

乙醇和茉莉酸甲酯熏蒸处理对方竹鲜笋贮藏品质的影响

Effects of ethanol and methyl jasmonate fumigation on the quality of bamboo shoots during storage

徐锦洋¹ 吉 宁¹ 王 瑞¹ 张 妮¹

XU Jing-yang¹ JI Ning¹ WANG Rui¹ ZHANG Ni¹

刘仁婵¹ 王思元¹ 邓云兵²

LIU Ren-chan¹ WANG Si-yuan¹ DENG Yun-bing²

(1. 贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州 贵阳 550005;

2. 绥阳县太平高山生态中药材种植有限公司, 贵州 遵义 563300)

(1. School of Food and Pharmaceutical Engineering, Guiyang College, Guiyang, Guizhou 550005, China; 2. Suiyang Taiping Gaoshan Ecological Traditional Chinese Medicine Planting Co., Ltd., Zunyi, Guizhou 563300, China)

摘要:目的: 为方竹鲜笋的采后贮藏保鲜提供依据。方法: 采用 500 $\mu\text{L/L}$ 无水乙醇、0.1 mmol/L MeJA 熏蒸方竹鲜笋, 以蒸馏水为空白对照(CK), 测定方竹鲜笋贮藏期间[温度(1.0 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度(90 ± 5) %]的呼吸强度、硬度、褐变指数、可溶性蛋白质、PAL、POD、PPO、APX 等指标, 并结合主成分分析方竹鲜笋贮藏期间的品质差异。结果: 复合熏蒸处理可以降低贮藏期间方竹鲜笋硬度和褐变指数的上升, 维持总黄酮和可溶性蛋白质含量, 诱导 APX、POD、PAL、PPO 酶活性变化, 延缓木质化、褐变。当贮藏时间为 60 d 时, 复合熏蒸的主成分分析高于其他处理的。结论: 复合熏蒸能够更好地维持方竹鲜笋贮藏期间的品质。

关键词: 方竹笋; 无水乙醇; 茉莉酸甲酯; 熏蒸处理; 贮藏品质

Abstract: Objective: This study aimed to provide a basis for the post-harvest storage and preservation of fresh shoots from

bamboo (*Chimonobambusa quadrangularis*). **Methods:** Fresh bamboo shoots were fumigated with 500 $\mu\text{L/L}$ anhydrous ethanol and 0.1 mmol/L MeJA, and distilled water was used as blank control (CK) to determine the storage period, i. e. temperature (1.0 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ and relative humidity (90 ± 5) %. The respiratory intensity, hardness, browning index, soluble protein, and activity of PAL, POD, PPO and APX were detected. The quality differences of fresh bamboo shoots during storage were analyzed using principal component analysis. **Results:** Combined fumigation treatment can reduce the increase of hardness and browning index of fresh bamboo shoots during storage, maintain the contents of total flavonoids and soluble protein, induce the changes of APX, POD, PAL and PPO enzyme activities, and delay lignification and browning. As stored for 60 days, the principal component analysis of combined fumigation was higher than that of other treatments. **Conclusion:** Compound fumigation can better maintain the quality of bamboo shoots during storage.

Keywords: *Chimonobambusa quadrangularis* of bamboo shoots; anhydrous ethanol; methyl jasmonate; fumigation treatment; storage quality

基金项目: 贵州省科技计划项目(编号: 黔科合支撑[2020]1Y139 号); 贵阳学院中青年学术骨干项目(编号: GYURC-34); 贵州省科技计划项目(编号: 黔科中引地[2020]4018 号); 贵州省大学生创新创业训练计划一般项目(编号: 202110976008)

作者简介: 徐锦洋, 男, 贵阳学院在读硕士研究生。

通信作者: 吉宁(1984—), 男, 贵阳学院副教授, 博士。

E-mail: jining552100@163.com

收稿日期: 2022-08-13 **改回日期:** 2023-04-25

方竹(*Chimonabambusa quadrangularis*)生长于海拔 1 400~2 000 m 的山区, 发笋于 8—9 月, 富含多种氨基酸、维生素等营养成分, 被喻为“竹笋之冠”^[1]。竹笋采后自身代谢旺盛, 易木质化、褐变和腐烂, 品质极易劣变, 失

去商品价值^[2]。

茉莉酸甲酯(Methyle jasmonate, MeJA)是植物天然合成的信号分子,调控植物在机械伤害等胁迫防御中产生抗逆反应,利于果蔬产品的采后贮藏,已被广泛应用于果蔬保鲜等领域^[3]。Yang 等^[4]发现,外源 MeJA 可以抑制双孢菇褐变,缓解纤维素含量的上升。乙醇是果蔬次生代谢物,具有抗菌活性,价格低廉,无副作用,被美国食品和药物管理局公认为安全性物质,能延缓果蔬的成熟和衰老^[5]。肖婷等^[6]研究表明,采用乙醇熏蒸处理可以有效抑制采后果蔬的酶促褐变,杀灭果蔬表面的部分微生物,提高果蔬贮藏期间抗氧化酶活性,延长果蔬贮藏期。但乙醇熏蒸浓度使用不当会影响果蔬品质^[7]。复合保鲜处理是通过不同保鲜剂形成协同保鲜的效果,达到减少保鲜剂用量,最大程度增强果蔬采后的保鲜效果^[8]。熏蒸处理将保鲜剂转化成分子态,达到抑制或杀死果蔬表面的病原微生物,并渗透到被熏蒸的果实细胞中^[9]。

近年来各种保鲜方法如自发气调包装^[10]、低温贮藏^[11]、辐照处理^[12]等已被证明可以减缓竹笋贮藏期间的衰老。研究拟将方竹鲜笋放置于密闭空间,采用茉莉酸甲酯和乙醇进行熏蒸,测定相关指标并结合主成分分析(PCA)得到方竹鲜笋的保鲜工艺,旨在为方竹鲜笋的采后贮藏保鲜提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

方竹笋:采自贵州省绥阳县太白镇(28°40′50.40″N, 107°09′26.00″E),选取长短相近、无机械伤、无病虫害方竹笋进行采摘,并于 6 h 内运回实验室;

NaOH、EDTA、福林酚、愈创木酚、H₂O₂ 溶液、考马斯亮蓝、2,6-二氯酚靛酚、水合茚三酮、抗坏血酸:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

芦丁标准品:中国上海市麦克林公司;

自发气调袋:国家农产品保鲜工程技术研究中心;

精准控温保鲜库:±0.5℃,相对湿度(90±5)%,国家农产品保鲜工程技术研究中心;

物性测定仪:TA.XT.Plus 型,英国 Stable Micro Systems 公司;

残氧仪:Check Point II 型,丹麦 PBI Dansensor 公司;

紫外—可见分光光度计:UV-2550 型,日本 Shimadzu 公司;

色差仪:CR400 型,日本 Konica Minolta 公司;

医用压缩式雾化器:CN-B-0201 型,东莞健宝电子科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 方竹鲜笋处理将方竹笋均分成 4 份。CK 对照组:于 1 m³ 的密闭空间静置 2 h;无水乙醇熏蒸处理组:于

