杨通琴, 邓艳梅, 袁国惠, 等. 低温等离子体活化水对甜龙竹笋采后贮藏品质的调控作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 383−391. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010290

YANG Tongqin, DENG Yanmei, YUAN Guohui, et al. Regulation of Postharvest Storage Quality of *Dendrocalamus brandisii* Shoots by Low-temperature Plasma-activated Water[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 383−391. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010290

·贮运保鲜·

低温等离子体活化水对甜龙竹笋采后贮藏品质的调控作用

杨通琴[1], 邓艳梅[1], 袁国惠[1], 杨娇娇[1,2,3], 郭　磊[1,2,3], 范方宇[1,2,3,*]

（1.西南林业大学 生物与食品工程学院, 云南昆明 650224;
2.西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南昆明 650224;
3.云南省森林灾害预警与控制实验室, 云南昆明 650224）

摘　要: 为探究低温等离子体活化水（Plasma-activated water，PAW）对采后甜龙竹笋贮藏品质的影响，利用低温等离子体在 160 V、160 Hz，时间 1、2、3 min 条件下制备 PAW（PAW_1、PAW_2、PAW_3），分析 PAW 对采后甜龙竹笋菌落总数、酶活性及相关理化指标的影响。结果表明，与 CK 组（蒸馏水处理）相比，PAW 可抑制鲜切甜龙竹笋呼吸强度，减少总酚和黄酮的损失，延缓可溶性蛋白、可溶性糖、维生素 C 含量的下降；PAW_1、PAW_2、PAW_3 处理的甜龙竹笋贮藏第 18 d 时，苯丙氨酸解氨酶活性下降了 3.00、5.25、3.90 U/g（P<0.05）；贮藏第 12 d 时，过氧化物酶活性下降了 5.91、10.16、7.94 U/g（P<0.05）；贮藏第 30 d 时，纤维素、木质素累积合成量分别降低了 6.66、24.19、10.59 mg/g（P<0.05）和 1.27、2.49、1.20 mg/g（P<0.05）。该研究为 PAW 技术在甜龙竹笋保鲜与加工领域的应用提供了一定的理论依据。

关键词: 低温等离子体活化水, 甜龙竹笋, 贮藏品质, 酶活性
中图分类号: TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0383−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010290
本文网刊:

Regulation of Postharvest Storage Quality of *Dendrocalamus brandisii* Shoots by Low-temperature Plasma-activated Water

YANG Tongqin[1], DENG Yanmei[1], YUAN Guohui[1], YANG Jiaojiao[1,2,3], GUO Lei[1,2,3], FAN Fangyu[1,2,3,*]

（1.College of Biological and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2.Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China, Kunming 650224, China;
3.Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control of Yunnan Province, Kunming 650224, China）

Abstract: To investigate the effect of low-temperature plasma-activated water (PAW) on the storage quality of postharvest *Dendrocalamus brandisii* (*D. brandisii*) shoots, using low-temperature plasma at 160 V and 160 Hz, preparation of PAWs (PAW_1, PAW_2, PAW_3) at 1, 2, and 3 min, the effects of PAW on the total number of colonies, enzyme activities and related physicochemical indexes of *D. brandisii* shoots after harvest were analyzed. The results showed that compared to the CK group (distilled water treatment), PAW could inhibit the respiratory intensity of fresh-cut *D. brandisii* shoots, reduce the loss of total phenols and flavonoids, delay the decline in soluble protein, soluble sugar, vitamin C content. PAW_1, PAW_2, and PAW_3-treated *D. brandisii* shoots at the 18th day of storage, the activity of phenylalanine ammonia-lyase decreased by 3.00, 5.25 and 3.90 U/g (P<0.05). On the 12th day of storage, peroxidase activity decreased by 5.91, 10.16 and 7.94 U/g

收稿日期: 2025−02−07
基金项目: 中央引导地方科技发展资金自由探索类基础研究项目（202407AA110007）; 云南省基础研究计划项目重点项目资助（202401AS070012）; 云南省重大科技专项计划（202302AE090019）。
作者简介: 杨通琴（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工, E-mail: 18385703790@163.com。
*** 通信作者:** 范方宇（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农林产品加工, E-mail: ffy118@163.com。

(P<0.05). On the 30th day of storage, the cumulative synthesis of cellulose and lignin decreased by 6.66, 24.19 and 10.59 mg/g (P<0.05) and 1.27, 2.49 and 1.20 mg/g, respectively (P<0.05). This study provides some theoretical basis for the application of PAW technology in the field of preservation and processing of *D. brandisii* shoots.

Key words: low-temperature plasma-activated water; *D. brandisii* shoots; storage quality; enzyme activity

甜龙竹(*Dendrocalamus brandisii*, *D. brandisii*)属禾本科(Gramineae)牡竹属(*Dendrocalamus*)竹种,广泛分布于云南省南部、西南部的西双版纳、普洱和临沧等地。甜龙竹笋笋体洁白粗大、肉质脆嫩、鲜甜可口、生熟均可食用[1−2]。鲜笋水分含量高,富含蛋白质、碳水化合物、膳食纤维等多种有益于人体健康的营养物质[3],可改善人体消化、预防心脑血管疾病及癌症,具有多种功能作用[4−5]。甜龙竹笋多产于山区,出笋时间集中于夏季,采收时易受机械损伤被微生物侵染[5];贮存不当造成细胞壁增厚、木质纤维化、笋体褐变腐烂等问题而失去商业价值[6]。近年来竹笋采后活体保鲜一直是研究热点。为延长采后竹笋新鲜度,臭氧结合气调包装[7]、低温冷冻[8]、辐射[9]、化学保鲜剂[10]等已应用于各类竹笋保鲜,并取得了一定的效果。基于此,探索一种易操作、绿色高效的甜龙竹笋活体保鲜方法,延缓其木质化,维持采后品质有利于促进甜龙竹笋的产业发展。

