doi:10.3969/j.issn.1672-1292.2026.03.005

激光微孔膜包装复合 1-甲基环丙烯处理对茭白采后木质化的影响

姚　稳[1,2],余　婕[1],蔡泽田[1],于丽娟[2],孔晓雪[1],罗海波[1]

(1.南京师范大学食品与制药工程学院,江苏 南京 210023)
(2.云南省农业科学院农产品加工研究所,云南 昆明 650221)

[**摘要**] 茭白(*Zizania latifolia*)采后因木质化导致品质劣变,使其食用价值急剧下降. 论文研究了激光微孔膜(LMF)包装复合 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理对(4±1)℃贮藏茭白木质化进程的影响. 结果表明,与对照组相比,LMF+1-MCP 处理可有效阻碍木质素积聚以固化白度,减少可溶性固形物及糖类的消耗,并平抑呼吸作用与失重. 这主要得益于其对胞内活性氧(O_2^-、H_2O_2)及 MDA 积累的清除能力,而这又是通过协同提升抗氧化酶(SOD、APX、CAT)活性、同时钝化木质素生物合成路径中关键酶(PAL、C4H、4CL、CAD、LAC、POD)的活性来实现的. 以上结果表明,LMF+1-MCP 复合处理可能通过抑制营养物质流失、减少活性氧积累,降低木质素生物合成相关酶活性,最终延缓茭白在贮藏期的木质化进程. 该研究为延缓茭白采后木质化提供了新认识,并为茭白贮藏保鲜提供了新方案.

[**关键词**] 茭白,激光微孔膜,1-甲基环丙烯,木质化,活性氧,采后贮藏
[**中图分类号**]TS255.3　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1672-1292(2026)03-0040-10

Effect of Laser Microporous Film Package Combined with 1-Methylcyclopropene Treatment on Postharvest Lignification of Water Bamboo Shoots

Yao Wen[1,2],Yu Jie[1],Cai Zetian[1],Yu Lijuan[2],Kong Xiaoxue[1],Luo Haibo[1]

(1.School of Food Science and Pharmaceutical Engineering,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)
(2.Agro-products Processing Research Institute,Yunnan Academy of Agricultural Sciences,Kunming 650221,China)

Abstract:Lignification leads to a sharp decline in the postharvest edible value of water bamboo shoots (*Zizania latifolia*). This study reveals the effect of laser microporous film(LMF) packaging combined with 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on the lignification of water bamboo shoots at(4±1)℃. The results indicate that,compared to the control group,LMF+1-MCP treatment effectively inhibits lignin accumulation(thereby preserving whiteness),reduces the consumption of soluble solids and sugars,and suppresses respiration and weight loss. These effects are primarily attributed to the treatment's ability to scavenge intracellular reactive oxygen species (O_2^-、H_2O_2) and reduce MDA accumulation—mechanisms achieved by synergistically enhancing the activity of antioxidant enzymes(SOD,APX,CAT) while simultaneously suppressing key enzymes in the lignin biosynthetic pathway(PAL,C4H,4CL,CAD,LAC,POD). Our studies show that LMF+1-MCP treatment inhibits the activity of lignin synthesis -related enzymes by inhibiting nutrient loss and reducing the accumulation of reactive oxygen species,and ultimately delays the lignification process. The study provides new insights for delaying the postharvest lignification process of water bamboo shoots,and provides an innovative technical solution for the storage and preservation of water bamboo shoots.

Key words:*Zizania latifolia*,laser microporous film,1-MCP,lignification,ROS,postharvest storage

收稿日期:2025-06-09.
基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX25_0740).
通讯作者:孔晓雪,高级实验师,研究方向:食品分析. E-mail:kongxiaoxue@163.com;罗海波,博士,教授,研究方向:食品科学. E-mail:luohaibo_1216@126.com

茭白是一种水生蔬菜,因其膳食纤维含量高、营养丰富并含有多种生物活性物质,具有缓解胰岛素抵抗和脂肪毒性、预防心血管疾病等潜在健康功效,深受中国及东亚地区消费者青睐[1]. 然而,采后茭白代谢旺盛,即使在低温(4 ℃)贮藏条件下仍易发生机体组织木质化和品质劣变,这已成为其保鲜与流通面临的主要难题[2]. 因此,亟需开发科学有效的保鲜技术以延缓木质化进程、保持品质并减少采后损失.

激光微孔薄膜(laser microporous film,LMF)作为一种新型气调包装材料,通过精准调控包装内部 O_2/CO_2 气体浓度,可有效抑制果蔬呼吸强度、减少水分蒸发损失并延缓木质化进程. 该技术在呼吸跃变型水果保鲜中表现突出,可使香蕉后熟期延长 5~7 d,荔枝褐变指数降低 30%以上[3-4]. 1-甲基环丙烯(1-MCP)作为乙烯受体竞争性抑制剂,能有效阻断乙烯信号转导,可使香蕉和桃等典型呼吸跃变型果实软化度减少 20%~30%[5]. 值得注意的是,LMF 与 1-MCP 联用可产生显著的协同保鲜效应:一方面,LMF 通过微孔(孔径 50~200 μm)实现气体动态平衡,将包装内乙烯浓度控制在 0.1~0.5 μL/L;另一方面,1-MCP 可持续抑制乙烯生理作用达 7~14 d. 这种双重调控机制在桃贮藏中使货架期延长至 35 d,维生素 C 保留率提高 25%[6];在葡萄保鲜中使呼吸强度降低 15%,失重率减少 20%[7]. 除激光微孔膜(LMF)包装和 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理外,目前已有多种采后处理及栅栏技术被用于延缓茭白木质化进程,如低温贮藏结合气调包装(MAP)处理[8]、臭氧处理[9]、褪黑素处理[10]、紫外线、电化学与化学预处理的联合策略[11]等.

然而,该复合技术对木质化的作用(尤其是苯丙烷代谢途径关键酶调控)机制尚未见系统报道,其与活性氧(reactive oxygen species,ROS)代谢的互作关系同样是研究空白. 本文系统揭示了 LMF+1-MCP 复合处理对采后茭白在 4±1 ℃贮藏期间木质化的影响. 首先评估了 LMF+1-MCP 对采后茭白外观品质和营养物质含量变化的影响;然后从 ROS 含量、木质素生物合成相关酶活性等生理生化层面探究其对延缓木质化的作用. 研究成果深化了对 LMF+1-MCP 延缓采后茭白木质化作用的认识,也为茭白采后品质保持与货架期延长提供了技术支撑.

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜茭白采自江苏省宜兴市西渚希梦家庭农场,为 2024 年 5 月成熟的“美人茭”. 选择孕茭 7-10 d 的茭白进行采摘,选取长度为(25±1)cm、宽度为(5±1)cm、质量为(140±10)g 的大小均匀且无机械损伤的茭白,用适量冰袋覆盖,约 2 h 内送回实验室,立即用符合生活饮用水卫生标准的自来水冲洗去除浮萍、泥土等污染物,均匀铺开晾干表面水分.