1 m³ 的密闭空间,采用 500 μL/L 无水乙醇雾化熏蒸 2 h;MeJA 熏蒸组:于 1 m³ 的密闭空间,采用 0.1 mmol/L MeJA 雾化熏蒸 2 h;复合熏蒸组:于 1 m³ 的密闭空间,先用 500 μL/L 无水乙醇雾化熏蒸 2 h 后晾干,再用 0.1 mmol/L MeJA 雾化熏蒸 2 h。熏蒸后的方竹鲜笋晾干后分别放入厚度为 0.02 mm 的 PE 自发气调袋内,每袋重 2.50 kg,冷库预冷 24 h,扎带,每个处理平行 3 次,于 (1.0±0.3)℃ 保鲜库内保鲜 60 d,贮藏期间相对湿度为 (90±5)%。每隔 15 d 取样待测。

1.2.2 呼吸速率、腐烂率、含水率、失重率测定

(1) 呼吸速率:采用静置法^[13]并稍加改动,将 2.00 kg 方竹笋放入 30 L 的密闭空间,25℃ 密闭 2 h,呼吸速率以每千克鲜果每小时增加的 CO₂ 量表示。

(2) 含水率:采用称重法。

(3) 腐烂率:采用称重法。

(4) 失重率:采用称重法^[14]。

1.2.3 总色差值(ΔE)、褐变指数测定(BI) 采用色差仪^[15-16]进行测定,每个处理重复 10 次,分别按式(1)~式(3)计算 ΔE 和 BI。

$$BI = \frac{[100 \times (X - 0.31)]}{0.172}, \quad (1)$$

$$X = \frac{a^* + 1.75 \times L^*}{5.645 \times L^* + a^* - 3.012 \times b^*}, \quad (2)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}. \quad (3)$$

1.2.4 硬度、脆度、剪切力测定

(1) 硬度:选用 P/2 N 探头,测试深度 8 mm,测前速度 5 mm/s,测中速度 5 mm/s,测后速度 5 mm/s,触发力 0.049 N。

(2) 脆度:将测试部位切成 1.5 cm 长的小段,将竹笋立起,采用 P/100 N 探头,测前速度 1 mm/s,测中速度 2 mm/s,测后速度 5 mm/s,触发力 0.049 N。

(3) 剪切力:将竹笋横放于质构仪上,采用 2 mm TA/LKB 切刀探头,测试速度 5 mm/s,剪切距离 30 mm。

1.2.5 可滴定酸含量测定 参照 Adhikary 等^[17]的方法并修改。取 5.00 g 样品,加入蒸馏水研磨成匀浆,定容至 50 mL,95℃ 水浴 30 min,冰水浴冷至室温,4 000 r/min 离心 5 min,取上清液 10 mL,加入 2 滴酚酞指示剂,用 0.01 mol/L NaOH 溶液进行滴定,含量以百分比表示。

1.2.6 游离氨基酸含量测定 采用茚三酮显色法^[18]。

1.2.7 抗坏血酸(V_c)含量测定 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[19]并改进。准确称取 5.00 g 方竹笋样品,加入少量 20 g/L 的草酸溶液,冰浴下研磨成匀浆,过滤,定容至 100 mL。取 20 mL 滤液,用 2,6-二氯酚靛酚溶液滴定,15 s 内呈微红不褪色。

1.2.8 丙二醛(MDA)含量测定 采用硫代巴比妥酸法^[20]。

1.2.9 总黄酮含量测定 参照 Kim 等^[21]的方法。

1.2.10 可溶性蛋白质含量测定 采用考马斯亮蓝法^[22]。

1.2.11 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定 参照 Petriccione 等^[23]的方法。以反应体系在 290 nm 处吸光值每分钟减少 0.01 为一个酶活性单位,结果以 U/(g · min) 表示。

1.2.12 多酚氧化酶(PPO)活性测定 参照李静仪等^[24]的方法。以每克样品每分钟吸光度值增加 1 为一个 PPO 活性单位,结果以 U/(g · min) 表示。

1.2.13 过氧化物酶(POD)活性测定 参照陈磊等^[25]的方法。以每分钟反应体系吸光度变化增加 1 时为一个过氧化物酶活性单位,结果以 U/(g · min) 表示。

1.2.14 苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性测定 参照 Wang 等^[26]的方法。以每小时反应体系吸光度变化吸光值增加 0.01 为一个 PAL 活性单位,结果以 U/(g · min) 表示。

1.3 数据处理

数据结果用平均值±标准偏差表示,采用 OriginLab 9.8 软件进行数据处理,采用 SPSS 21.0 软件进行相关性分析和主成分分析($P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差

异极显著)。

2 结果与分析

2.1 熏蒸处理对方竹鲜笋采后生理指标的影响

2.1.1 对呼吸强度和腐烂率的影响 由图 1(a)可知,方竹鲜笋呼吸强度在贮藏前期不断上升,贮藏 30~45 d 时达到呼吸峰值,之后呈下降趋势。贮藏后期,复合熏蒸处理的呼吸强度一直处于较低水平,贮藏第 45 天,复配熏蒸处理的呼吸强度显著低于其他熏蒸处理的($P < 0.05$),分别为 CK、无水乙醇熏蒸、MeJA 熏蒸处理的 87.60%, 73.63%, 64.31%。

由图 1(b)可知,贮藏期间,方竹鲜笋腐烂率呈上升趋势。相对于 CK 处理,其他处理均能抑制腐烂率上升,贮藏 0~15 d,方竹鲜笋腐烂率均处于较低水平。复合熏蒸处理的腐烂率从第 30 天开始显著低于其他处理的($P < 0.05$),第 60 天时复合熏蒸处理的腐烂率仅为 20.95%。

2.1.2 对含水率和失重率的影响 由图 2 可知,方竹鲜笋含水率在贮藏前期呈下降趋势,在贮藏后期呈上升趋势。贮藏期间,失重率不断上升,其中复合熏蒸处理的失

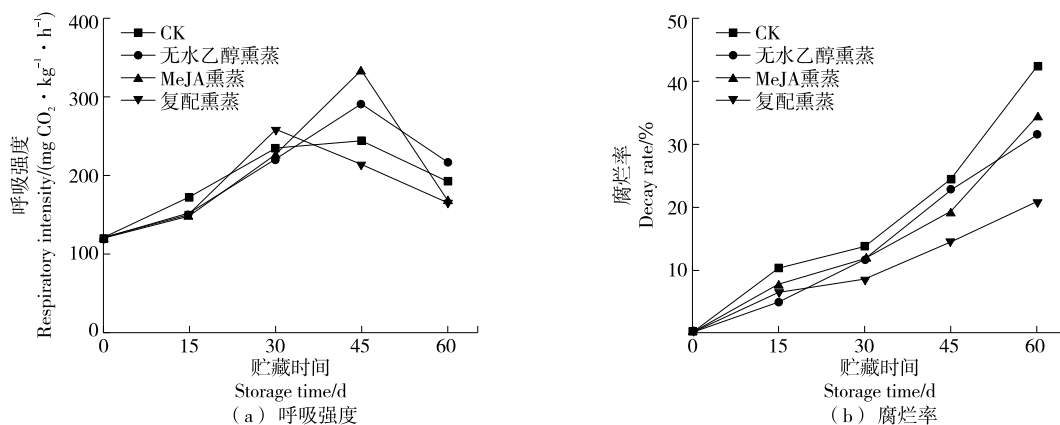


图 1 熏蒸处理对方竹鲜笋呼吸强度和腐烂率的影响

Figure 1 Effects of fumigation treatment on respiratory intensity and decay rate of fresh bamboo shoots