等离子体活化水(Plasma-activated water, PAW)也称等离子体酸、等离子体活化液,通过对蒸馏水进行低温等离子体作用,使其与等离子体中的活性物质发生化学反应,生成更丰富的活性组分[11]。PAW 含有超氧阴离子、过氧化氢、臭氧、硝酸根和亚硝酸根离子等活性物质[12],处理样品时,这些活性物质会破坏微生物细胞中的 DNA、蛋白质、脂质和其他结构[13],是一种新型的杀菌、保鲜剂。PAW 因操作简单、绿色环保、无残留等被广泛应用于果蔬杀菌保鲜,且与低温保鲜方法相比能耗更低[14]。目前研究者将 PAW 应用于果蔬保鲜较多,如 Perinban 等[13]以 PAW 处理鲜切苹果,降低了过氧化物酶(Peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性,微生物数量显著减少,苹果贮藏时间达 12 d;Zhang 等[15]利用 PAW 处理鲜切香蕉,抑制了微生物繁殖,改善了贮藏性能;徐玲峰等[16]发现 PAW 可减少蓝莓表面微生物,延长货架期;赵莹等[17]利用 PAW 降低了草莓腐烂率,减少了可溶性固形物、维生素 C(Vitamin C, V_C)的流失。因此,采用 PAW 处理甜龙竹笋预期可以提升采后贮藏品质,对甜龙竹笋的利用具有重要意义。但有关 PAW 保鲜鲜切甜龙竹笋的研究鲜见报道。

基于此,本研究以甜龙竹笋为原料,研究不同制备时间(0、1、2、3 min)的 PAW 对其菌落总数、理化特性、酶活性的影响,为 PAW 在甜龙竹笋保鲜中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

甜龙竹笋　采自云南省普洱市思茅镇莲花村(竹笋大小适中、无病虫害,采后 0~2 ℃ 的冷库预冷,第 2 d 放置泡沫箱,用适量冰袋覆盖后封箱,约 7 h 送实验室待测);氯化钡、蒽酮、乙酸乙酯　上海麦克林生化科技有限公司;氢氧化钠、碳酸钠、亚硝酸钠、草酸　广东光华科技股份有限公司;维生素 C 试剂盒、POD 试剂盒　上海源叶生物试剂有限公司;PAL 试剂盒　南京建成生物工程研究所;纤维素试剂盒、木质素试剂盒　苏州科铭生物技术有限公司;其余试剂均为分析纯。

CTP-2000K 低温等离子体　南京苏曼等离子体科技有限公司;LG-16M 冷冻离心机　上海赫田科学仪器有限公司;UV-2600 紫外可见分光光度计　日本岛津公司;Spectra Max-M5 酶标仪　上海美谷分子仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 PAW 的制备　依据前期预实验,PAW 处理参数为:放电电压 160 V、放电电流 1.95 A、放电频率 160 Hz、上层介质阻挡与处理液面距离约 4.5 cm,以空气作为反应气体,使用蒸馏水制备 PAW。分别取 150 mL 蒸馏水倒入反应皿,在低温等离子体下处理 1、2、3 min,处理后分别将 150 mL PAW 倒入烧杯,室温静置冷却。处理 1、2、3 min 的 PAW 分别标记为 PAW_1、PAW_2、PAW_3,蒸馏水为对照组(CK)。

1.2.2 样品处理　清洗甜龙竹笋表面污泥、剥壳,切除底部约 2 cm,将笋体切成长宽约 5~6 cm,厚度约 2~3 mm 笋片。将切片笋放入 PAW 中浸泡 15 min,取出用吸水纸吸干,聚乙烯袋真空包装,4 ℃ 贮藏 30 d,每 6 d 取样测竹笋品质。

1.2.3 呼吸强度测定　采用静置法测定呼吸强度[18]。取 10.0 mL NaOH 溶液(0.4 mol/L)放入 15 cm 称量皿,将称量皿放入干燥器底部,放置隔板,取约 60 g 甜龙竹笋放入干燥器,密闭反应 30 min。碱液移入锥形瓶,依次加入 5.0 mL 饱和 $BaCl_2$ 溶液、2 滴酚酞指示剂,充分摇匀,0.2 mol/L 草酸溶液滴定,粉色溶液褪去即为滴定终点,记录草酸溶液用量。采用同样方法作空白滴定。呼吸强度按公式(1)计算。

$$呼吸强度(mg/(kg\cdot h)) = \frac{(V_1 - V_2)\times c \times 22}{m \times t} \quad 式(1)$$

式中:c 为草酸溶液摩尔浓度,mol/L;V_1 为空白滴定中草酸溶液用量,mL;V_2 为滴定中草酸溶液用量,mL;m 为甜龙竹笋质量,kg;t 为测定时间,h;22 为 NaOH 与 CO_2 的质量转换系数,g/mol。

1.2.4 可溶性蛋白测定　采用考马斯亮蓝 G-250 法

测定[19]。取约 2.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 2.0 mL 蒸馏水，研磨呈匀浆，移入离心管，加入 3.0 mL 蒸馏水清洗研钵一并倒入离心管，混匀，4 ℃、12000 r/min 离心 15 min。取 1.0 mL 上清液于 10 mL 比色管，加入 5.0 mL 考马斯亮蓝，摇匀、静置反应 10 min，595 nm 测定吸光值。绘制牛血清蛋白标准曲线，得回归方程 y=0.0056x+0.0075，R^2=0.9994。式中 x 为可溶性蛋白浓度（对应标准蛋白浓度），y 为所测吸光值。可溶性蛋白含量按公式（2）计算。

$$可溶性蛋白含量(mg/g)=\frac{m'\times V}{V_s\times m\times 1000}\qquad 式（2）$$

式中：m′为标准曲线得到的蛋白质含量，μg；V 为提取液总体积，5 mL；V_s 为测定时提取液体积，1 mL；m 为甜龙竹笋质量，g；1000 为单位转换系数。