1-MCP 保鲜剂(5 mg/包,有效 1-MCP 含量 3.3%,每包可处理 6~8 kg 样品)购自陕西咸阳西秦生物科技有限公司;实验所用的 LMF 包装袋购自北京丹普克包装技术有限公司,规格为 80 cm×70 cm,由聚乙烯材料制成,厚度、孔数和孔径参数分别为 80 μm、80 000 个/m^2 及 100 μm. 此外,木质素含量的定量分析采用北京索莱宝科技有限公司生产的专用试剂盒. 实验涉及的其余化学试剂,均由国药集团化学试剂有限公司提供.

本研究中所涉及的主要仪器设备及生产厂商如表 1 所示.

表 1　仪器与设备

Table 1　Instruments and equipment

仪器名称	型号	生产厂家	仪器名称	型号	生产厂家
果蔬呼吸测定仪	SYS-GH 30A	辽宁赛亚斯科技有限公司	高速冷冻离心机	Pico-21	美国 Thermo Fisher 公司
色差计	CR-10Plus	日本 Konica Minolta 公司	紫外可见分光光度计	UV-2800A	尤尼柯(上海)仪器有限公司
阿贝折光仪	AWAJ	上海叶拓仪器仪表有限公司	高速冷冻微量离心机	Micro-21	美国 Thermo Fisher 公司
多样品组织研磨仪	ZHTE48	南京卓恒科学仪器有限公司	酶联免疫分析仪	FlexA-200	杭州奥盛仪器有限公司

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理

将挑选好的茭白随机分成 3 组,每组 50 根. LMF+1-MCP 组:置于塑料筐(58×39×13 cm)中,加入 1 包 1-MCP 保鲜剂(按 6 kg/包的推荐用量),并采用激光微孔膜包装;LMF 组:置于塑料筐中仅用激光微孔膜

包装;对照组(CK):直接置于相同规格的塑料筐中. 所有样品均于(4±1)℃条件下贮藏,分别在 0、15、30 和 45 d 取样. 每次取样每组随机取 8 根茭白,剥除外壳后,用不锈钢刀切除两端 3~4 cm(避免边缘效应干扰),取中间部分进行指标测定. 采收后的部分样品随即投入到失重率、呼吸速率、白度以及木质素染色等实时指标的检测中. 与之相对应,剩余的组织样本则在液氮中进行快速冷冻处理,随后将其转移至-80 ℃的超低温冷冻柜中妥善贮藏,以供后续其他生理生化指标的测定. 所有数据均以鲜重(fresh weight,FW)为基础表示.

1.2.2　品质指标测定

1.2.2.1　木质素染色

木质素染色参考 Yang 等[2]的方法,用 Wiesner 试剂(间苯三酚-盐酸溶液)观察木质素分布情况. 将取样后的茭白中段切成 2 mm 薄片,在 1%间苯三酚溶液中浸泡 5 min,取出沥干,立即滴加 37%HCl 于组织表面. 木质素的组织化学鉴定基于其在酸性介质中与间苯三酚的专属呈色机制,当二者接触后,可在短时间内(约 10 s)引发特征性的特征反应,使目标组织迅速转变为紫红色.

1.2.2.2　白度值、呼吸强度和失重率测定

白度值(W_H)采用便捷式色差仪 CR-10 Plus 测定,参照国际通用色度空间系统(CIE $L^*a^*b^*$)进行量化分析. 其中,参数 L^* 代表色泽的明暗度(数值在 0 至 100 之间波动,分别对应极端色调黑色与白色);a^* 轴则作为红绿指标的表征,正值($+a^*$)趋向于红色系,负值($-a^*$)则偏向绿色系;类似地,b^* 轴用来定义黄蓝色彩偏向,其正负极性分别由黄色(b^*)与蓝色($-b^*$)体现. 计算公式为:

$$W_H=100-[(100-L^*)^2+(a^*)^2+(b^*)^2]^{1/2}.$$

呼吸强度用果蔬呼吸测定仪测定,结果表示为 CO_2 $mg\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$.

失重率采用称重法测定,每次取 3 根茭白,计算公式为:

$$失重率=\frac{贮藏前茭白质量-贮藏后茭白质量}{贮藏前茭白质量}\times 100\%.$$

1.2.2.3　还原糖、总糖、可溶性固形物和木质素含量测定

还原糖含量测定参考 Song 等[12]的方法,并略作修改. 将 2 g 冷冻的茭白组织在 6 mL 去离子水中研磨,8 000×g 离心 20 min. 将 2 mL 3,5-二硝基水杨酸溶液(6.5 g DNS+500 mL 2 mol/L NaOH+45 g 丙三醇,去离子水定容至 1 000 mL,4 ℃稳定一周)与 2 mL 上清液混合,随后,将混合反应液移至沸水浴环境中加热维持 5 min. 待体系完全冷却至室温状态后,借助去离子水将其总体积精确配制并固定至 25 mL. 最后,利用分光光度计在 540 nm 的波长位置捕捉并记录其吸光值(A_{540}),检测所得的数据统一以 $g\cdot kg^{-1}$ 为单位进行定量表征. 采用 1 $mg\cdot mL^{-1}$ 葡萄糖标准溶液建立标准曲线,所得回归方程为 $y=0.375x-0.010\ 3$,相关系数 $R^2=0.997\ 7$.

总糖含量测定参考 Gouda 等[13]的方法,采用蒽酮比色法测定. 取 2 g 冷冻的茭白组织在 10 mL 去离子水中研磨,沸水浴 30 min,冷却后用去离子水稀释至 25 mL,8 000×g 离心 20 min,取 0.1 mL 上清液与去离子水 1.9 mL、蒽酮-乙酸乙酯试剂 0.5 mL(含蒽酮 2 g、乙酸乙酯 100 mL)、浓硫酸 5 mL 混合. 通过测定 630 nm 处的吸光度来测定总糖含量,结果以 $g\cdot kg^{-1}$ 表示. 采用葡萄糖标准溶液建立标准曲线,所得方程为 $y=0.006\ 2x+0.000\ 9$,相关系数 $R^2=0.999\ 7$.

木质素的定量分析利用北京索莱宝科技有限公司提供的检测试剂盒进行. 在样品前处理阶段,借助电子天平精准称取新鲜的茭白组织样品约 10 g,以备后续提取使用. 经 80 ℃烘箱干燥至恒重后,采用陶瓷研钵研磨并通过 40 目筛. 准确称取 5 mg 茭白样品粉末,加入 500 μL 50 $mmol\cdot L^{-1}$ 氯化钠溶液,65 ℃孵育 30 min. 随后以 8 000×g 离心 5 min 后弃去上清液,沉淀依次用 500 μL 乙醇和 500 μL 石油醚各洗涤一次(8 000×g,5 min). 向沉淀中加入 500 μL 乙酸和 20 μL 乙酰溴,80 ℃反应 40 min 后,加入 500 μL 2 $mol\cdot L^{-1}$ 氢氧化钠终止反应. 再次离心(8 000×g,5 min)后,取 80 μL 上清液与 900 μL 乙酸混合,采用 UV-2800A 型紫外分光光度计于 280 nm 波长处测定吸光度,结果以 k/kg 干重表示.