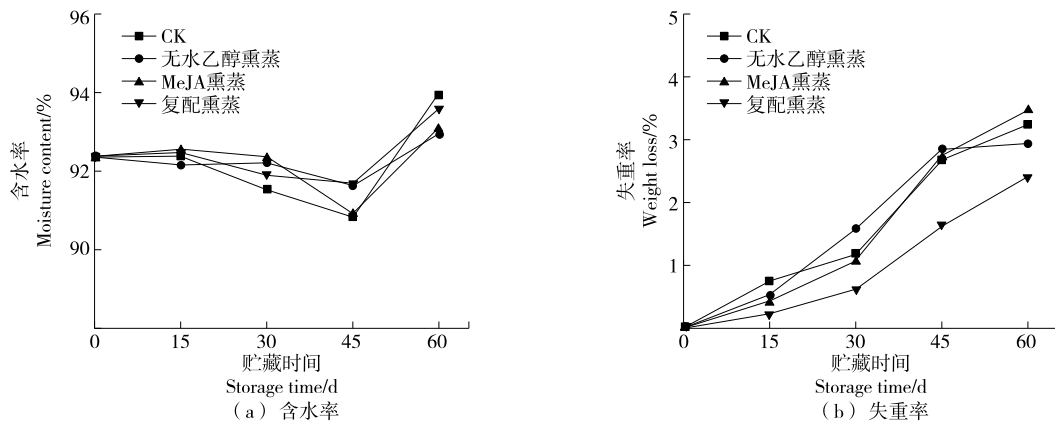


图 2 熏蒸处理对方竹鲜笋含水率和失重率的影响

Figure 2 Effects of fumigation treatment on moisture content and weight loss of fresh bamboo shoots

重率在贮藏后期显著低于其他处理的($P<0.05$),贮藏第 45 天,复合熏蒸处理的失重率为 1.63%,分别为 CK、无水乙醇熏蒸、MeJA 熏蒸处理的 61.05%,57.39%,59.70%。

2.1.3 对硬度、脆度、剪切力的影响 由图 3 可知,贮藏期间,方竹鲜笋的硬度不断上升,且剪切力的变化趋势与硬度相近,其中复合熏蒸处理在贮藏期间对剪切力的上升起到了抑制作用。脆度的整体变化趋势与硬度和剪切力的相近,贮藏后期复合熏蒸处理的方竹鲜笋脆度显著优于其他处理的($P<0.05$)。

2.1.4 对总色差值(ΔE)、褐变指数(BI)的影响 由图 4(a)可知,随着贮藏时间的延长, ΔE 不断上升,贮藏第 60 天,复合熏蒸处理的 ΔE 为 19.67,显著低于其他处理的($P<0.05$)。由图 4(b)可知,贮藏期间,褐变指数呈上升趋势。贮藏后期,CK 处理的褐变指数显著高于其他处理($P<0.05$);复合熏蒸处理的褐变指数波动最小,贮藏第 45 天时仅为 76.67,显著低于其他处理的($P<0.05$)。褐变是造成竹笋衰老的主要原因,严重影响方竹鲜笋采后品质^[27]。贮藏期间,方竹鲜笋褐变指数不断上升,可能是贮藏期间褐变不断进行,与 Zheng 等^[28]的结论基本一致。

2.1.5 对可滴定酸、游离氨基酸含量的影响 由图 5 可知,贮藏期间,可滴定酸含量呈先上升后下降趋势,贮藏

前期含量上升,是因为竹笋采后机械损伤破坏了其组织结构,导致其含量上升;贮藏后期含量下降是竹笋不断进行生理代谢,消耗了有机酸等物质。游离氨基酸含量呈先下降后上升趋势,贮藏第 60 天,复合熏蒸处理的游离氨基酸含量为 2.11 mg/g,显著高于其他处理的($P<0.05$)。

2.1.6 对 MDA、V_C含量的影响 随着 ROS 的不断积累,过量的 ROS 产物(H_2O_2 、 O_2^-)会破坏细胞的完整性,导致细胞膜氧化损伤,MDA 被认为是膜脂氧化的最终产物^[29-30]。由图 6(a)可知,贮藏期间,MDA 含量呈先下降后上升趋势。贮藏第 60 天,CK 对照的 MDA 含量最高,说明膜脂严重氧化,此时复合熏蒸处理的 MDA 含量显著低于无水乙醇熏蒸和 CK 处理的($P<0.05$)。

抗坏血酸作为主要的非酶抗氧化剂可以显著抑制果蔬体内 MDA 的积累,从而防止 ROS 积累导致果实衰老过程中的氧化损伤^[31]。由图 6(b)可知,贮藏期间,V_C 含量呈先上升后下降趋势。贮藏 45 d 后,复合熏蒸处理的 V_C 含量显著高于其他 3 个处理的($P<0.05$),贮藏第 60 天,CK 对照的 V_C 含量为 4.71 mg/100 g,为复合熏蒸的 88.36%,表明复合熏蒸处理可以较好地维持 V_C 含量。

2.1.7 对可溶性蛋白质和总黄酮含量的影响 由图 7(a)可知,贮藏期间,可溶性蛋白质含量呈波动下降趋势。复

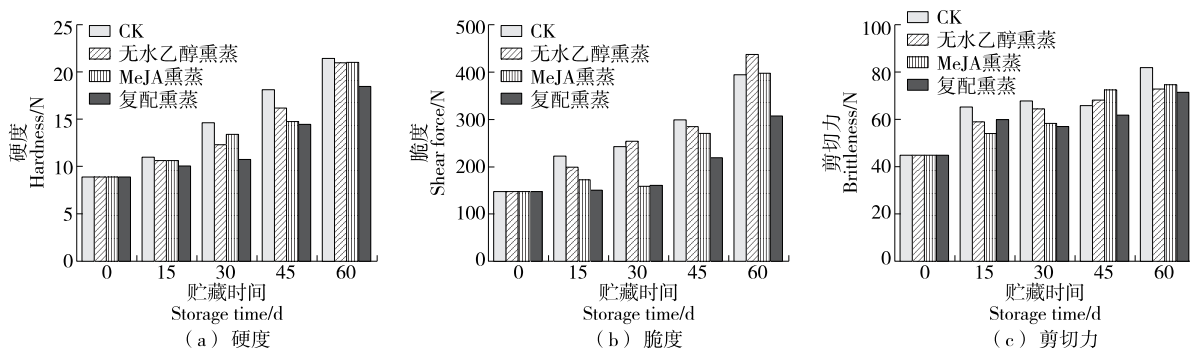


图 3 熏蒸处理对方竹鲜笋硬度、剪切力和脆度的影响

Figure 3 Effects of fumigation on hardness, shear force and brittleness of fresh bamboo shoots