1.2.5　可溶性糖测定　采用蒽酮-硫酸法测定[20]。取约 1.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 5.0 mL 蒸馏水研磨呈匀浆，移入试管，沸水浴 30 min，取出冷却过滤，滤液倒入 10 mL 离心管。将残渣回收至试管，加入 5.0 mL 蒸馏水冲洗研钵一并倒入试管，沸水浴 10 min，冷却过滤后将滤液移入 10 mL 离心管，混匀。取 0.5 mL 上清液置于 10 mL 比色管，加入 1.5 mL 蒸馏水，0.5 mL 蒽酮-乙酸乙酯，5.0 mL 浓硫酸，混匀，沸水浴 2 min，静置冷却，620 nm 测定吸光值。绘制蔗糖标准曲线，得回归方程 y=0.0066x−0.0017，R^2=0.9993。式中，x 为可溶性糖浓度（对应蔗糖标准液浓度），y 为所测吸光值。可溶性糖含量按公式（3）计算。

$$可溶性糖含量(\%)=\frac{m'\times V}{V_s\times m\times 10^6}\times 100\qquad 式（3）$$

式中：m′为标准曲线查得的蔗糖含量，μg；V 为提取液总体积，10 mL；V_s 为测定时提取液体积，0.5 mL；m 为甜龙竹笋质量，g；10^6 为单位转换系数。

1.2.6　总酚测定　采用福林酚法测定[21]。取约 5.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 70% 乙醇 10 mL 研磨呈匀浆，倒入离心管，取 20 mL 70% 乙醇冲洗研钵一并倒入离心管，超声 60 min，4 ℃、12000 r/min 离心 10 min。取 1.0 mL 上清液于 10 mL 比色管，加入 2.5 mL 福林酚（0.2 mol/L），摇匀后避光静置反应 5 min，继续加入 2.0 mL 碳酸钠溶液（7.5%），摇匀，静置避光反应 1 h，760 nm 测定吸光值。绘制没食子酸标准曲线，得回归方程 y=10.026x−0.0166，R^2=0.9992。式中，x 为总酚浓度（对应没食子酸浓度），y 为所测吸光度。总酚含量按公式（4）计算。

$$总酚含量(mg/g)=\frac{C\times V\times N}{m}\qquad 式（4）$$

式中：C 为溶液没食子酸当量，mg/mL；V 为提取液总体积，30 mL；N 为稀释倍数，20；m 为甜龙竹笋质量，g。

1.2.7　黄酮测定　参照蒋雨心等[22]的方法稍作修改。取约 1.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 2.0 mL 无水乙醇研磨呈匀浆，倒入离心管，取 3.0 mL 无水乙醇冲洗研钵一并倒入离心管，4 ℃、12000 r/min 离心 10 min。取 1.0 mL 上清液于 10 mL 比色管，依次加入 0.3 mL 亚硝酸钠溶液（5%）、硝酸铝溶液（10%），摇匀、静置 6 min，加入 4.0 mL NaOH 溶液（4%），50% 乙醇溶液定容，摇匀、避光 15 min，510 nm 测定吸光值。绘制芦丁标准曲线，得回归方程 y=10.871x−0.003，R^2=0.999。式中，x 为黄酮浓度（对应芦丁浓度），y 为所测吸光度。黄酮含量按公式（5）计算。

$$黄酮含量(mg/g)=\frac{N\times C\times V}{m}\qquad 式（5）$$

式中：N 为稀释倍数，10；C 为黄酮浓度，mg/mL；V 为提取液总体积，5 mL；m 为甜龙竹笋质量，g。

1.2.8　V_C 测定　采用 V_C 试剂盒测定。取约 1.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 4.0 mL 缓冲液，研磨呈匀浆，倒入离心管，取 5.0 mL 缓冲液冲洗研钵一并倒入离心管，4 ℃、8000 r/min 离心 10 min。按试剂盒说明书进行测定。结果以 μg/mL 表示。

1.2.9　菌落总数测定　参照 GB 4789.2-2016《食品微生物学检验菌落总数测定》。取约 3.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 27.0 mL 灭菌生理盐水，研磨呈匀浆，均质 30 s。以 10 倍梯度依次稀释，选择 3 个适宜的稀释浓度，各取 100 μL 稀释液分别涂布于灭菌计数琼脂平板，37 ℃ 恒温培养 48 h，平板计数法计算菌落总数。以灭菌生理盐水做空白对照实验。

1.2.10　纤维素测定　采用纤维素试剂盒测定。取约 5.0 g 甜龙竹笋置于称量皿，105 ℃ 烘干至恒重，研磨过 60 目筛。取约 10.0 mg 样品，加入 80% 乙醇 1.0 mL，90 ℃ 水浴 20 min，冷却至室温，8000 r/min 离心 10 min。按试剂盒说明书进行测定，结果以 mg/g 干重表示。

1.2.11　木质素测定　采用木质素试剂盒测定。取约 5.0 g 甜龙竹笋置于称量皿，105 ℃ 烘干至恒重，研磨过 60 目筛。按试剂盒说明书进行测定，结果以 mg/g 干重表示。

1.2.12　POD 测定　采用 POD 试剂盒测定。取约 1.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 9.0 mL 缓冲液，冰浴研磨呈匀浆，4 ℃、12000 r/min 离心 10 min。按试剂盒说明书进行测定，结果以 U/g 鲜重表示。

1.2.13　PAL 测定　采用 PAL 试剂盒测定。取约 1.0 g 甜龙竹笋置于研钵，加入 9.0 mL 缓冲液，冰浴研磨呈匀浆，4 ℃、12000 r/min 离心 10 min。按试剂盒说明书进行测定，结果以 U/g 鲜重表示。

1.3　数据处理

所有数据进行 3 次平行测定，以平均值±标准差表示结果，使用 Origin 2021 统计数据与绘图，SPSS 26.0 软件对数据进行统计学意义分析（显著水平为 P<0.05）。

2 结果与分析

2.1 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋呼吸强度的影响

呼吸作用对果蔬品质的保持具有重要作用，可将细胞内富含能量的有机分子(淀粉、糖、有机酸)氧化成简单分子(二氧化碳、水)，并释放能量[23]，呼吸强度越大，营养流失越快，加速果蔬衰老。贮藏期内呼吸强度变化如图 1 所示，各组呈先升高后降低趋势。贮藏 0~18 d 时各组呼吸强度逐渐升高，可能是竹笋受机械损伤，呼吸强度升高。贮藏第 18 d 后，各组呼吸强度逐渐下降；第 30 d 时，PAW_1、PAW_2、PAW_3 比 CK 组显著下降了 10.20、13.28、5.57 mg/(kg·h)(P<0.05)。结果表明，PAW 可有效抑制呼吸强度的升高，减少营养流失。整个贮藏期间，PAW_2 低于 PAW_1和 PAW_3，说明 PAW_2 中的活性物质(如 H_2O_2、O_3、·OH、NO、NO_2)可引发膜脂过氧化，改变膜通透性，抑制细胞产生氧化应激反应，呼吸强度降低；PAW_3处理时间较长，产生过多的活性氧(Reactive oxygen species, ROS)，激发细胞产生氧化应激反应，导致氧化损伤，呼吸强度升高；PAW_1 处理的时间较短，产生的活性物质较少，抑制能力较弱。Jia 等[24] 研究发现低温等离子体处理可以抑制番茄的呼吸强度，但处理时间过长会产生负面影响，与本研究结果趋势类似。