可溶性固形物(TSS)含量测定参考彭思佳等[14]的方法,用手持式折光仪测定. 称取茭白样品 5 g,充分研磨后过双层纱布,得到滤液. 取 100 μL 滤液滴在折光仪上,读数,结果以百分比(%)表示.

1.2.3　活性氧代谢指标测定

1.2.3.1　超氧阴离子生成速率、过氧化氢和丙二醛含量测定

超氧阴离子(O_2^-)生成速率参考 Gouda 等[15]的方法. 在 530 nm 处测定吸光值(A_{530}). 利用亚硝酸钠标准曲线计算 O_2^-产生速率,以鲜重表示(μmol·kg^{-1}·min^{-1}). 超氧阴离子(O_2^-)生成速率所用标准曲线为:y=0.019 3x+0.015 5,R^2=0.999 3.

过氧化氢(H_2O_2)含量测定参考 Qian 等[16]的方法. 在 415 nm 处测定吸光度(A_{415}). 过氧化氢含量以 mmol·kg^{-1}表示. 过氧化氢(H_2O_2)含量所用标准曲线为:y=0.050 5x−0.009 2,R^2=0.998 8.

丙二醛(MDA)含量测定参考 Dong 等[17]的方法. 测定 450、532 和 600 nm 处的吸光度值,MDA 含量(μmol·kg^{-1})计算如下:

$$C=[6.45(A_{532}-A_{600})-0.56A_{450}]\times V_t/(V_s\times W),$$

式中,C 为 MDA 含量,μmol·kg^{-1};A_{450}、A_{532}和 A_{600}分别表示在 450、532 和 600 nm 处的吸光度值;V_t 为提取液的总体积;V_s 为加入的提取液的体积;W 为样品鲜重质量.

1.2.3.2　超氧化物歧化酶、抗坏血酸过氧化物酶和过氧化氢酶活性测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参考 Miao 等[18]的方法. 以 560 nm 处硝基四唑蓝光还原反应受到 50%抑制时所需的酶量作为 SOD 活性的一个单位(U).

抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定参考 Song 等[19]的方法. APX 单个活性单位(U)规定为在 290 nm 波长下光吸收值每分钟出现 0.01 降幅所需的酶量.

过氧化氢酶(CAT)活性测定参考 Li 等[20]的方法. CAT 单个活性单位(U)定义为在 240 nm 特定波长下使体系吸光度每分钟下降 0.01 所需的酶量.

1.2.4　木质化相关酶活性测定

1.2.4.1　苯丙氨酸解氨酶、肉桂酸-4-羟化酶、4-香豆酸 CoA 连接酶活性测定

苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性测定方法参考王庆新[21]的方法. 在 290 nm 处引发吸光度每分钟 0.01 变幅的酶量,即被标定为 PAL 的一个活性单位(U).

肉桂酸-4-羟化酶(C4H)活性测定参考 Miao 等[18]的方法. C4H 的一个活性单位(U)根据底物消耗来确定,是指每分钟内促使每千克茭白样本还原 1 μmol 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)的酶量.

4-香豆酸 CoA 连接酶(4CL)活性的测定参考李明霞[22]的方法. 4CL 单个活性单位(U)是指在 333 nm 检测条件下吸光度值每分钟产生 0.01 变化所需的酶量.

1.2.4.2　肉桂醇脱氢酶、漆酶、过氧化物酶活性测定

肉桂醇脱氢酶(CAD)活性测定方法参考王丹阳[23]的方法. CAD 的单个活性单位(U)是指在 340 nm 检测条件下吸光度值每分钟产生 0.01 变化所需的酶量.

漆酶(LAC)活性测定方法参照吴怡[24]的方法. LAC 活性单位定义为每分钟每千克样品还原 1 μmol 2,2′-偶氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS)所需的酶量.

过氧化物酶(POD)活性的测定方法参考王韦华等[25]的方法. POD 的一个活性单位(U)是指在 460 nm 处吸光值每分钟向上攀升 0.001 所需的酶量.

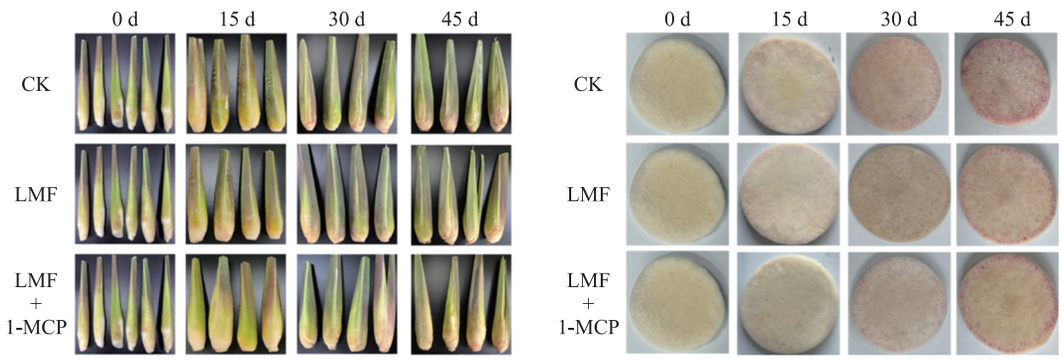
1.3　数据处理

记录每个指标 3 个重复样本的平均值±标准差. 使用 SPSS 27 进行单因素方差分析和 Duncan's 多重极差检验,P<0.05 为具有显著性差异. 图表由 GraphPad Prism 9.5 和 Excel 2024 软件生成.

2　结果与分析

2.1　茭白外观变化情况

随着贮藏时间的延长,茭白外壳出现脱水皱缩和褐变现象,如图 1(a)所示. 对照组第 30 d 时,明显脱水、皱缩及褐变,而 LMF 组和 LMF+1-MCP 组在第 30 d 仍保持鲜绿外观,其中 LMF+1-MCP 组从外观品质上看与对照组 0 d 时最为接近. 贮藏 45 d 时,对照组茭白外壳严重皱缩,底部腐烂,而 LMF 组和 LMF+1-MCP 组仅表现出一定程度的皱缩,LMF+1-MCP 组表皮黄化程度最轻,中部及尖端仍呈乳白色.



(a) 茭白外观变化　　(b) 茭白切片木质素染色

图 1　茭白外观变化和茭白组织切片木质素染色

Fig. 1　Changes in the appearance of water bamboo shoots and lignin staining of water bamboo shoots

采用 Wiesner 试剂对各组不同贮藏期茭白中段进行组织切片染色,结果如图 1(b)所示. 随贮藏时间延长,各组切片中红染面积逐渐增加,整个贮藏期对照组红染面积最大,LMF 组次之,LMF+1-MCP 组染色情况最轻,表明 LMF+1-MCP 联合处理对抑制木质素积累效果最好.