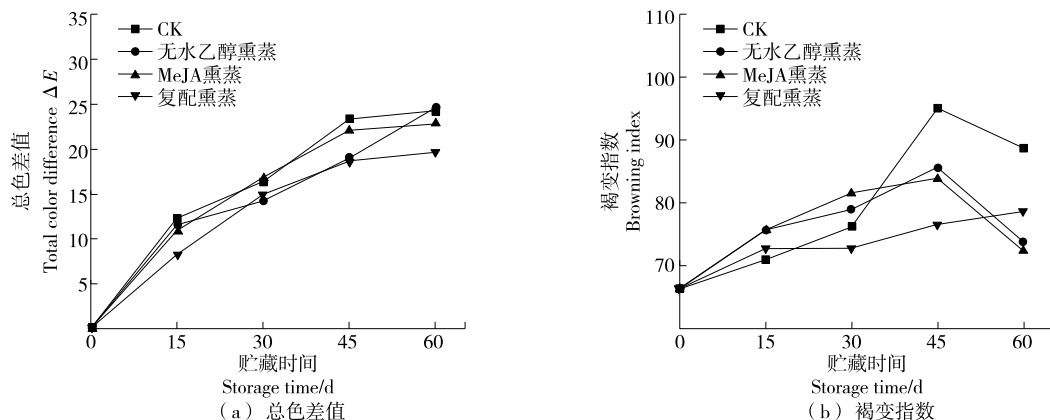


图 4 熏蒸处理对方竹鲜笋褐变指数和总色差值的影响

Figure 4 Effects of fumigation on total color difference and browning index of fresh bamboo shoots

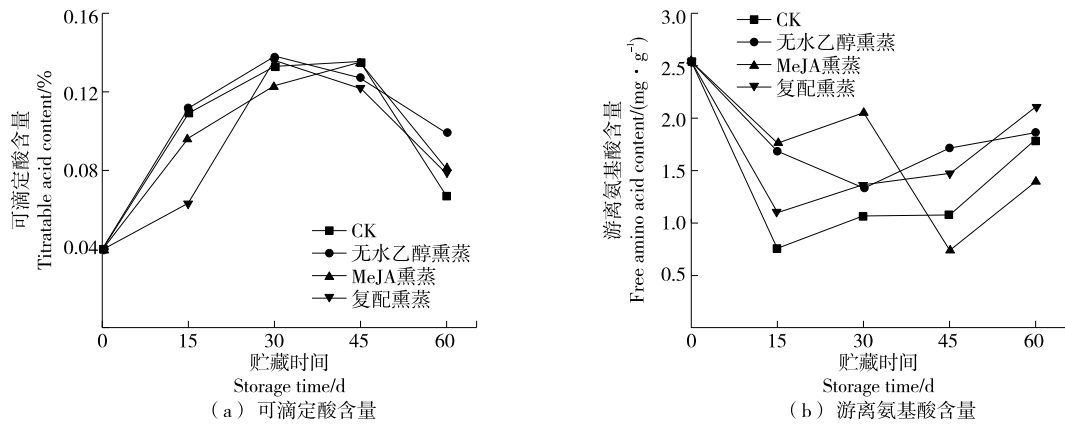
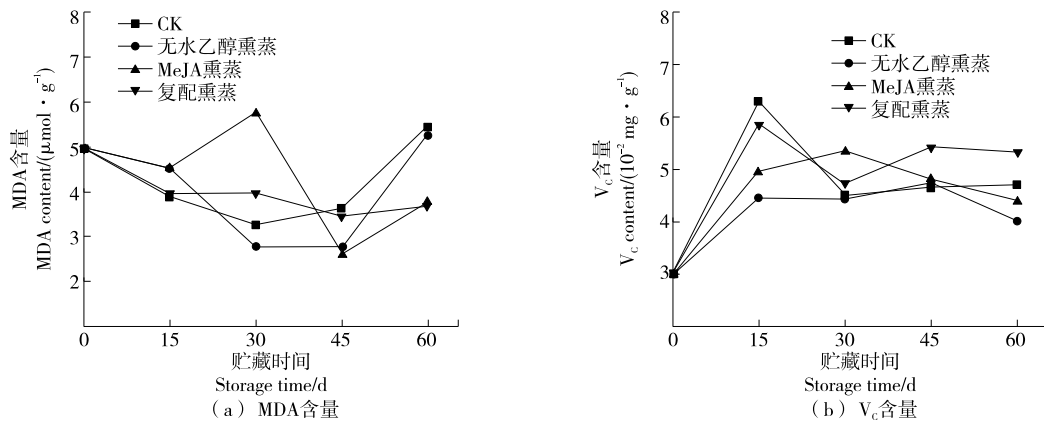


图5 熏蒸处理对方竹鲜笋可滴定酸含量和游离氨基酸含量的影响

Figure 5 Effects of fumigation on the contents of titratable acid and free amino acid of fresh bamboo shoots

图6 熏蒸处理对方竹鲜笋MDA含量和V_C含量的影响Figure 6 Effects of fumigation treatment on the contents of MDA and V_C of fresh bamboo shoots

合熏蒸处理可以减缓可溶性蛋白质含量的下降,贮藏第45天,复合熏蒸处理的可溶性蛋白质含量为1.50 mg/g,显著高于其他处理的($P < 0.05$)。

由图7(b)可知,贮藏期间,总黄酮含量不断下降。与CK处理相比,无水乙醇和MeJA熏蒸处理能在一定程度

上减缓总黄酮含量的下降。贮藏第60天,复合熏蒸处理的总黄酮含量为0.86 mg/g,显著高于其他处理的($P < 0.05$)。

2.1.8 对PPO/APX活性的影响 由图8(a)所示,贮藏第30、45天,MeJA熏蒸处理的PPO活性显著高于其他

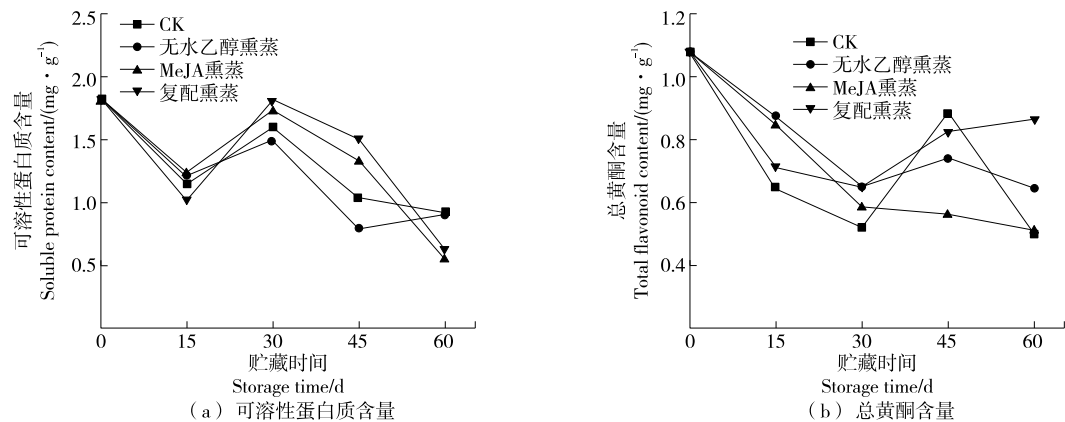


图7 熏蒸处理对方竹鲜笋可溶性蛋白质含量和总黄酮含量的影响

Figure 7 Effects of fumigation treatment on the contents of soluble protein and total flavonoid of fresh bamboo shoots

