营养品质和风味^[48]。在竹笋上使用的化学保鲜药剂有防腐剂、保鲜剂和生长抑制剂。化学保鲜剂是通过改变笋体内激素水平来降低竹笋采后生理活性, 减少笋体表面及体内微生物侵染引起的生理病害, 减缓因生理活动导致的失重、腐败和组织结构的衰老, 达到竹笋保鲜的目的^[44, 56]。化学保鲜药剂种类很多, 出于对食品安全的考虑, 大多选择安全的天然保鲜剂对竹笋进行保鲜。

由于赤霉素(GA₃)无残留、无毒害、无残留的特点, 近年来赤霉素被广泛运用于竹笋保鲜研究。罗自生^[57]采用 50 mg/kg 的赤霉素浸泡竹笋 30 min 后晾干, 用聚乙烯袋包装后置于 2 °C 低温条件下贮藏, 可抑制 PAL 和 POD 活性上升, 降低木质素含量和硬度, 延缓木质化进程, 这是由于赤霉素对植物的生长发育和基因表达具有调控作用, 可以抑制 PAL 活性; 张规富等^[58]以雷竹笋为材料, 得出结果与其一致。近年来, 1-甲基环丙烯(MCP)也是一种广泛用于竹笋保鲜的无毒的乙烯抑制剂。白瑞华等^[59]使用聚乙烯薄膜包装结合保鲜剂(主要成分为 1-MCP)对雷竹笋进行保鲜研究, 结果表明, 薄膜与固体保鲜剂协同处理可明显防止雷竹笋霉变, 减缓果肉纤维化及失重, 抑制笋体老化。陈惠云^[35]研究

也表明采用 1-MCP 处理降低了竹笋采后乙烯释放速率,抑制了 PAL、CAD 和 POD 活性以及木质素和纤维素的合成,延缓老化,这与宋卤哲等^[60]的研究结果一致,1-MCP 可以抑制乙烯的合成,对采后竹笋的保鲜具有重要作用。竹笋在贮藏过程中会产生乙烯,而利用臭氧可以使乙烯氧化。刘维^[61]在臭氧浓度为 150 mg/L 条件下处理白夹竹笋 1 h 后,在 0 °C 条件下贮藏,发现可以较好地抑制酶活性,保持较高的 V_C、蛋白质、还原糖含量和较低的 MDA 含量,可以延缓竹笋的衰老。臭氧不仅杀菌消毒能力强,而且使用以后对农产品无公害无残留和无二次污染,近年来臭氧保鲜技术广泛应用于竹笋产品的保鲜,具有广泛的发展前景。涂膜保鲜是一种常用的化学保鲜方法,可以延缓竹笋老化,延长竹笋的经济寿命,涂膜材料有很多种,如壳聚糖、魔芋葡甘聚糖涂膜、蛋白质膜、动物脂类化合物膜等,涂膜保鲜的应用在国内外已有广泛研究。赵宇瑛等^[62]采用 5 mmol/L 草酸溶液为溶剂制成 1.5%壳聚糖涂膜液,对绿竹笋进行涂膜保鲜试验,结果表明,壳聚糖涂膜处理可以降低绿竹笋的木质素、纤维素含量和 PAL 活性,从而延缓绿竹笋的木质化进程。郑晓玲^[63]采用浓度 0.4%和 0.6%的魔芋多糖涂膜液涂于绿竹笋的横切面处进行试验,魔芋葡甘聚糖涂膜处理能延缓 PAL、POD 等这类笋体木质化相关酶活性的上升,尤其是 0.6%的 KGM 涂膜处理的绿竹笋,其 PAL 和 POD 活性在试验过程中变化幅度小,木质素、纤维素含量的增加也小。周刚等^[64]利用 0.6%的魔芋葡甘聚糖涂膜保鲜麻竹笋,杨乐等^[65]利用魔芋多糖添加一定配比的卡拉胶、羧甲基纤维素钠和海藻酸钠制备的复合涂膜剂保鲜方竹笋均取得较好的效果,表明魔芋多糖涂膜是理想的竹笋保鲜方式。此外,已有研究表明将多种保鲜技术相结合可以达到良好的保鲜效果。如黄程前^[4]研究发现,UV-C(短波紫外线)结合 ClO₂ 处理可以有效地抑制鲜切毛竹笋 PAL、PPO 和 POD 活性,减少木质素的合成以及 MDA 的积累。