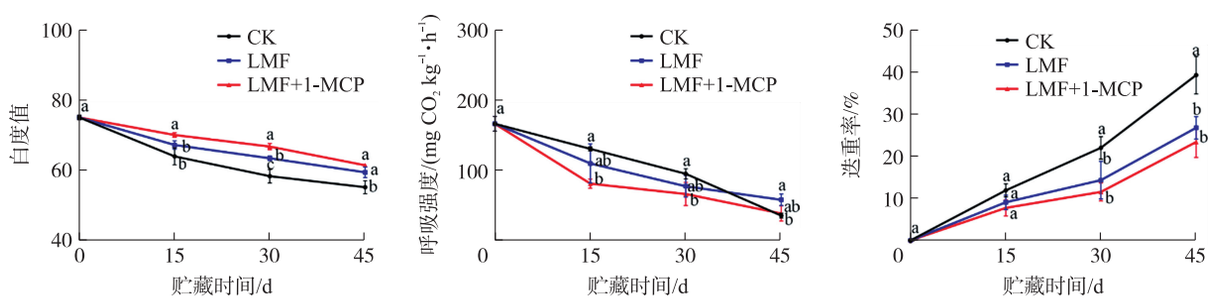
2.2　品质指标变化情况

2.2.1　白度值和呼吸强度

如图 2(a)所示,随着贮藏时间延长,3 组茭白的白度值不断下降. 贮藏 45 d 后,与第 0 d 相比,对照组白度下降 26.5%,LMF 组下降 20.8%,LMF+1-MCP 组下降 18.1%. 在整个贮藏期,对照组白度值最低,LMF+1-MCP 组白度值最高,在第 30 d 比对照组和 LMF 组分别高 14.4%和 5.2%(P<0.05).

如图 2(b)所示,在整个贮藏期 LMF+1-MCP 组茭白呼吸强度更低,显著低于对照组,在第 15 d 时比对照组低 38.5%,第 30 d 时比对照组低 30.8%,表明联合处理能更有效地抑制茭白采后的呼吸作用.

如图 2(c)所示,由于呼吸作用和蒸腾作用,茭白在采后过程中质量持续减少. 贮藏 45 d 时,对照组失重率达到 39.3%,而 LMF 组和 LMF+1-MCP 组失重率分别为 26.7%和 23.4%,显著低于对照组(P<0.05).



(a) 白度值变化　　(b) 呼吸强度变化　　(c) 失重率变化

图 2　茭白贮藏期间白度值、呼吸强度和失重率变化

Fig. 2　Changes of whiteness value, respiratory intensity and weight loss rate of water bamboo shoots during storage

2.2.2　还原糖和总糖含量

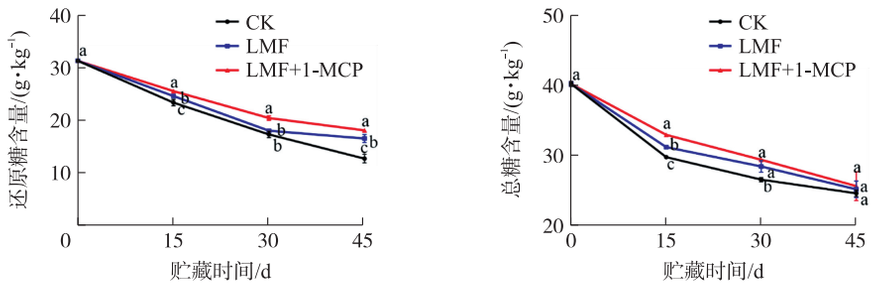
如图 3 所示,各组还原糖和总糖含量在贮藏期均呈下降趋势. 对照组下降速度最快,第 45 d 时还原糖含量较初始值下降 59.1%,总糖含量下降 40.0%. LMF+1-MCP 组在整个贮藏期还原糖和总糖含量均显著高于对照组和 LMF 组(P<0.05),第 15 d 总糖含量分别比对照组和 LMF 组高 12.0%和 6.1%,第 45 d 还原糖含量比对照组和 LMF 组高 41.6%和 9.3%.

2.2.3　可溶性固形物和木质素含量

如图 4(a)所示,贮藏期茭白可溶性固形物含量呈持续下降趋势,反映出在贮藏期间营养物质不断被消耗. 其中,对照组下降速度最快,与初始值相比第 45 d 下降了 51.0%,LMF 组下降了 47.6%,LMF+1-MCP 组下降了 42.5%. 在整个贮藏过程中 LMF+1-MCP 组可溶性固形物含量均显著高于其他组(P<0.05),至贮藏末期仍比对照组高 17.2%.

如图 4(b)所示,随着贮藏时间延长,茭白中木质素含量持续升高. 对照组在第 45 d 的木质素含量是

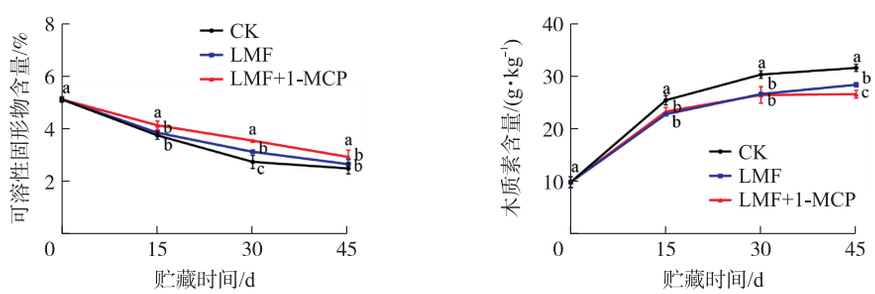
初始值的 3.2 倍,LMF 组是初始值的 2.9 倍,LMF+1-MCP 组是初始值的 2.7 倍. 在贮藏前 15 d 木质素含量增长速度最快,15~30 d 时仍呈上升趋势但速度减缓,30~45 d 时趋于平缓. 第 45 d 时,与对照组相比,LMF 组木质素含量低 8.5%,LMF+1-MCP 组低 14.3%,表明 2 个处理组在抑制木质素积累方面都具有一定作用,其中复合处理效果更好.



(a) 还原糖含量变化　　(b) 总糖含量变化

图 3　茭白贮藏期间还原糖含量和总糖含量变化

Fig. 3　Changes in reducing sugar content and total sugar content of water bamboo shoots during storage



(a) 可溶性固形物含量变化　　(b) 木质素含量变化

图 4　茭白贮藏期间可溶性固形物含量和木质素含量变化情况

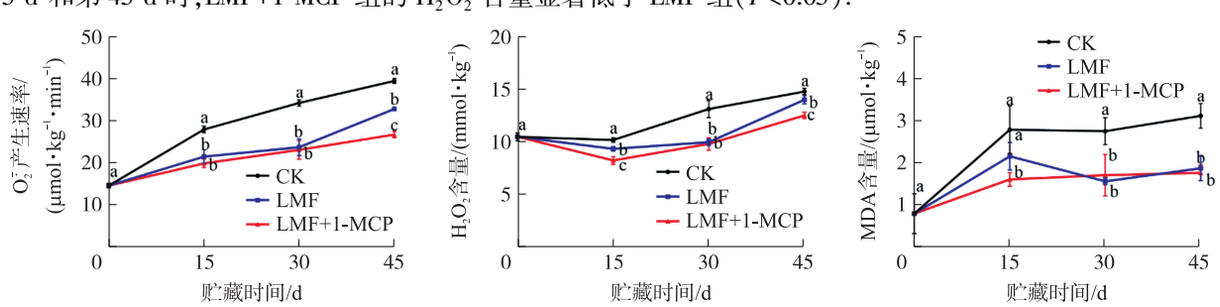
Fig. 4　Changes in soluble solids content and lignin content during storage

2.3　活性氧代谢变化情况

2.3.1　$O_2^{\cdot-}$ 产生速率、H_2O_2 和 MDA 含量

图 5(a)显示,与对照组 0 d 相比,$O_2^{\cdot-}$产生速率在各组中均有所增加,但增加幅度存在显著差异. 贮藏 15 d 后,LMF 组和 LMF+1-MCP 组茭白样品中 $O_2^{\cdot-}$产生速率明显低于对照组($P<0.05$),第 45 d 时分别比对照组低 16.7%和 32.0%.