处理的 ($P < 0.05$), 贮藏第 45 天, MeJA 熏蒸处理的 PPO 活性为 $7.85 \text{ U}/(\text{g} \cdot \text{min})$, 分别为 CK、无水乙醇熏蒸、复配熏蒸处理的 139%, 176%, 1.61%, 表明 MeJA 可以激活 PPO 活性, 与付安珍等^[32]的结论一致。

APX 酶可催化 V_C 和 H_2O_2 发生氧化还原反应, 在清除活性氧中发挥重要作用^[33]。由图 8(b)可知, 贮藏 15 d 后, APX 活性呈上升趋势。贮藏后期, 复合熏蒸处理的 APX 活性显著低于 CK 处理的 ($P < 0.05$), 表明复合熏蒸处理能更好地减少方竹鲜笋贮藏期间活性氧的产生。果蔬贮藏期间细胞膜完整性在褐变相关酶和底物的抗褐变性中起重要作用^[34]。细胞膜的完整性与 ROS 含量息息相关, 而 ROS 含量又与 V_C 、总黄酮等非酶抗氧化物含量以及 POD 等酶活性息息相关^[35]。复合熏蒸处理能减缓 V_C 、总黄酮含量的下降, 诱导 APX 活性变化, 表明复合熏蒸处理能较好地维持体内非酶抗氧化物质含量, 与复合熏蒸处理可以显著抑制 MDA 含量的积累是一致的。酶促褐变被认为是造成竹笋褐变的重要原因^[36], 复合熏蒸处理能够抑制 PPO 活性, 达到抑制方竹鲜笋贮藏期间的酶促褐变。

2.1.9 对 POD、PAL 活性的影响 由图 9(a)可知, 贮藏

期间, POD 活性呈波动下降趋势。贮藏前中期, MeJA 熏蒸处理的 POD 活性显著高于其他处理的 ($P < 0.05$), 表明 MeJA 能激活 POD 活性, 与刘瑶等^[37]的结果一致。贮藏期间, 复合熏蒸处理的 POD 活性变化最平稳, 贮藏第 15 天时显著低于其他处理的 ($P < 0.05$)。

由图 9(b)可知, 贮藏期间, PAL 活性呈先上升后下降趋势, 复合熏蒸处理的 PAL 活性在贮藏中期处于最低水平, 其中贮藏 30 天时, 仅为无水乙醇熏蒸、MeJA 熏蒸、CK 处理的 52.15%, 63.14%, 41.29%, 表明复合熏蒸处理可以较好地抑制 PAL 活性。

2.2 相关性分析与主成分分析

2.2.1 相关性分析 由图 10 可知, 贮藏时间和呼吸强度、腐烂率、失重率、硬度、剪切力、脆度、褐变指数、总色差值、可滴定酸含量、 V_C 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与游离氨基酸含量、MDA 含量、可溶性蛋白质含量、总黄酮含量、APX 活性、POD 活性呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 说明贮藏期间腐烂率、多酚含量、游离氨基酸含量、POD 活性、可溶性蛋白质含量、 V_C 含量等指标的变化均能影响方竹鲜笋的保鲜效果, 且含水率又与可滴定酸含量、PPO 活性、PAL 活性呈显著负相关 ($P < 0.05$)。因

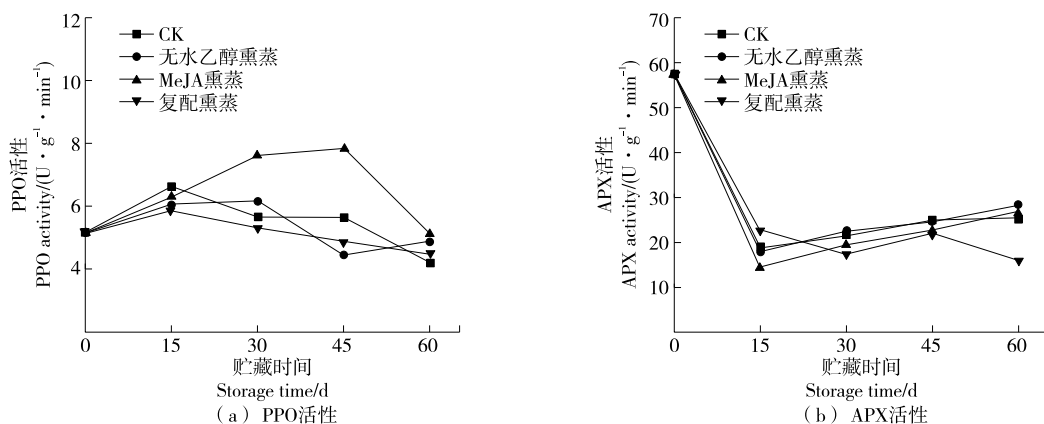


图 8 熏蒸处理对方竹鲜笋 PPO 活性和 APX 活性的影响

Figure 8 Effects of fumigation on the activity of PPO and APX of fresh bamboo shoots

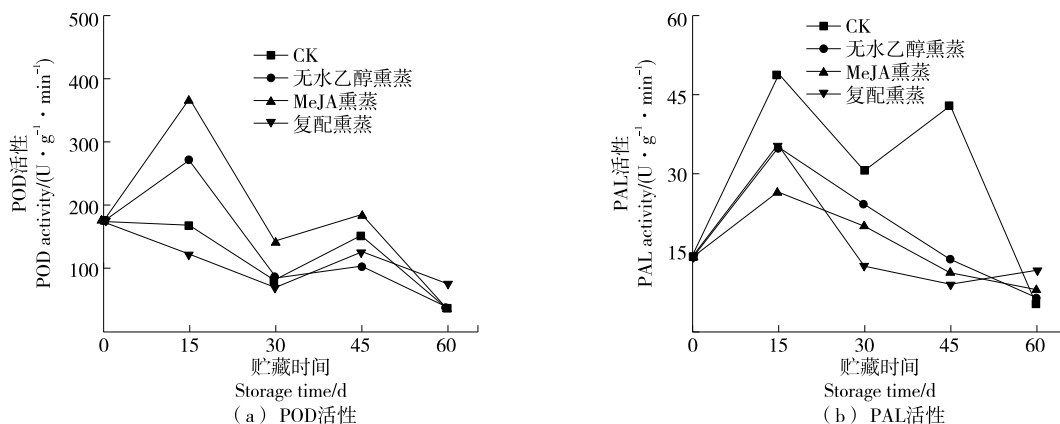


图 9 熏蒸处理对方竹鲜笋 POD 活性和 PAL 活性的影响

Figure 9 Effects of fumigation on the activity of POD and PAL of fresh bamboo shoots