2.3 生物保鲜方法对竹笋木质化的影响 由于在保鲜中常用的化学保鲜防腐剂如亚硫酸钠、焦亚硫酸钠、苯甲酸及其钠盐等具有一定的有害残留危害,而气调保鲜、低温贮藏、微波等技术又因成本、操作难等限制,难以推广利用^[43],现如今,竹笋的保鲜往生物保鲜方向拓展,以寻求更佳方式运用于竹笋产业。生物保鲜技术是利用自然或人工控制的微生物菌群和(或)它们产生的抗菌物质来延长食品的货架期和提高食品的安全性,常见的生物保鲜技术种类包括拮抗菌、基因工程、天然提取物质以及酶制剂等^[66]。郑炯等^[67]对壳聚糖、魔芋葡甘聚糖、乳酸链球菌素(Nisin)、茶多酚、纳他霉素、乳酸钠、抗坏血酸和海藻酸钠 8 种天然保鲜剂进行筛选和复配得到一种天然复合保鲜剂,然后用天然复合保鲜剂处理新鲜麻竹笋,发现用天然复合保鲜剂处理过的麻竹笋呼吸强度、PAL 和 POD 活性、木质素含量都低于对照组,表明天然复合保鲜剂可以延缓麻竹笋在贮藏过程中的木质化程度。

3 结论与展望

竹笋是一种具有经济价值的健康食品,营养价值高,深

受人们喜爱。但竹笋采摘后在常温下容易发生木质化,失去食用价值。探索竹笋采后的木质化机理以及采取合适的贮藏保鲜方式对竹笋产业的发展具有重要的意义。目前,关于竹笋木质化机理的研究很多,大多都是围绕竹笋老化过程中的木质素、纤维素、酚类物质、活性氧和酶活性的动态变化展开,结果表明这些因素都与竹笋老化有关,可以从这些角度出发,为竹笋的贮藏保鲜提供理论依据和科学依据。其次,目前对于竹笋的采后生理研究大多以麻竹笋、雷竹笋、绿竹笋等为研究对象,应加强对其他大型丛生竹的采后生理的研究,如甜龙竹、方竹等。还有从相关文献来看,竹笋的保鲜方式很多,并对延缓竹笋木质化取得一定成效,但不同处理方式各有其优缺点,应大力加强对物理保鲜、天然化学保鲜剂、生物保鲜技术的研究,或采取多种保鲜方式相结合的方法进行探究其对竹笋木质化的影响,为竹笋保鲜提供有力的新依据^[68]。

参考文献

- [1] 白瑞华,丁兴萃,王树东.竹笋生长期营养及安全品质的分析[J].食品科学,2011,32(5):281-283.
- [2] 张慧.两种竹笋采后木质化的发生及褪黑素的保鲜作用机制[D].杭州:浙江农林大学,2018.
- [3] 王杰.竹笋细胞壁木质化及转录组差异基因表达分析与功能初探[D].南京:南京农业大学,2016.
- [4] 黄程前.鲜切毛竹笋生理生化变化及保鲜技术研究[D].杭州:浙江农林大学,2014.
- [5] 黄程前,姚榕燕,杨虎清,等.UV-C 结合 ClO₂ 处理对鲜切毛竹笋的保鲜作用[J].安徽农业科学,2013,41(28):11506-11508.
- [6] 肖丽霞.绿竹笋采前品质相关影响因素和采后生理特性研究[D].北京:中国农业大学,2005.
- [7] 周琦,陈季旺,高俊,等.鲜切雷竹笋贮藏过程中木质化机理的研究[J].食品科学,2012,33(14):307-311.
- [8] 申德省.鲜切雷竹笋木质化和褐变的控制研究[D].杭州:浙江工商大学,2015.
- [9] 罗自生,张莉.臭氧处理对竹笋木质化及相关酶活性的影响[J].农业机械学报,2010,41(11):115-118.
- [10] SHEN Q, KONG F C, WANG Q. Effect of modified atmospheres packaging on the browning and lignification of bamboo shoots[J]. Journal of food engineering, 2006, 77(2):348-354.
- [11] ITOH T. Lignification of bamboo (*Phyllostachys heterocycla* Mitf.) during its growth[J]. Holzforschung, 1990, 44(3):191-200.
- [12] 罗晓莉,曾凯芳.竹笋的采后生理及贮藏保鲜技术研究进展[J].食品科技,2006(11):239-241.
- [13] 罗自生.采后竹笋木质化与内源激素的关系[J].中国农业科学,2006,39(4):792-797.
- [14] SIMMONS B A, LOGUE D, RALPH J. Advance in modifying lignin for enhanced biofuel production [J]. Curr Opin Plant Biol, 2010, 13(3):313-320.
- [15] 古谷雅树,宫地重远,玖村敦彦.植物生理学讲座:第3卷 生长与运动[M].廉平湖,周永春,译.北京:科学出版社,1977.
- [16] KAMATA S, TERADA T. The activities of phenylalanine ammonialyase and peroxidase, rate of growth an drate of lignification[J]. Jap Wood Res Soc, 1969, 15(4):182-187.
- [17] 欧阳光察,薛应龙.植物苯丙烷类代谢的生理意义及其调控[J].植物生理学通讯,1988(3):9-16.
- [18] HARBORNE J B. Regulation of enzyme synthesis and activity in higher plants[J]. Phytochemistry, 1979, 17(10):1819-1820.
- [19] 席屿芳,罗自生,程度,等.竹笋采后活性氧代谢对木质化的影响[J].中国农业科学,2001,34(2):197-199.
- [20] 刘尊英.绿芦笋(*Asparagus officinalis* L.)木质化的生理生化基础及其调控技术研究[D].北京:中国农业大学,2003.
- [21] 谢碧霞,李安平,钟秋平,等.竹笋采后涂膜保鲜对其木质化的影响[J].中南林业科技大学学报,2008,28(4):140-144.
- [22] 王豪翔.毛竹笋采后木质素合成相关酶活性及其相关酶基因表达规律研究[D].杭州:浙江农林大学,2018.