如图 5(b)所示,各组 H_2O_2 含量在贮藏前 15 d 略有下降,随后呈持续上升趋势. LMF 组和 LMF+1-MCP 组在贮藏各阶段的 H_2O_2 含量均显著低于对照组,其中在第 30 d 时分别比对照组低 23.7%和 25.0%. 在第 15 d 和第 45 d 时,LMF+1-MCP 组的 H_2O_2 含量显著低于 LMF 组($P<0.05$).



(a) $O_2^{\cdot-}$产生速率变化　　(b) H_2O_2含量变化　　(c) MDA含量变化

图 5　茭白贮藏期间 $O_2^{\cdot-}$产生速率、H_2O_2 和 MDA 含量变化

Fig. 5　Changes in superoxide anion production rate, hydrogen peroxide and malondialdehyde contents of water bamboo shoots during storage

丙二醛(MDA)作为脂质过氧化的产物,其含量可反映细胞膜损伤程度. 如图 5(c)所示,各组 MDA 含量在贮藏前 15 d 呈上升趋势,之后含量趋于稳定. 与贮藏初始值相比,第 45 d 对照组 MDA 含量上升了 2.9 倍,LMF 和 LMF+1-MCP 组分别上升 1.3 倍和 1.2 倍. 在整个贮藏过程中,LMF+1-MCP 组 MDA 含量最低,其次是 LMF 组,均与对照组存在显著性差异(P<0.05). 在第 30 d 时,对照组 MDA 含量分别比 LMF 组和 LMF+1-MCP 组高出 66.3%和 76.7%.

LMF 包装和 LMF+1-MCP 处理均能显著抑制茭白贮藏过程中 O_2^-和 H_2O_2 的积累以及 MDA 含量的上升,延缓了氧化胁迫和细胞膜损伤进程. 其中,LMF+1-MCP 处理效果最为显著.

2.3.2　抗氧化酶(SOD、APX、CAT)活性

如图 6(a)所示,SOD 活性在对照组和 LMF 组中均呈先升高后下降的趋势,而 LMF+1-MCP 组 SOD 活性前期短暂下降后持续上升. 贮藏第 30 d 时,LMF+1-MCP 组中 SOD 活性显著高于其他各组,比对照组高出 52.3%. 第 45 d,LMF 组和 LMF+1-MCP 组的 SOD 活性分别比对照组高 32.2%和 106%. 值得注意的是 LMF+1-MCP 处理组在贮藏后期(30~45 d)始终维持着较高的 SOD 活性.

如图 6(b)所示,各组茭白的 APX 活性在整个贮藏期呈下降趋势,LMF+1-MCP 组的 APX 活性显著高于其他两组,第 15 d 时比对照组高 34.0%,第 30 d 时比对照组高 23.8%.

如图 6(c)所示,各组 CAT 活性总体呈下降趋势,前 15 d 下降速度很快,之后趋于平缓. 第 30 d 时,LMF 组和 LMF+1-MCP 组的 CAT 活性分别比对照组高 65.0%和 89.5%. 在整个贮藏期两个处理组的 CAT 活性都显著高于对照组,LMF+1-MCP 组显著高于 LMF 组(P<0.05).

LMF+1-MCP 处理在增强茭白抗氧化能力方面表现最佳,其次为单独 LMF 包装.

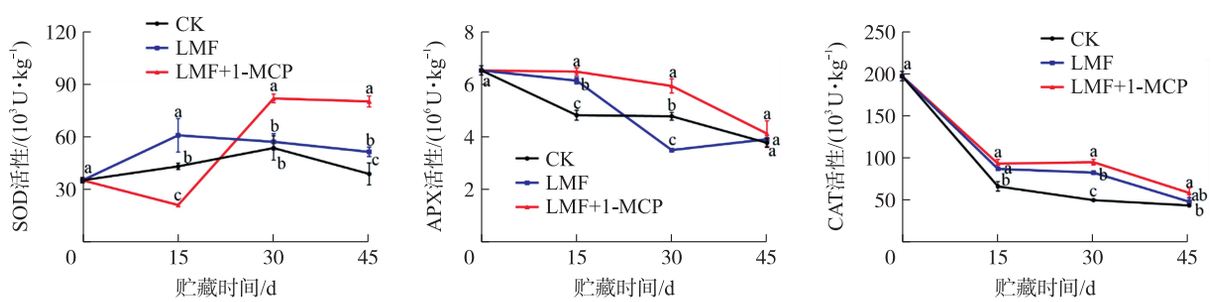


图 6　茭白贮藏期间 SOD、APX 和 CAT 活性变化

Fig. 6　Changes of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and catalase activities of water bamboo shoots during storage

2.4　木质化相关酶活性

贮藏期木质化相关酶活性的变化如图 7 所示.

如图 7(a)所示,各组 PAL 活性在贮藏过程中均呈上升趋势,对照组酶活最高,LMF+1-MCP 组酶活最低(P<0.05),在贮藏末期对照组 PAL 活性分别比 LMF 组和 LMF+1-MCP 组高 24.9%和 54.0%.

如图 7(b)所示,C4H 活性在贮藏过程中呈先升高后下降的趋势,各组均在第 15 d 时达到峰值,对照组增幅最快,峰值时酶活分别为 LMF 组和 LMF+1-MCP 组的 1.8 倍和 1.2 倍. 第 45 d,两个处理组 C4H 活性显著低于对照组(P<0.05),LMF 和 LMF+1-MCP 分别比对照组低 15.8%和 26.0%.

如图 7(c)所示,4CL 活性呈波动上升趋势. 两个处理组在贮藏前 15 d 均能显著抑制 4CL 活性的上升,第 15 d 时,LMF 组和 LMF+1-MCP 组的 4CL 活性分别比对照组低 16.0%和 19.6%. 贮藏 30 d 后,各组 4CL 活性均呈迅速上升的趋势,但 2 个处理组 4CL 活性均显著低于对照组,LMF+1-MCP 组显著低于 LMF 组(P<0.05).