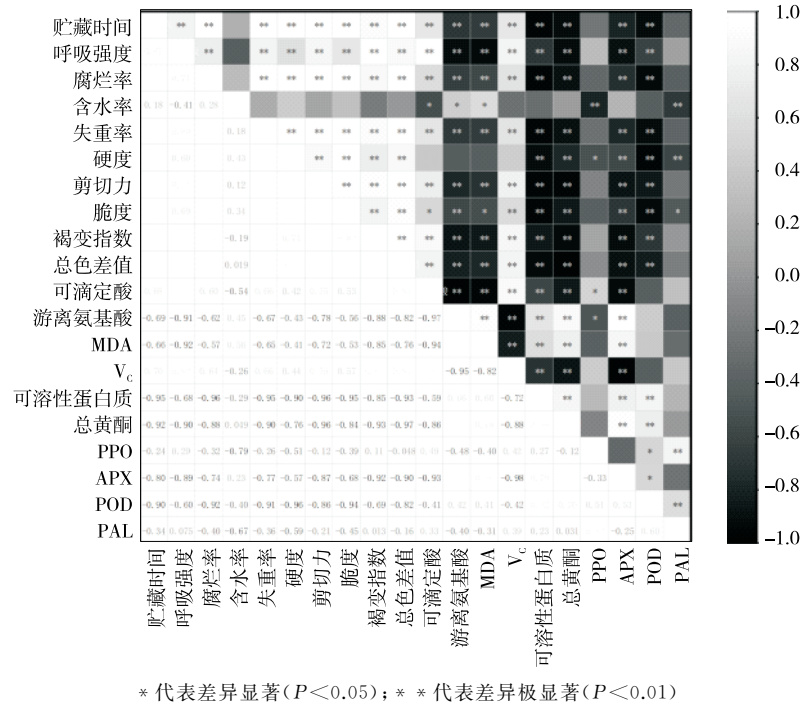


图 10 各生理指标间的相关性矩阵热图

Figure 10 Heatmap of the correlation matrix between the various physiological metrics

此,各生理指标均能反映方竹鲜笋的贮藏保鲜效果。

2.2.2 主成分分析 将 19 个指标拟合出 3 个特征值 > 1 的主成分,特征值分别为 9.255, 4.396, 1.648, 贡献率分别为 48.71%, 23.14%, 8.67%, 累计贡献率之和为 80.52%, 达到复合分析要求。

由图 11 可知,总色差值、失重率、腐烂率在 1 主成分具有较高正载荷,总黄酮含量在 1 主成分具有较高负载荷,证明第 1 主成分主要代表这些指标的信息。可滴定酸含量、PAL 活性、PPO 活性在 2 主成分具有较高负载荷,硬度在 2 主成分具有较高正载荷,证明第 2 主成分主要代表这些指标。呼吸强度、Vc 含量、可溶性蛋白质含量在 3 主成分具有较高负载荷,含水率在第 3 主成分具有较高正载荷。根据载荷绝对值大小可知,第 1 主成分贡献率大小依次为总色差值、失重率、腐烂率、总

黄酮含量;第 2 主成分贡献率大小依次为 PPO 活性、PAL 活性、可滴定酸含量、硬度;第 3 主成分贡献率大小依次为含水率、呼吸强度、Vc 含量、可溶性蛋白质含量。综上,影响方竹鲜笋贮藏保鲜效果的关键指标为总色差值、失重率、PPO 活性、PAL 活性、含水率和呼吸强度。

2.2.3 方竹鲜笋贮藏保鲜效果综合评价 采用 3 个主成分变量 PCA 1、PCA 2、PCA 3 代替原来的 19 个指标,得出各主成分特征向量为 (Z_i 代表各个指标标准化后的数据):

$$Y_1 = 0.078Z_1 + 0.096Z_2 + 0.098Z_4 + 0.079Z_5 + 0.104Z_6 + 0.088Z_7 + 0.082Z_8 + 0.105Z_9 + 0.071Z_{10} - 0.072Z_{11} - 0.050Z_{12} + 0.064Z_{13} - 0.078Z_{14} - 0.088Z_{15} + 0.01Z_{16} - 0.080Z_{17} - 0.057Z_{18} - 0.06Z_{19}, \quad (4)$$

$$Y_2 = -0.088Z_1 + 0.096Z_2 + 0.167Z_3 + 0.073Z_4 + 0.142Z_5 + 0.033Z_6 + 0.111Z_7 - 0.038Z_8 + 0.008Z_9 - 0.142Z_{10} + 0.140Z_{11} + 0.109Z_{12} - 0.108Z_{13} - 0.060Z_{14} + 0.031Z_{15} - 0.169Z_{16} + 0.098Z_{17} - 0.107Z_{18} - 0.157Z_{19}, \quad (5)$$

$$Y_3 = -0.306Z_1 + 0.10Z_2 + 0.362Z_3 - 0.101Z_4 - 0.071Z_5 + 0.069Z_6 - 0.004Z_7 - 0.085Z_8 - 0.017Z_9 - 0.134Z_{10} - 0.062Z_{11} + 0.185Z_{12} + 0.313Z_{13} - 0.242Z_{14} - 0.078Z_{15} + 0.049Z_{16} - 0.217Z_{17} + 0.129Z_{18} + 0.263Z_{19}. \quad (6)$$

同时,选取第 1、第 2、第 3 主成分的方差贡献率 α_1 (48.71%)、 α_2 (23.14%)、 α_3 (8.67%) 作为权数,构建综合

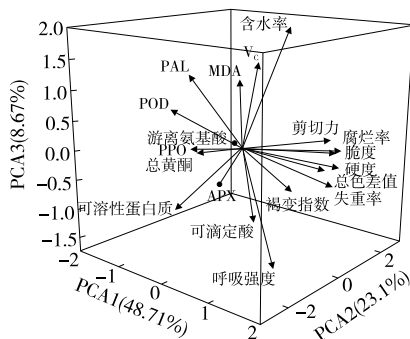


图 11 因子载荷图

Figure 11 Factor load diagram

评价模型:

$$F = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2 + \alpha_3 Y_3 = 0.487 \ 1Y_1 + 0.231 \ 4Y_2 + 0.086 \ 7Y_3 \quad (7)$$

由图 12 可知,贮藏期间,方竹鲜笋的综合得分呈下降趋势,复合熏蒸处理的下降最缓,在贮藏后期均高于无水乙醇熏蒸、MeJA 熏蒸和 CK 处理。贮藏第 60 天,复合熏蒸处理的综合得分为-0.65,分别比无水乙醇熏蒸、MeJA 熏蒸、CK 处理高 0.14,0.25,0.50,表明复合熏蒸处理具备更好的保鲜效果。