- [23] SELVENDRAN R R, MACDOUGALL A J. Cell-wall chemistry and architecture in relation to sources of dietary fibre[J]. Europe journal of clinical nutrition, 1995, 49: 27-41.
- [24] FUJITA M, SAIKI H, HARADA H. The secondary wall formation of compression wood tracheids: 3. Cell organelles in relation to cell wall thickening and lignification[J]. Mokuzai gakkaiishi, 1978, 24:353-361.
- [25] 王敬文. 采后竹笋老化生理研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(6): 687-692.
- [26] 赵丹. 大叶麻竹笋采后品质劣化机理的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [27] LUO Z S, XU X L, CAI Z Z, et al. Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene (1-MCP) on lignification of postharvest bamboo shoot[J]. Food chemistry, 2007, 105(2): 521-527.
- [28] 余学军. 绿竹笋采后生理及鲜笋保鲜技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004.
- [29] 刘尊英, 姜微波. 绿芦笋木质化过程中细胞壁多糖与酚类物质变化研究[J]. 食品科学, 2005, 26(4): 95-97.
- [30] REDONDO-CUENCA A, VILLANUEVA-SUÁREZ M J, RODRIGUEZ-SEVILLA M D, et al. Changes in insoluble and soluble dietary fiber of white asparagus (*Asparagus officinalis*) during different conditions if storage[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 1997, 45:3228-3232.
- [31] 王玲平, 周生茂, 戴丹丽, 等. 植物酚类物质研究进展[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(5): 696-701.
- [32] WALDRON K W, NG A, PARKER M L, et al. Ferulic acid dehydromers in the cell walls of *Beta vulgaris* and their possible role in texture[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 1997, 45: 221-228.
- [33] LICHANPORN I, SRILAONG V, WONGS-AREE C, et al. Postharvest physiology and browning of longkong (*Aglaia dookoo* Griff.) fruit under ambient conditions[J]. Postharvest biology and technology, 2009, 52(3): 294-299.
- [34] 赵宇璇. 栅栏技术对毛竹笋采后品质劣变的调控作用[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 340-343, 392.
- [35] 陈惠云. 竹笋绿色保鲜贮藏技术研究与应用[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [36] 王静, 孙广宇, 姬俏俏, 等. 活性氧在果蔬采后衰老过程中的作用及其控制[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(5): 51-54, 58.
- [37] MILOSEVIC N, SLUSARENKO A J. Active oxygen metabolism and lignification in the hypersensitive response in bean[J]. Physiology and molecular plant pathology, 1996, 49(3): 143-158.
- [38] 芮怀瑾, 尚海涛, 汪开拓, 等. 热处理对冷藏枇杷果实活性氧代谢和木质化的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(14): 304-308.
- [39] 汪伟, 沈勇根, 石晶莹, 等. 外源硫化氢对桃果实保鲜效果及活性氧代谢的影响[J]. 果树学报, 2014, 31(2): 302-307.
- [40] 周拥军, 郜海燕, 陈杭君, 等. 减压贮藏对杏鲍菇采后活性氧代谢的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(6): 1108-1113.
- [41] 郑吉练. 硫化氢延缓苹果采后成熟衰老的信号机制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [42] 孙玉洁, 金鹏, 单体敏, 等. 甜菜碱处理对枇杷果实采后冷害和活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(14): 210-215.
- [43] 李梅. 竹笋发酵保鲜关键技术研究及产品开[D]. 成都: 西华大学, 2018.
- [44] 李素清, 秦文, 王家梅, 等. 贮藏温度对热处理楠竹笋保鲜效果的影响[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(4): 413-417.