如图 7(d)所示,CAD 活性在对照组和 LMF+1-MCP 组中均呈上升趋势,而 LMF 组贮藏 30 d 后呈明显下降趋势. 在整个贮藏期对照组 CAD 活性显著高于两个处理组,第 45 d 时是 LMF 组的 2.5 倍,是 LMF+1-MCP 组的 1.4 倍,相较初始水平,对照组 CAD 活性上升了 3.7 倍.

如图 7(e)所示,LAC 活性在贮藏期间各组均呈先升高后下降趋势,并在第 30 d 达到峰值. 整个贮藏过程中,对照组 LAC 活性始终最高,在第 30 d 时分别比 LMF 组和 LMF+1-MCP 组高 31.6%和 98.7%.

如图 7(f)所示,POD 活性在对照组和 LMF 组中持续升高,而 LMF+1-MCP 组在贮藏初期有下降趋势,到第 15 d 时酶活低于初始水平,之后持续升高,但在整个贮藏期 LMF+1-MCP 组中 POD 活性显著低于其他两组,而对照组 POD 活性始终显著高于两个处理组(P<0.05). 贮藏结束时,LMF 组和 LMF+1-MCP 组的 POD 活性分别比对照组低 5.2%和 14.4%.

实验结果表明,LMF 包装和 LMF+1-MCP 复合处理均可有效抑制茭白贮藏期木质素生物合成相关酶(PAL、C4H、4CL、CAD、LAC、POD)活性的上升,从而延缓茭白的木质化进程. 其中,LMF+1-MCP 复合处理组的抑制效果优于 LMF 包装组.

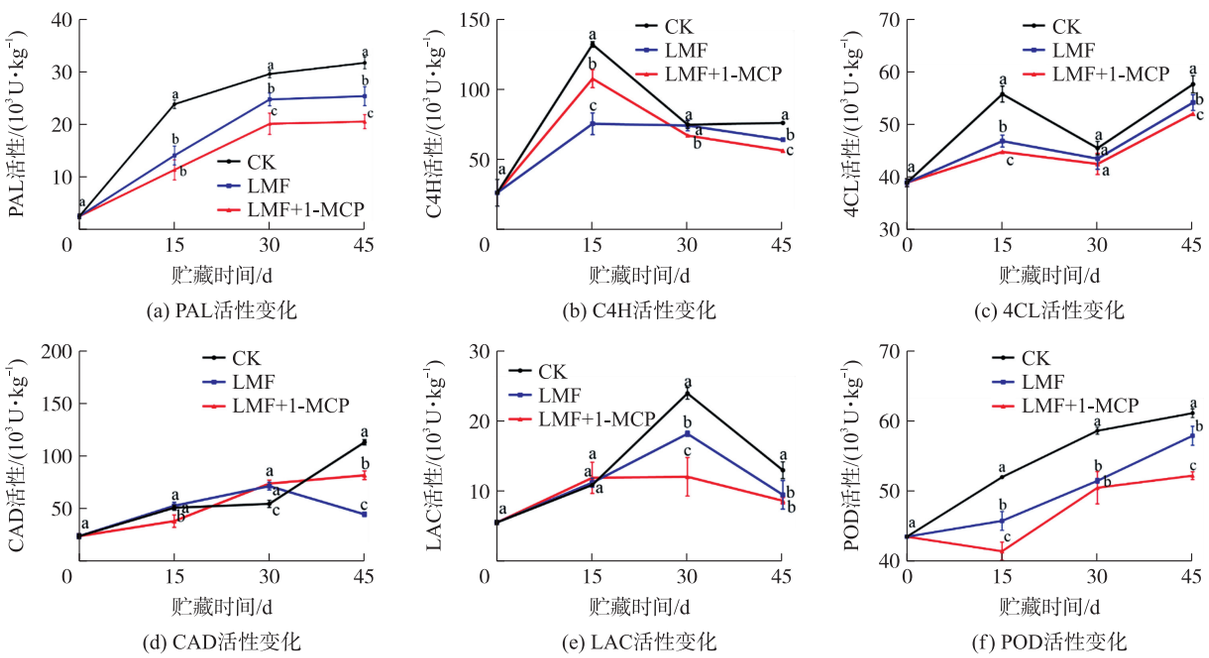


图 7　茭白贮藏期间 PAL、C4H、4CL、CAD、LAC 和 POD 活性变化

Fig. 7　Changes in phenylalanine ammonia-lyase, cinnamate-4-hydroxylase, 4-coumarate:CoA ligase, cinnamyl alcohol dehydrogenase, laccase and peroxidase activities of water bamboo shoots during storage

3　讨论

茭白作为一种高营养价值和商业价值的多年生水生蔬菜,在采后贮藏过程中极易发生木质化,常温货架期仅 2~3 d. 本研究结果表明,与对照组相比,LMF+1-MCP 复合处理不仅能有效降低贮藏期木质素含量及木质素生物合成相关酶的活性,延缓采后茭白的木质化进程,而且能提高贮藏期抗氧化酶的活性并降低活性氧和 MDA 含量,减轻贮藏期的氧化应激反应,维持更高的营养物质含量. LMF+1-MCP 复合处理可以作为茭白低温贮藏保鲜的一种有效方式.

大量研究表明,LMF+1-MCP 复合处理在延缓采后果蔬品质劣变方面具有显著效果. Kartal 等[26]研究表明,采用聚丙烯微孔膜(孔径 90 μm,9 孔)结合保鲜剂处理可有效维持草莓的 pH 值、可溶性固形物含量、电导率及感官品质,使其在 4 ℃条件下货架期延长至 4 周以上. Li 等[27]发现,1-MCP 处理结合微孔袋包装能显著减少 13 ℃贮藏期间芒果果皮的皱缩与失重率. Liguori 等[28]则证实,微孔聚丙烯薄膜包装可有效抑制葡萄在 5 ℃贮藏时的水分流失并延长其货架期. 此外,Li 等[6]指出,LMF+1-MCP 处理能显著抑制水蜜桃呼吸强度,延缓褐变进程并降低病害敏感性,从而有效延长贮藏期. 本研究发现,LMF+1-MCP 复合处理对茭白采后品质保持同样具有显著效果. LMF+1-MCP 复合处理显著抑制了木质素生物合成相关酶活性的上升,降低了木质素含量,减缓了可溶性固形物、总糖和还原糖等营养成分的流失. 这些结果充分表明,该复合处理可通过有效抑制木质化进程来维持采后茭白的贮藏品质. 这一发现与 Kong 等[7]关于 LMF+1-MCP 处理显著延缓“阳光玫瑰”葡萄采后软化的研究结果相互印证,进一步证实了该技术在非呼吸跃变型果蔬保鲜中的适用性.