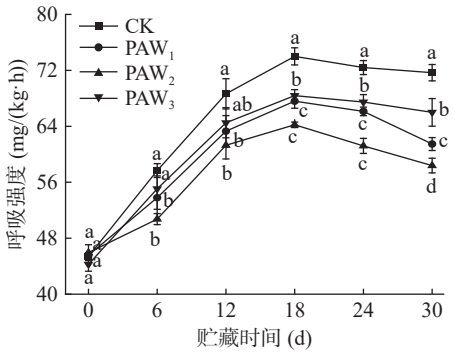


图 1 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋呼吸强度的影响

Fig.1 Effect of PAW treatment on the respiratory intensity of postharvest fresh-cut *D. brandisii* shoots

注：不同小写字母表示同一贮藏时间下组间有显著性差异(P<0.05)，图 2~图 8 同。

2.2 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋可溶性蛋白的影响

可溶性蛋白是果蔬的主要营养成分之一，也是许多酶的重要组成部分，参与生理生化代谢调节过程，是衡量果蔬衰老和耐贮藏性的重要指标[25]。贮藏期内可溶性蛋白含量的变化如图 2 所示，随贮藏时间延长，各组可溶蛋白含量呈下降趋势；原因为鲜切甜龙竹笋采后呼吸作用持续进行，加速代谢，导致能量消耗加剧，促进可溶性蛋白的降解[7]。贮藏第 30 d 时，CK 组的可溶性蛋白含量为 1.86 mg/g，比 PAW_1、PAW_2、PAW_3 显著降低了 46.77%、65.59%、26.34%(P<0.05)。原因为 PAW 中的活性物质抑制了蛋白水解酶的活性，阻止了可溶性蛋白分解[26]。整个贮藏期间，PAW_2比 PAW_1、PAW_3 下降较为缓慢，说明适当 PAW 处理提高了细胞的保水性，对细胞膜起保护作用，防止组织细胞被破坏，抑制可溶性蛋白分解，使其保持较高的蛋白含量；PAW_3 处理时间较长，活性物质累积，破坏组织细胞膜完整性，导致可溶性蛋白被破坏后流失；PAW_1 处理时间较短，产生的活性物质较少，不足以抑制可溶性蛋白的分解。

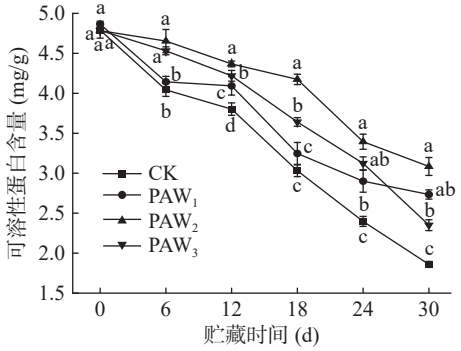


图 2 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋可溶性蛋白含量的影响

Fig.2 Effect of PAW treatment on soluble proteins content of postharvest fresh-cut *D.brandisii* shoots

2.3 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋可溶性糖含量的影响

可溶性糖为鲜切竹笋提供能量，是衡量竹笋品质的重要指标。贮藏期内可溶性糖含量的变化如图 3 所示，随贮藏时间延长，各组呈先上升后下降趋势。贮藏 0~18 d 时，各组可溶性糖含量逐渐上升，第 18 d 时达到最大值；贮藏初期，由于甜龙竹笋采后呼吸作用旺盛，可溶性糖优先用于供能，导致其含量较低；随后开始逐渐上升，可能是竹笋中的纤维素、半纤维素、果胶、淀粉等逐渐分解转化为可溶性糖和有机物[27]，可溶性糖含量增加；贮藏第 18 d 后，可溶性糖含量减少，这归因于甜龙竹笋组织结构被破坏，可溶性糖不断被分解以维持生理代谢活动导致其含量下降[18]。贮藏第 30 d 时，CK 组、PAW_1、PAW_2、PAW_3 可溶性糖含量分别为 1.47%、1.82%、1.99%、1.69%，其中 CK 组显著低于 PAW 处理组(P<0.05)。

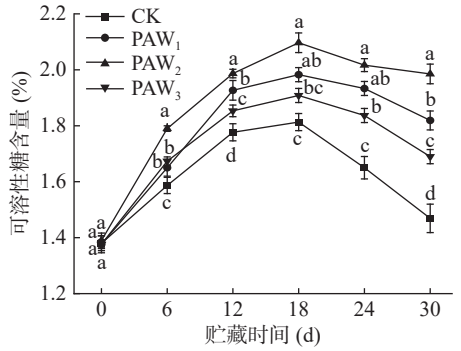


图 3 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋可溶性糖含量的影响

Fig.3 Effect of PAW treatment on soluble sugars content of postharvest fresh-cut *D. brandisii* shoots

整个贮藏期间，PAW_2 高于 PAW_1、PAW_3，说明适当 PAW 处理有效抑制可溶性糖的分解和转化，使其保持较高的营养价值；PAW_3 处理时间较长，产生过多的 ROS 物质，在高 ROS 胁迫下呼吸强度升高，加速可溶性糖消耗；PAW_1 处理时间较短，产生的 ROS 物质较少，不足以抑制可溶性糖的分解导致其含量降低。贾思曈等[27] 研究发现低温等离子体处理冬枣可抑制其可溶性糖含量的下降，但处理时间过长会产生负面影响。