- [45] 杨曼倩. 麻竹笋冰温保鲜技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [46] 陆胜民, 徐亚光. 鲜切竹笋冷藏过程中生理和生化变化的研究[J]. 中国食品学报, 2004, 4(2): 25-30.
- [47] 陈学红, 秦卫东, 马利华, 等. 高氧气调包装对绿芦笋木质化的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(22): 350-353.
- [48] 陆东和, 张愨, 蔡金龙, 等. 海芦笋硅窗气调包装工艺参数优化[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(1): 173-176.
- [49] 郑谊, 黄世能, 洗光勇, 等. 食用笋保鲜技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(33): 10837-10839.
- [50] 陈文烜, 周拥军, 陈杭君, 等. 春笋减压贮藏保鲜技术研究[J]. 食品科技, 2005(10): 80-83.
- [51] 张姿. 蔬菜采后热处理抗氧化机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [52] HE L H, CHEN J Y, KUANG J F, et al. Expression of three *hSP* genes involved in heat pretreatment-induced chilling tolerance in banana fruit[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2012, 92(9): 1924-1930.
- [53] ZHANG L, YU Z F, JIANG L, et al. Effect of post-harvest heat treatment on proteome change of peach fruit during ripening[J]. Journal of proteomics, 2011, 74(7): 1135-1149.
- [54] 罗自生, 席瑞芳, 傅国柱, 等. 竹笋采后热处理对细胞壁组分和水解酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2002, 29(1): 43-46.
- [55] 罗自生, 徐晓玲, 严碧芳. 热处理对轻度加工竹笋品质和生理的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 64-67.
- [56] GUNES G, WATKINS C B, HOTCHKISS J H. Physiological responses of fresh-cut apple slices under high CO₂ and low O₂ partial pressure[J]. Postharvest Biology and Tech, 2001, 22(3): 197-204.
- [57] 罗自生. GA₃ 处理对采后竹笋木质化及内源激素水平的影响[J]. 园艺学报, 2005, 32(3): 454-457.
- [58] 张规富, 李群. 不同保鲜处理对雷竹笋 PAL 活性的影响[J]. 天津农业科学, 2015, 21(2): 96-99.
- [59] 白瑞华, 王树东, 邵琼. 保鲜剂 1-MCP 在雷竹笋保鲜中的应用[J]. 林业科技开发, 2009, 23(2): 96-99.
- [60] 宋鹵哲, 胡文忠, 王雨全, 等. 1-MCP 处理在果蔬保鲜中的应用进展[C]//中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集. 北京: 中国食品科学技术学会, 2018.
- [61] 刘维. 白夹竹笋采后生理及臭氧低温保鲜技术的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [62] 赵宇璇, 郑小林. 壳聚糖涂膜对绿竹笋采后保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2015(3): 33-37.
- [63] 郑晓玲. 魔芋葡甘聚糖涂膜处理对绿竹笋采后生理特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [64] 周刚, 王静, 谈德寅, 等. 魔芋葡甘聚糖涂膜处理对麻竹笋采后贮藏效果的研究[J]. 长江蔬菜(学术版), 2012(4): 74-77.
- [65] 杨乐, 王洪新. 不同可食性涂膜对方竹笋保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 305-308.
- [66] 龙娅, 胡文忠, 李元政, 等. 生物保鲜技术及其在鲜切果蔬贮藏保鲜中的应用[C]//中国食品科学技术学会第十六届年会暨第十届中美食品业高层论坛论文摘要集. 北京: 中国食品科学技术学会, 2019.
- [67] 郑炯, 汤婷, 曾瑞琪, 等. 天然复合保鲜剂对麻竹笋贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 229-236.
- [68] 辛松林, 秦文, 王艳, 等. 乳酸链球菌素在生菜保鲜中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2007(2): 174-176.

(上接第 15 页)

- [60] MUNNS R, JAMES R A, LÄUCHLI A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals[J]. Journal of experimental botany, 2006, 57(5): 1025-1043.
- [61] KARP A, SHIELD I. Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge[J]. New phytologist, 2008, 179(1): 15-32.
- [62] CLIFTON-BROWN J, SCHWARZ K U, AWTY-CARROLL D, et al. Breeding strategies to improve *Miscanthus* as a sustainable source of biomass for bioenergy and biorenewable products[J]. Agronomy, 2019, 9(11): 1-17.