木质化进程的加速与木质素生物合成相关酶活性的上调密切相关. 多项研究表明,苯丙烷代谢途径中的

关键酶在采后果蔬木质化过程中发挥着核心调控作用. Yang 等[2]通过系统研究发现,茭白贮藏期间苯丙氨酸解氨酶(PAL)、肉桂醇脱氢酶(CAD)、漆酶(LAC)和过氧化物酶(POD)活性的上升显著促进了木质化进程. 这一发现在其他蔬菜体系中得到了验证,如 Xiao 等[29]对采后芦笋的研究表明,其木质素沉积与 PAL、POD 和 CAD 等酶活性及其基因表达水平上调呈显著正相关(P<0.05). 本研究发现,在(4±1)℃贮藏条件下,对照组茭白的 PAL、C4H、4CL、CAD、LAC 和 POD 活性在不同贮藏阶段都有显著上升. 其中,PAL、4CL、CAD 和 POD 活性在整个贮藏期持续升高,与木质素含量的动态变化趋势高度一致. 值得注意的是,LMF+1-MCP 复合处理能有效抑制这些酶的活性,使木质素积累量较对照组降低 14.3%(P<0.05). 作为苯丙烷代谢途径的限速酶,PAL 通过催化 L-苯丙氨酸脱氨生成反式肉桂酸,启动木质素生物合成的级联反应[30]. 4-香豆酸-CoA 连接酶(4CL)作为连接苯丙烷通用途径与木质素特异合成途径的关键节点酶,其活性变化同样与木质素沉积密切相关. Xu 等[31]证实竹笋中 4CL 活性与木质素含量呈显著正相关(r=0.89). Qian 等[32]也发现冷藏茭白中 4CL 活性上升伴随木质素显著积累. 在木质素合成的终末阶段,LAC 和 POD 共同催化木质素单体的氧化聚合[33]. Hu 等[34]在对毛竹笋的研究中证实 LAC 活性对木质素生物合成具有重要促进作用. Zhang 等[35]的研究进一步表明,POD 与 LAC 协同作用可显著加速杏果实贮藏期间的木质化进程.

采后木质化进程与活性氧(ROS,如 $O_2^{\cdot-}$和 H_2O_2)的过量积累密切相关[36]. 持续的 ROS 积累会诱发细胞膜脂质过氧化,进而产生丙二醛(MDA)等有害代谢产物[15],使植物处于氧化应激状态,进而激活苯丙烷代谢途径,使木质素生物合成相关酶的活性上调表达[37]. 本研究发现,LMF 包装和 LMF+1-MCP 复合处理能有效抑制 $O_2^{\cdot-}$和 H_2O_2 的积累,从而显著降低 MDA 含量,表明两种方式对缓解氧化应激都具有积极作用. 而 LMF+1-MCP 复合处理效果明显优于单独使用 LMF 包装,这可能是由于 LMF 包装通过调节气体交换环境与 1-MCP 抑制乙烯信号通路产生了协同效应,共同增强了自由基清除能力[5,7]. 植物体内主要的 ROS 清除酶系统包括超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)和过氧化氢酶(CAT),其在维持细胞氧化还原平衡中起关键作用. SOD 可将 $O_2^{\cdot-}$歧化为 H_2O_2,而 APX 和 CAT 则进一步将 H_2O_2 分解为水,从而减轻氧化损伤[31]. 本研究中,LMF 包装和 LMF+1-MCP 复合处理显著提高了茭白 SOD、APX 和 CAT 的活性,进一步证实了其在抗氧化调控方面的有效性. 值得注意的是,LMF+1-MCP 组中 3 种抗氧化酶的活性均显著高于对照组和 LMF 组,表明该处理能维持更强的抗氧化能力,有效降低茭白中 ROS 和 MDA 含量.

4　结论

木质化是茭白采后品质劣变的主要特征. LMF 包装或 LMF+1-MCP 复合处理能有效抑制茭白贮藏期的木质化进程并延缓品质下降,其中 LMF+1-MCP 复合处理对维持贮藏品质效果优于单独 LMF 包装处理. LMF+1-MCP 复合处理通过以下 4 个方面的作用更好地维持了采后茭白的品质:(1)减缓糖类和可溶性固形物的流失;(2)增强抗氧化酶(SOD、APX 和 CAT)活性;(3)减少活性氧($O_2^{\cdot-}$、H_2O_2)和丙二醛积累;(4)抑制木质化相关酶(PAL、C4H、4CL、CAD、POD 和 LAC)活性并降低贮藏期的木质素含量. 本研究为茭白采后贮藏保鲜提供了新的有效方案,为果蔬保鲜技术拓展提供了新的思路. 此外,该保鲜技术同样适用于其他果蔬品类,展现出良好的可扩展性与适应性. 其与现有商业化供应链体系兼容性优异,通过产业合作开展进一步研究将验证这些优势.

[参考文献](References)

[1] Yang B Q, Han Y C, Gao H Y, et al. Application of melatonin delays lignification in postharvest water bamboo shoots in association with energy metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 196: 112149.

[2] Yang B Q, Fang X J, Han Y C, et al. Analysis of lignin metabolism in water bamboo shoots during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 111989.

[3] Nuamduang P, Winotapun C, Harnkarnsujarit N, et al. Regulating gas transmission rates in microperforated polybutylene succinate films for modified atmosphere packaging of bananas[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 45: 101347.

[4] Ali S, Khan A S, Malik A U, et al. Modified atmosphere packaging delays enzymatic browning and maintains quality of harvested litchi fruit during low temperature storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 254: 14-20.