2.4　PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋总酚、黄酮含量的影响

总酚和黄酮普遍存在于果蔬中，是植物体苯丙烷代谢途径重要的生物活性化合物，对人体健康有益[28]。贮藏期内总酚含量变化如图 4a 所示，随时间的延长，各组呈先上升后下降趋势；贮藏第 0~18 d 时，各组总酚含量逐渐上升，第 18 d 时达到最大值；可能是鲜切后竹笋细胞破裂，总酚和其他抗氧化物质形成抗氧化系统，抵御氧化胁迫，导致其在一定时间内升高[29]；贮藏第 18 d 后，总酚含量逐渐下降。贮藏第 30 d 时，PAW_1、PAW_2、PAW_3 比 CK 组显著提高了 29.41%、74.58%、46.61%（P<0.05）。这可能是由于 PAW 处理激活了其自身应答机制，刺激总酚物质生成，减缓总酚含量下降[28]。整个贮藏期间，PAW_2 高于 PAW_1、PAW_3，这可能是适当 PAW 处理有效抑制了鲜切甜龙竹笋的呼吸作用，增强了总酚物质在贮藏期间的保留；PAW_3 处理时间较长，产生过多的活性物质，破坏甜龙竹笋组织细胞导致总酚流出含量降低；PAW_1 处理时间较短，产生的活性物质较少，不足以抑制总酚物质被破坏。

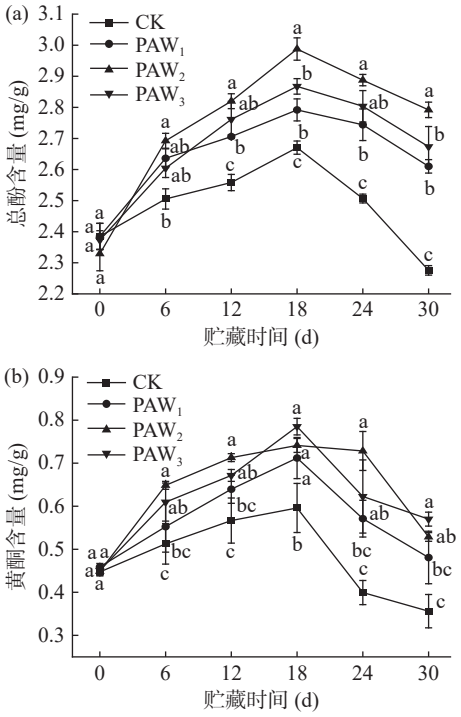


图 4　PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋总酚（a）、黄酮（b）含量的影响

Fig.4　Effect of PAW treatment on total phenols (a) and flavonoids (b) content of postharvest fresh-cut *D. brandisii* shoots

贮藏期内黄酮含量变化如图 4b 所示，随时间的延长，各组呈先上升后下降趋势；贮藏 0~18 d 时，各组黄酮含量逐渐上升，第 18 d 时达到最大值；随后开始下降，贮藏第 30 d 时，PAW_1、PAW_2、PAW_3 比 CK 组提高了 38.10%、42.86%、52.38%。可能是在应激反应条件下，ROS 激活 PAL 的活性，促进黄酮类化合物的合成，导致黄酮含量增加[30]，PAW 中的活性物质能抑制参与苯丙烷代谢相关的酶活性，阻止了黄酮降解[28]。整个贮藏期间，PAW_2 基本高于 PAW_1、PAW_3，说明适当 PAW 处理有效抑制黄酮的降解，增强了黄酮物质在贮藏期间的保留；PAW_3 处理时间较长，产生过多的活性物质侵蚀竹笋表皮组织，使黄酮暴露于 ROS 中，导致其降解；PAW_1 处理时间较短，生成的活性物质累积量较少，不足以抑制黄酮的降解。Grzegorzewski 等[31] 研究发现 PAW 中的活性物质可能侵蚀生菜表皮层，释放和降解聚集在表皮细胞中央液泡的黄酮类化合物导致其含量降低。

2.5　PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋 V_C 含量的影响

V_C 是植物细胞内非酶抗氧化活性成分，是维持果蔬新鲜度的重要营养参数。贮藏期内 V_C 含量变化如图 5 所示，随时间的延长，各组呈下降趋势；贮藏第 30 d 时，与贮藏初期相比，各组 V_C 含量均下降，CK 组、PAW_1、PAW_2、PAW_3 处理组 V_C 含量分别为 0.81、1.11、2.03 和 0.93 μg/mL，PAW 各组的 V_C 含量明显高于 CK 组，其中 PAW_2 组显著高于 CK 组（P<0.05）。可能是 V_C 在抗氧化酶作用下发生氧化反应导致其被降解，已有相关研究表明 PAW 中的活性物质可以使抗氧化酶失活[32]。整个贮藏期间，PAW_2 高于 PAW_1、PAW_3，结果表明，适当 PAW 处理使抗氧化酶失活，防止了 V_C 氧化，以提高甜龙竹笋在贮藏期间的营养品质；PAW_3 处理的时间较长，产生过多的 ROS 物质，破坏了甜龙竹笋组织细胞导致 V_C 流出含量降低；PAW_1 处理时间较短，产生的活性物质较少，不足以抑制 V_C 的氧化，结果与 Wu 等[32] 研究结果类似。

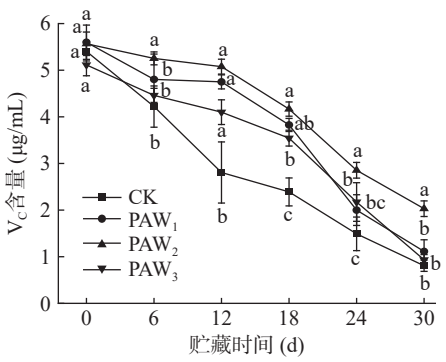


图 5　PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋 V_C 含量的影响

Fig.5　Effect of PAW treatment on V_C content of postharvest fresh-cut *D. brandisii* shoots