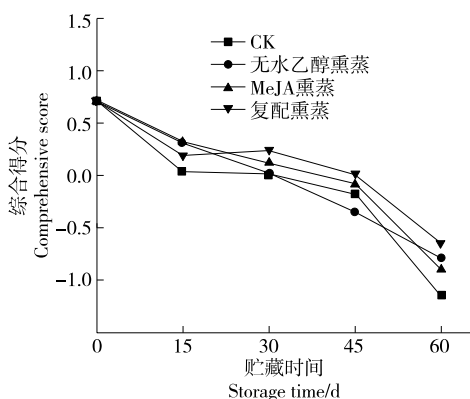


图 12 方竹鲜笋贮藏保鲜综合得分

Figure 12 Comprehensive score of fresh bamboo shoots during storage

3 结论

试验表明,随着贮藏时间的延长,方竹笋的硬度、剪切力、脆度不断上升,表明方竹鲜笋在贮藏期间发生了木质化。与其他处理相比,复合熏蒸处理的苯丙氨酸解氨酶活性在贮藏中后期处于最低水平,表明复合熏蒸处理可以抑制苯丙氨酸解氨酶活性来延缓方竹鲜笋木质化,与复合熏蒸处理在贮藏期间的硬度、剪切力、脆度均处于最低水平是一致的。游离氨基酸、维生素 C、总黄酮是果蔬的重要营养物质,复合熏蒸处理可减缓维生素 C、游离氨基酸、总黄酮含量的下降,较好地维持方竹鲜笋营养价值。复合熏蒸处理可以缓解方竹鲜笋褐变和木质化,维持方竹鲜笋的品质。由主成分分析的综合得分可知,贮藏 60 d 后,无水乙醇熏蒸和茉莉酸甲酯熏蒸处理的得分均高于空白对照组,复合熏蒸处理的得分最高。

综上,复合熏蒸处理能有效缓解方竹鲜笋在贮藏期间发生木质化、腐烂、褐变等现象,减缓方竹鲜笋品质的下降,具备更好的保鲜效果。但二者在方竹鲜笋贮藏保鲜中的协同效应机理尚未清楚,仍需进一步研究。

参考文献

[1] CHEN G J, FANG C C, RAN C X, et al. Comparison of different extraction methods for polysaccharides from bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) processing by-products [J].

International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 903-914.

[2] YANG H, ZHOU C, WU F, et al. Effect of nitric oxide on browning and lignification of peeled bamboo shoots[J]. Postharvest Biology & Technology, 2010, 57(1): 72-76.

[3] WANG S, SHI X, LIU F, et al. Effects of exogenous methyl jasmonate on quality and preservation of postharvest fruits: A review[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129482.

[4] YANG W, WU Y, HU Q, et al. Preharvest treatment of *Agaricus bisporus* with methyl jasmonate inhibits postharvest deterioration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 10: 158-163.

[5] FENG X, CHEN X, PENG J, et al. Effect of ethanol treatment on quality and antioxidant activity in postharvest broccoli florets[J]. European Food Research and Technology, 2012, 235(5): 793-800.

[6] 肖婷, 何欣遥, 吴姝鸿, 等. 乙醇熏蒸对小白菜的护绿机理[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 173-180.

XIAO T, HE X Y, WU S H, et al. Green protection mechanism of Chinese cabbage by ethanol fumigation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 173-180.

[7] 廖海达, 陈萍, 莫亦铭, 等. 乙醇在水果采后保鲜中的应用研究进展与展望[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 219-224.

LIAO H D, CHEN P, MO Y M, et al. Research progress and prospect of ethanol application in postharvest fruit preservation[J]. Food Studies and Development, 2022, 43(11): 219-224.

[8] 魏奇, 李捷, 刘蓓蓓, 等. ϵ -聚赖氨酸盐酸盐对贮藏期间双孢蘑菇表面微生物生长和保鲜的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 256-264.

WEI Q, LI J, LIU B B, et al. Effects of ϵ -polylysine hydrochloride on microbial growth and preservation of *Agaricus bisporus* during storage[J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2022, 22(3): 256-264.

[9] 廖嘉, 胡文忠, 权春善, 等. 采后浆果熏蒸保鲜技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 277-284.

LIAO J, HU W Z, QUAN C S, et al. Research progress of fumigation preservation technology of postharvest berries[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 277-284.

[10] 徐锦洋, 王瑞, 张妮, 等. 基于主成分分析法研究自发气调包装对方竹鲜笋保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 322-330.

XU J Y, WANG R, ZHANG N, et al. Based on the principal component analysis method, the preservation effect of fresh bamboo shoots was studied[J]. Food Industry Technology, 2023, 44(5): 322-330.

[11] 董春风, 赵一鹤. 甜龙竹笋采后不同时间及温度储藏下酶活性的变化[J]. 西部林业科学, 2021, 50(1): 79-84.

DONG C F, ZHAO Y H. Changes of enzyme activity of *Phyllostachys pubescens* shoots stored at different time and temperature after harvest[J]. Western Forestry Science, 2021, 50(1): 79-84.

[12] ZENG F, LUO Z, XIE J, et al. Gamma radiation control quality and

- lignification of bamboo shoots (*Phyllostachys praecox* f. *prevernalis*) stored at low temperature[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2015, 102: 17-24.
- [13] ZHANG D D, XU X F, ZHANG Z K, et al. 6-Benzylaminopurine improves the quality of harvested litchi fruit [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2018, 143: 137-142.
- [14] 张瑜瑜, 用成健, 刘佳妮, 等. 氯化钙处理对蓝莓果实采后生理代谢及品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(3): 87-93.
- ZHANG Y Y, YONG C J, LIU J N, et al. Effects of calcium chloride treatment on postharvest physiological metabolism and quality of blueberry fruit[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(3): 87-93.
- [15] GHEYARSARIGH S, MIRDEHGHAN S H, GHASEMNEZHAD M, et al. The inhibitory effect of nitric oxide on enzymatic browning reactions of in-package fresh pistachios (*Pistacia vera* L.) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 159: 110998.
- [16] LI R, ZHENG Q, LU J, et al. Chemical composition and deterioration mechanism of *Pleurotus tuoliensis* during postharvest storage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127731.
- [17] ADHIKARY T, GILL P, JAWANDHA S K, et al. Efficacy of postharvest sodium nitroprusside application to extend storability by regulating physico-chemical quality of pear fruit [J]. *Food Chemistry*, 2020, 346(2): 128-134.
- [18] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅, 等. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 32-132.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M, et al. Guidance of postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 32-132.
- [19] 郑俊峰, 谢建华, 庞杰. 外源茉莉酸甲酯对解放钟枇杷果实采后品质的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(10): 120-124.
- ZHENG J F, XIE J H, PANG J. Effect of exogenous methyl jasmonate on the postharvest quality of the fruit [J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(10): 120-124.
- [20] WANG J, XIN Z, QIAN Z, et al. Low temperature conditioning alleviates peel browning by modulating energy and lipid metabolisms of 'Nanguo' pears during shelf life after cold storage [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2017, 131: 10-15.
- [21] KIM D O, JEONG S W, LEE C Y, et al. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums[J]. *Food Chemistry*, 2003, 81(3): 321-326.
- [22] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [23] PETRICCIONE M, PAGANO L, FORNITI R, et al. Postharvest treatment with chitosan affects the antioxidant metabolism and quality of wine grape during partial dehydration[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2018, 137: 38-45.
- [24] 李静仪, 王增利, 昌萍, 等. 冰温贮藏及出库方式对欧李保鲜效果的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 155-161.
- LI J Y, WANG Z L, CHANG P, et al. The influence of ice-temperature storage and storage on the preservation effect of plum [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(6): 155-161.
- [25] 陈磊, 黄杰, 杨瑞, 等. 臭氧结合气调包装对毛竹笋的保鲜作用[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 200-205.
- CHEN L, HUANG J, YANG R, et al. Effects of ozone combined with air conditioning packaging on preservation of Bamboo shoots [J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 200-205.
- [26] WANG J, JIANG J, WANG J, et al. The influence of gamma irradiation on the storage quality of bamboo shoots[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, 159: 124-130.
- [27] 戴丹, 郑剑, 周成敏, 等. 草酸对冷藏去壳马蹄笋的保鲜效果及机制研究[J]. *核农学报*, 2021, 35(10): 2 294-2 304.
- DAI D, ZHENG J, ZHOU C M, et al. Study on the preservation effect and mechanism of oxalic acid on refrigerated shelled horseshoe bamboo shoots[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2021, 35(10): 2 294-2 304.
- [28] ZHENG J, LI S, XU Y, et al. Effect of oxalic acid on edible quality of bamboo shoots (*Phyllostachys prominens*) without sheaths during cold storage[J]. *LWT*, 2019, 109: 194-200.
- [29] 刘家粮, 张越, 刘力霞, 等. 褪黑素对采后荔枝果实冷害及生理变化的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(12): 200-213.
- LIU J L, ZHANG Y, LIU L X, et al. Effects of melatonin on cold damage and physiological changes in harvested litchi fruits [J]. *Chinese Food Journal*, 2022, 22(12): 200-213.
- [30] CHEN C, CHEN J, NIE Z, et al. Chitosan coating alleviates postharvest juice sac granulation by mitigating ROS accumulation in harvested pummelo (*Citrus grandis* L. Osbeck) during room temperature storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 169: 111309.
- [31] 贾乐, 韩延超, 房祥军, 等. 褪黑素处理对香菇采后品质及活性氧代谢的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(23): 229-236.
- JIA L, HAN Y C, FANG X J, et al. Effects of melatonin treatment on postharvest quality and reactive oxygen species metabolism[J]. *Food Science*, 2021, 42(23): 229-236.
- [32] 付安珍, 左进华, 王清, 等. 茉莉酸甲酯处理对青圆椒采后冷害生理与营养品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 213-219.
- FU A Z, ZUO J H, WANG Q, et al. Methyl jasmonate treatment on postharvest chilling injury physiology and nutritional quality of green pepper[J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 213-219.
- [33] 王敏, 殷菲彤, 梁园丽, 等. 不同机械伤处理对香蕉果皮活性氧代谢的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(16): 284-292.
- WANG M, YIN F R, LIANG Y L, et al. Effect of different mechanical wound treatments on Roxygen metabolism in banana peel [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2022, 38(16): 284-292.