[5] Zhou H J,Ye Z W,Wang L F,et al. 1-MCP regulates taste development in cold-stored peach fruit through modulation of sugar,organic acid,and polyphenolic metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology,2025,225:113518.
[6] Li X R,Peng S J,Yu R Y,et al. Co-application of 1-MCP and laser microporous plastic bag packaging maintains postharvest quality and extends the shelf-life of honey peach fruit[J]. Foods,2022,11(12):1733.
[7] Kong X,Su H S,Shen H,et al. The combined use of 1-MCP and laser microporous film packaging maintains the quality of Shine Muscat grapes by inhibiting oxidative stress and cell wall catabolism[J]. LWT-Food Science and Technology,2025,225:117958.
[8] Song L L,Chen H J,Gao H Y,et al. Combined modified atmosphere packaging and low temperature storage delay lignification and improve the defense response of minimally processed water bamboo shoot[J]. Chemistry Central Journal,2013,7:147.
[9] Liu R L,Wang H Z,Yang H L,et al. Effect of ozone treatment on lignification and postharvest quality of water bamboo shoots [J]. eFood,2022,3(4):e24.
[10] Yang B Q,Han Y C,Wu W J,et al. Impact of melatonin application on lignification in water bamboo shoot during storage[J]. Food Chemistry-X,2022,13:100254.
[11] Ma T,Mo W F,Lv B B,et al. A review of the nutritional composition,storage challenges,processing technology and widespread use of bamboo shoots[J]. Foods,2024,13(22):3539.
[12] Song L L,Hu W H,Wang C B,et al. 6-Benzylaminopurine and gibberellic acid mitigate the yellowing of pak choi(*Brassica rapa subsp. chinensis*)during storage by regulating sugar scarcity-induced chlorophagy[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2025,73(13):7584-7595.
[13] Gouda M H B,Peng S J,Yu R Y,et al. Transcriptomics and metabolomics reveal the possible mechanism by which 1-methylcyclopropene regulates the postharvest senescence of *Zizania latifolia*[J]. Food Quality and Safety,2022,6(2):179-191.
[14] 彭思佳,虞任莹,童秀子,等. 1-MCP 处理结合激光微孔膜包装对采后水蜜桃的保鲜效果[J]. 食品工业科技,2022,43(17):363-370.
[15] Gouda M H B,Zhang C J,Peng S J,et al. Combination of sodium alginate-based coating with *L*-cysteine and citric acid extends the shelf-life of fresh-cut lotus root slices by inhibiting browning and microbial growth[J]. Postharvest Biology and Technology,2021,175:111502.
[16] Qian C L,Shao Y Y,Cai Z C,et al. Melatonin reduces lignin biosynthesis by fostering epigenetic modifications in water bamboo shoots under cold storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2025,73(12):7504-7516.
[17] Dong G J,Wang C F,Liu H R,et al. Impact of ethanol vapor treatment on the quality of water bamboo(*Z. caduciflora* L.)shoots during cold storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation,2022,46(5):e16494.
[18] Miao M,Wang Q X,Zhang T,et al. 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.
[19] Song L L,Zhao R,Hu W H,et al. Gibberellic acid and 6-benzylaminopurine delays yellowing of pak choi(*Brassica rapa subsp. chinensis*)by inhibiting lipid peroxidation and chlorophyll degradation[J]. Scientia Horticulturae,2025,340:113919.
[20] Li X,Zang C,Ge H,et al. Involvement of PAL,C4H,and 4CL in chilling injury-induced flesh lignification of loquat fruit[J]. Hortscience,2017,52(1):127-131.
[21] 王庆新. 超高压处理对微加工茭白货架期影响的研究[D]. 无锡:江南大学,2008.
[22] 李明霞. 茭白木质素生物合成相关 *ZlMYB*121 基因鉴定及功能分析[D]. 合肥:安徽农业大学,2023.
[23] 王丹阳. 木质素代谢相关酶在梨石细胞合成中的作用[D]. 南京:南京农业大学,2014.
[24] 吴怡. 灵芝属漆酶高产菌株的筛选及其所产漆酶的纯化和性质分析[D]. 北京:北京林业大学,2020.
[25] 王韦华,姜丽,王利斌,等. 采后 1-MCP 和乙烯利处理对茭白呼吸代谢及细胞结构的影响[J]. 现代食品科技,2017,33(12):129-136.
[26] Kartal S,Aday M S,Caner C. Use of microperforated films and oxygen scavengers to maintain storage stability of fresh strawberries[J]. Postharvest Biology and Technology,2012,71:32-40.
[27] Li X Y,Xiong T T,Zhu Q N,et al. Combination of 1-MCP and modified atmosphere packaging (MAP) maintains banana fruit quality under high temperature storage by improving antioxidant system and cell wall structure [J]. Postharvest Biology and Technology,2023,198:112265.
[28] Liguori G,D'Aquino S,Sortino G,et al. Effects of passive and active modified atmosphere packaging conditions on quality parameters of minimally processed table grapes during cold storage[J]. Journal of Berry Research,2015,5(3):131-143.
[29] Xiao J C,Liu J T,Guo Z,et al. 2,4-Epibrassinolide delays lignification,softening,and quality deterioration during asparagus storage[J]. Postharvest Biology and Technology,2025,219:113270.

(下转第 59 页)

Packaging and Shelf Life,2025,49:101512.
[23] Ouyang N N,Guo L N,Hong C,et al. Effects of delayed tuber cutting after catalytic infrared heat treatment on browning of fresh-cut potatoes and its potential mechanisms[J]. Food Chemistry,2025,480:143834.
[24] 邓钦予,张杨涛,郑果,等. 外源抗坏血酸对鲜切竹根姜保鲜特性的影响[J]. 中国食品添加剂,2023,34(5):176-183.
[25] 冯程程,于筠,王春玲. *L*-半胱氨酸对鲜切紫甘薯护色保鲜作用[J]. 食品与发酵工业,2019,45(22):150-156.
[26] 范文广,杜娜娜,牛晓倩,等. 曲酸-海藻酸钠复合膜的制备及其对百合鳞茎片褐变的抑制作用[J]. 食品工业科技,2019,40(11):284-290.
[27] 何国菊,胡吉刚,何艳,等. 植酸魔芋葡甘聚糖混合涂膜液对黄秋葵保鲜探究[J]. 食品工业,2021,42(7):158-162.
[28] Hesami A,Kavoosi S,Khademi R,et al. Effect of chitosan coating and storage temperature on shelf-life and fruit quality of *Ziziphus mauritiana*[J]. International Journal of Fruit Science,2021,21(1):509-518.
[29] 任玉锋,李壮桃,张冠楠. 涂膜处理对灵武长枣低温贮藏期间抗氧化酶和 PPO 活性的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(19):170-171.
[30] Kim J,Seo J,Kim H J,et al. Synergistic design of Pickering emulsion inks of nanochitosan-alginate-beeswax for edible coating in fruit preservation[J]. Food Hydrocolloids,2025,167:111462.
[31] Sun J S,Jiang H X,Wu H B,et al. Multifunctional bionanocomposite films based on konjac glucomannan/chitosan with nano-ZnO and mulberry anthocyanin extract for active food packaging[J]. Food Hydrocolloids,2020,107:105942.

[责任编辑:严海琳]

(上接第 49 页)

[30] Wei L J,Gao S J,Li F,et al. Transcriptomics and physiological indicators analyzed the delayed effect of carboxymethyl chitosan on lignification of okra during postharvest cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology,2025,222:113394.
[31] Xu T T,Wang J,Li C H,et al. *EuMYB*308 regulates lignin accumulation by targeting *EuLAC*17 in *Eucalyptus urophylla*[J]. Industrial Crops and Products,2024,218:118988.
[32] Qian C L,Ji Z J,Sun Y,et al. Lignin biosynthesis in postharvest water bamboo(*Zizania latifolia*)shoots during cold storage is regulated by rboh-mediated reactive oxygen species signaling[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2023,71(7):3201-3209.
[33] Berthet S,Demont-Caulet N,Pollet B,et al. Disruption of LACCASE4 and 17 results in tissue-specific alterations to lignification of arabidopsis thaliana stems[J]. Plant Cell,2011,23(3):1124-1137.
[34] Hu J,Wu W J,Fang X J,et al. Studies on the lignification and the differential expression of regulatory genes in *Phyllostachys praecox*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2024,24(3):183-190.
[35] Zhang X,Zhang Q P,Sun X Y,et al. Differential expression of genes encoding phenylpropanoid enzymes in an apricot cultivar (*Prunus armeniaca* L.)with cleavable endocarp[J]. Trees-Structure and Function,2019,33(6):1695-1710.
[36] Tang S W,Xu Z Y,Chen C W,et al. Effect of different postharvest pre-cooling treatments on quality of water bamboo shoots (*Zizania latifolia*)during refrigerated storage[J]. Plants-Basel,2024,13(20):2856.
[37] Ali S,Anjum M A,Nawaz A,et al. Effect of pre-storage ascorbic acid and Aloe vera gel coating application on enzymatic browning and quality of lotus root slices[J]. Journal of Food Biochemistry,2020,44(3):e13136.

[责任编辑:严海琳]