2.6 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋菌落总数的影响

菌落总数可以反映果蔬在储藏期间的新鲜度，是判断食物受细菌污染程度和卫生品质的一个重要指标。贮藏期内菌落总数变化如图 6 所示，随时间的延长，各组呈上升趋势；原因为甜龙竹笋组织受损后，细胞破裂营养物质流失，同时增加水分和氧气接触，为微生物提供了生长条件，导致菌落总数上升[17]。Lee 等[33] 认为果蔬产品中微生物数量超过 6 lg CFU/g 基本丧失食用价值。贮藏第 12 d 时，CK 组、PAW_1 菌落总数分别达到 6.68、6.20 lg CFU/g，PAW_2、PAW_3 菌落总数仅为 5.61、5.06 lg CFU/g。贮藏第 18 d 时，PAW_2、PAW_3 菌落总数为 6.69、6.05 lg CFU/g，PAW_3 抑菌效果最佳，可将贮藏时间延长至约 18 d。可能是 PAW_3 处理时间过长，产生的活性物质较多，这些活性物质与微生物接触产生氧化应激反应，破坏微生物内 DNA、蛋白质等生物大分子使其无法生长繁殖[34]；PAW_1、PAW_2 处理时间较短，产生的活性物质较少，抑菌能力较弱。

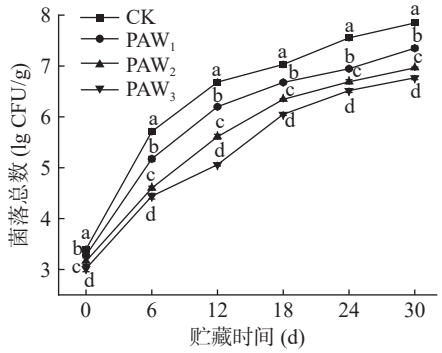


图 6 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋菌落总数的影响

Fig.6 Effect of PAW treatment on the total colony count of postharvest fresh-cut *D. brandisii* shoots

2.7 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋纤维素、木质素含量的影响

纤维素是衡量竹笋老化的重要指标之一，通常表现为纤维化程度增加，笋体变硬，品质变差，食用口感不佳。贮藏期内纤维素含量变化如图 7a 所示，各组呈上升趋势；贮藏第 30 d 时，PAW_1、PAW_2、PAW_3 比 CK 组显著降低了 6.66、24.19、10.59 mg/g（P<0.05）。原因为 PAW 处理降低了营养物质的消耗和呼吸强度，减缓了纤维素含量的增加[7]。整个贮藏期间，PAW_2 低于 PAW_1、PAW_3，可能是适当 PAW 处理有效抑制了甜龙竹笋的呼吸强度，降低纤维素的累积；PAW_3 处理时间过长，产生过多的 ROS 物质，在高 ROS 胁迫下呼吸作用增加，导致纤维素含量增加；PAW_1 处理的时间较短，产生的活性物质较少，抑制作用较差。

竹笋中的木质素是以苯丙氨酸为前体物质，在酶促反应下转化为木质素，这些产物在 PAL、POD 催化作用下发生莽草酸-苯丙烷酶促反应后形成木质素[8]。贮藏期内木质素含量变化如图 7b 所示，各组

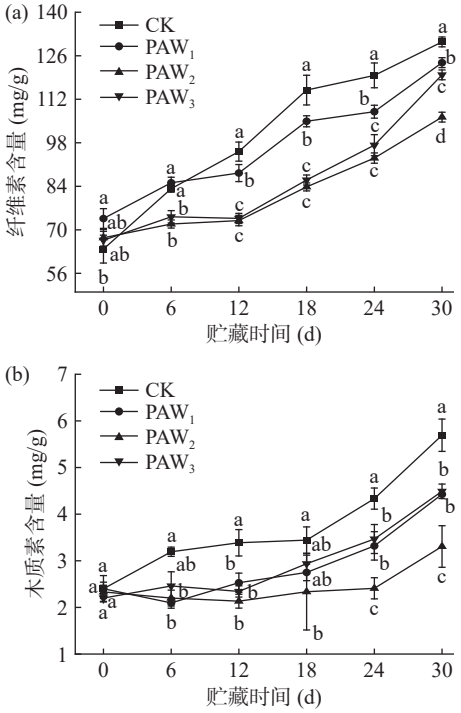


图 7 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋纤维素（a）、木质素（b）含量的影响

Fig.7 Effect of PAW treatment on cellulose (a) and lignin (b) content of postharvest fresh-cut *D. brandisii* shoots

呈上升趋势；贮藏第 30 d 时，PAW_1、PAW_2、PAW_3 比 CK 组显著下降了 1.27、2.49、1.20 mg/g（P<0.05）。原因为 PAW 可抑制 POD、PAL 活性，延缓木质素的合成[7]。整个贮藏期间，PAW_2 低于 PAW_1、PAW_3，这可能是适当的 PAW 处理破坏了参与酶促反应的相关酶活，木质素累积量少；PAW_3 处理时间过长，产生过多的 ROS 物质，在持续高 ROS 环境下促进 POD、PAL 活性的升高，木质素合成量增加；PAW_1 处理时间较短，产生的活性物质较少，不足以抑制酶的活性，导致木质素增加。

2.8 PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋 POD、PAL 活性的影响

POD 在植物生长发育中具有重要的调控作用，它不仅与活性氧的清除、抗逆应答有关，且在木质素合成等方面具有重要作用[35]。贮藏期内 POD 活性变化如图 8a 可见，各组呈先升高后降低趋势；贮藏第 12 d 时，各组 POD 活性最高。Zhao 等[36] 研究发现 PAW 处理鲜切猕猴桃后 POD 活性增加，这可能是植物细胞中的调节机制，可减轻 ROS 引起的脂质过氧化。随贮藏时间延长，POD 活性逐渐下降；贮藏第 30 d 时，PAW_1、PAW_2、PAW_3 比 CK 组分别下降了 10.85、7.76、9.55 U/g。可能是 PAW 含有 ROS，与 POD 发生反应，破坏其二级结构（α-螺旋减少，β-折叠增加）和氨基酸侧链基团（如半胱氨酸和酪氨酸），导致酶活力降低[15]。整个贮藏期间，PAW_2 低于 PAW_1、PAW_3，这可能是 PAW 处理对酶的激活或失活过程与活性物质的密度及酶结构的差异而导致的不同酶对氧化过程产生的反应不同[13]。