(下转第 142 页)

- material quality and brine salting[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(1): 46-54.
- [13] LIU S L, ZENG X H, ZHANG Z Y, et al. Effects of immersion freezing on ice crystal formation and the protein properties of snakehead (*Channa argus*) [J]. Foods, 2020, 9(4): 411.
- [14] SHI L, XIONG G, YIN T, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the protein denaturation and water properties of red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 133: 110124.
- [15] JIANG Q, OKAZAKI E, ZHENG J, et al. Structure of northern snakehead (*Channa argus*) meat: Effects of freezing method and frozen storage[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1 166-1 179.
- [16] LI D, QIN N, ZHANG L, et al. Degradation of adenosine triphosphate, water loss and textural changes in frozen common carp (*Cyprinus carpio*) fillets during storage at different temperatures[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 98: 294-301.
- [17] VILAS C, ALONSO A A, HERRERA J R, et al. A mathematical model to predict early quality attributes in hake during storage at low temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 222: 11-19.
- [18] 张艳霞. 养殖大黄鱼品质评价及冻藏过程中品质变化规律的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 33-34.
- ZHANG Y X. Quality evaluation of cultured *Pseudosciaena crocea* and its quality changes during frozen storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 33-34.
- [19] PAN S K, WU S J. Effect of Chitooligosaccharides on the denaturation of weever myofibrillar protein during frozen storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 65: 549-552.
- [20] NGUYEN A T, DONALDSON R P. Metal-catalyzed oxidation induces carbonylation of peroxisomal proteins and loss of enzymatic activities[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2005, 439(1): 25-31.
- [21] 丘静, 秦德丽, 刘纯友, 等. 低温贮藏过程中水牛肉蛋白质的变化[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 137-142.
- QIU J, QIN D L, LIU C Y, et al. Protein changes of buffalo meat during low temperature storage[J]. Food & Machinery, 2022, 38 (2): 137-142.
- [22] 张志广. 冷冻对养殖大黄鱼品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2010: 28-29.
- ZHANG Z G. Study on quality changes of cultured large yellow croaker subjected to different freezing methods [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2010: 28-29.
- [23] 鲁珺. 液氮深冷速冻对带鱼和银鲈品质及其肌肉组织的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 33-36.
- LU J. Effect of cryogenic freezing by liquid nitrogen on the quality and microstructure of hairtail and silver pomfret [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 33-36.
- [24] BADII F, HOWELL N K. Changes in the texture and structure of cod and haddock fillets during frozen storage [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(4): 313-319.
-
- (上接第 127 页)
- [34] 马晓艳, 王娟, 张海红, 等. 低温等离子体处理对采后黄花菜活性氧代谢和品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 254-260.
- MA X Y, WANG J, ZHANG H H, et al. Effect of low-temperature plasma treatment on reactive oxygen species metabolism and quality of postharvest day lilies[J]. Food Science, 2021, 42(23): 254-260.
- [35] DONG T, CAO Y, LI G, et al. A novel aspartic protease inhibitor inhibits the enzymatic browning of potatoes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 172: 111353.
- [36] 史蔓蔓, 张文, 刘飞翔, 等. 竹笋采后生理生化变化及贮藏保鲜研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 1-20.
- SHI M M, ZHANG W, LIU F X, et al. Progress on physiological and biochemical changes and storage and preservation of bamboo shoots after harvest[J]. Food Science, 2023, 44(7): 1-20.
- [37] 刘瑶, 郑秋丽, 左进华, 等. 茉莉酸甲酯结合低温预贮对尖椒采后品质及生理特性的影响 [J]. 食品科学, 2020, 41(3): 178-184.
- LIU Y, ZHENG Q L, ZUO J H, et al. Effects of methyl jasmonate combined with low temperature pre storage on post harvest quality and physiological characteristics of pepper[J]. Food Science, 2020, 41(3): 178-184.
-
- (上接第 133 页)
- [22] AMANDA E, CHOO W S. Effect of refrigerated storage on the physicochemical characteristics and viability of *Lactobacillus plantarum* in fermented watermelon juice with or without supplementation with inulin or fructooligosaccharide[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(12): e13831.
- [23] OLIVEIRA P M D, JUNIOR B R D C L, MARTINS E M F, et al. Mango and carrot mixed juice: A new matrix for the vehicle of probiotic lactobacilli[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(1): 98-109.
- [24] 马晓艳, 王娟, 张海红, 等. 低温等离子体处理对采后黄花菜活性氧代谢和品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 254-260.
- MA X Y, WANG J, ZHANG H H, et al. Effect of cold plasma treatment on reactive oxygen species metabolism and quality of postharvest daylily[J]. Food Science, 2021, 42(23): 254-260.
- [25] ZHENG X, YU Y S, XIAO G S, et al. Comparing product stability of probiotic beverages using litchi juice treated by high hydrostatic pressure and heat as substrates[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 23: 61-67.