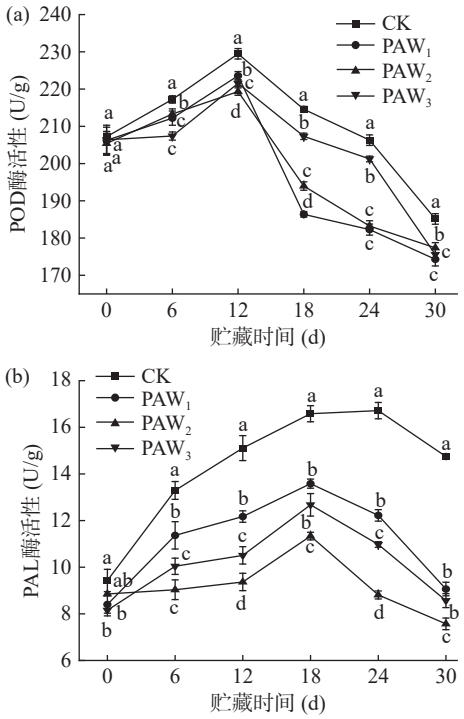


图 8　PAW 处理对采后鲜切甜龙竹笋 POD (a)、PAL(b)活性的影响

Fig.8　Effect of PAW treatment on POD (a) and PAL (b) activities of postharvest fresh-cut *D. brandisii* shoots

PAL 可将苯丙氨酸脱氨为苯乙烯酸，在木质素生物合成中发挥重要作用，是木质化反应的第一步，在植物的生长及代谢中起重要作用[18]。贮藏期内 PAL 活性变化如图 8b 所示，各组呈先升高后降低趋势；贮藏 18 d 时，各组 PAL 活性最高；贮藏第 30 d 时，PAW_1、PAW_2、PAW_3 比 CK 组显著下降了 5.69、7.18、6.18 U/g(P<0.05)。PAW 处理抑制了参与苯丙烷代谢相关的酶活性，PAL 是参与苯丙烷代谢反应的关键酶，其活性下降[28]。此外，在不利环境条件下，植物组织会合成木质素和植酸产生肉桂酸、富马酸等次级代谢产物防御外界干扰，产物的积累反过来抑制 PAL 的活力[9]。整个贮藏期间，PAW_2 低于 PAW_1、PAW_3，这可能是适当 PAW 处理中产生的活性物质抑制了苯丙烷代谢途径，降低了 PAL 的活性；PAW_3 处理时间过长，含过多的 ROS，在应激反应条件下，ROS 激活 PAL 的活性，导致其活性升高；PAW_1 处理的时间较短，含有的活性物质较少，不足以抑制 PAL 的活性。

2.9　聚类热图分析

采用聚类热图对甜龙竹笋处理前后各项品质指标的数据矩阵进行处理，以色阶为参照，各种色块代表相关变量的不同值。如图 9 所示，贮藏第 0 d 时，各处理组指标含量基本相一致；贮藏第 6 d 时，CK 组和 PAW 处理组各项指标发生变化；贮藏第 12 d 时，CK 组 POD、PAL、纤维素、木质素、呼吸强度、可溶性蛋白、V_C 含量变化显著；贮藏第 18 d 时，PAW_1 和 PAW_3 处理组可溶性蛋白、V_C、呼吸强度、菌落总数变化显著；贮藏第 24 d 时，PAW_2 处理组 POD、可溶性蛋白、V_C、纤维素、可溶性糖含量变化显著；贮藏第 30 d 时，CK 组和 PAW 处理组各项指标变化显著。综合分析发现，在整个贮藏期间，POD、PAL、可溶性蛋白、V_C、纤维素、木质素及菌落总数等指标均发生明显变化，可能是由于甜龙竹笋组织受到机械损伤后细胞结构被破坏，生理代谢紊乱，从而引发一系列理化性质的显著改变。综上所述，与 CK 组相比，PAW 处理有效延缓甜龙竹笋发生品质劣变，能更好地保持鲜切甜龙竹笋的贮藏品质，且 PAW_2 处理组在品质维持方面效果最佳。

2.10　指标间相关性分析

通过相关性分析进一步研究 PAW_2 处理对采后鲜切甜龙竹笋相关理化指标与木质素合成的影响。如图 10 所示，呼吸强度、可溶性糖、总酚、菌落总数与木质素呈正相关，纤维素与木质素呈显著正相关(P≤0.05)；可溶性蛋白、黄酮、POD、PAL 活性与木质素呈负相关，V_C 与木质素呈显著负相关(P≤0.05)。甜龙竹笋组织受到机械损伤时，诱导纤维素快速合成，其含量增加导致木质素增加[7]；有研究表

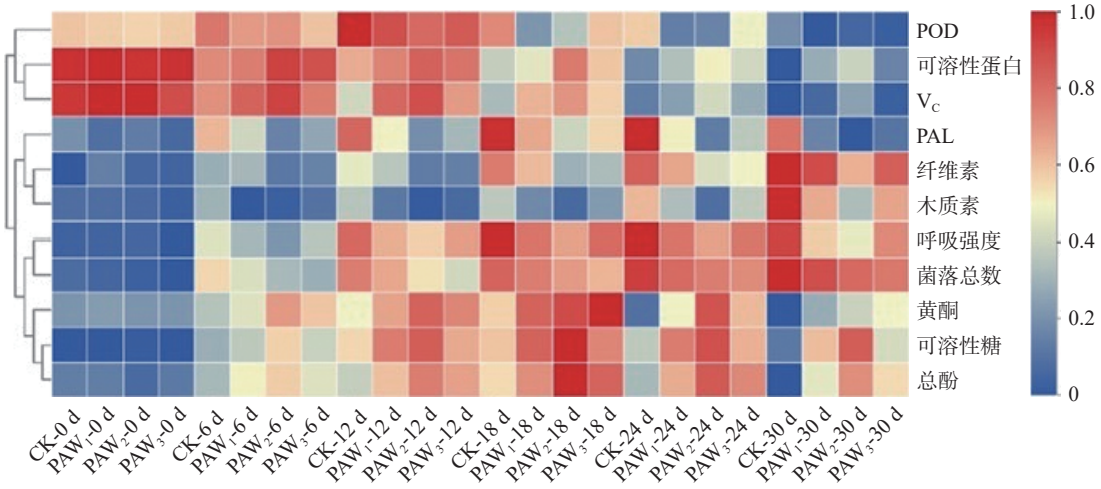
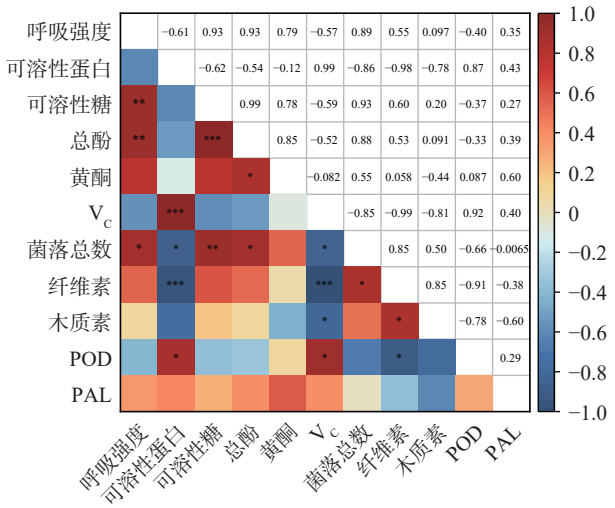


图 9　鲜切甜龙竹笋贮存期间指标变化热图

Fig.9　Heatmap of the changes of indicators during storage of freshly cut *D. brandisii* shoots



*P≤0.05 **P≤0.01 ***P≤0.001

图 10 生理生化指标与木质素含量的相关性分析

Fig.10 Correlation analysis between physiological and biochemical indexes and lignin content

明, PAL 作为木质素合成的起始酶, 其活性增加不一定导致木质素合成的增加, 因苯丙烷代谢途径呈网络状调控, 受转录因子、酶表达、中间产物及能量供应等多因素调控[8]; POD 活性升高会消耗木质素合成必需的 H_2O_2 和酚类前体, 导致木质素合成下降; V_C 是植物体内重要的抗氧化剂, 可抑制 ROS 激活的木质素合成限速酶(POD、PAL)的活性, 从而降低木质素合成速率。这些相关性分析为 PAW 保鲜效果与甜龙竹笋贮藏品质关系提供了预测效果。

3 结论

本文通过不同制备时间的 PAW 处理采后鲜切甜龙竹笋, 研究了 PAW 对鲜切甜龙竹笋的影响。结果发现: 随贮藏时间的延长, 鲜切甜龙竹笋的可溶性蛋白、V_C 含量呈下降趋势; 菌落总数、纤维素和木质素呈上升趋势; 呼吸强度、可溶性糖、总酚、黄酮、POD、PAL 活性则呈先升高后降低的趋势; PAW 处理对鲜切甜龙竹笋有较好的杀菌保鲜作用, 有效延长货架期。综合分析发现, 鲜切甜龙竹笋经 160 V 制备 2 min 的活化水杀菌、保鲜效果最佳, 可保持其营养物质, POD、PAL 活性较低, 延缓纤维素与木质素的累积合成速率, 从而抑制采后鲜切甜龙竹笋的木质化进程。因此, 利用适当制备时间的 PAW 处理采后鲜切甜龙竹笋, 对减缓其产品品质的劣变、延长货架期具有重要意义。本研究为 PAW 技术在鲜切甜龙竹笋及其它鲜切果蔬中的应用奠定理论基础, 并为开发新的鲜切果蔬保鲜技术提供参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 谢东伯, 段思源, 陈哲, 等. 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体含量及型态变化特征[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(1): 198−204. [XIE Dongbo, DUAN Siyuan, CHEN Zhe, et al. Variation of the phytolith content and morphology in *Dendrocalamus brandisii* leaf at different growth stages[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2025, 45(1): 198−204.]

[2] 张静美, 张锡庆, 李翱翔. 复合生物保鲜剂对甜龙竹笋采后贮藏保鲜效果的影响[J]. 世界竹藤通讯, 2023, 21(5): 34−40. [ZHANG J M, ZHANG X Q, LI A X. Effect of compound biological preservatives on post-harvest storage and fresh-keeping of *Dendrocalamus brandisii* shoots[J]. World Bamboo and Rattan, 2023, 21(5): 34−40.]

[3] ZHENG Jian, LI Shenge, XU Yanhong, 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.

[4] 王洪霞, 张敏. 新鲜竹笋气调保鲜技术的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 20−25. [WANG Hongxia, ZHANG Min. On MAP technology of fresh bamboo shoots[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 20−25.]

[5] 赵博, 胡尚连, 刘红. 竹笋采后生理及储藏保鲜技术的研究进展[J]. 竹子学报, 2017, 36(3): 66−71. [ZHAO B, HU S L, LIU H. Advance in postharvest physiology and storage technology of bamb shoots[J]. Journal of Bamboo Research, 2017, 36(3): 66−71.]

[6] LIU D J, WANG F, XIAO G S, et al. Effects of cold plasma treatment on maintaining the quality of fresh-cut bamboo shoots during shelf-life storage[J]. LWT, 2023, 185: 115151.

[7] 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. Preservation effect of ozone treatment combined with modified atmosphere packaging on moso bamboo shoots[J]. Food Science, 2021, 42(15): 200-205.].

[8] 段梦晴, 张高鹏, 洪鑫飞, 等. 冰温保鲜对雷竹笋贮存品质变化规律及木质化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 304−311. [DUAN M Q, ZHANG G P, HONG X F, et al. Effect of ice temperature preservation on storage quality and lignification of *Phyllostachys praecox* shoots[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 304−311.]

[9] WANG J X, 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.

[10] CHAROEN R, THIENGNOI P, SCHOENLECHNER R, et al. Preservations, packaging materials and temperatures affected on quality changes of ready-to-eat bamboo shoot during storage[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 302: 02004.

[11] THIRUMDAS R, KOTHAKOTA A, ANNAPURE U, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 77: 21−31.

[12] BRISSET J L, PAWLAT J. Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: Discharge, post-discharge and plasma activated water[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, 36(2): 355−381.

[13] PERINBAN S, ORSAT V, RAGHAVAN V. Influence of plasma activated water treatment on enzyme activity and quality of fresh-cut apples[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133421.

[14] 萧文宇, 吴迅, 黄显斌, 等. 低温等离子体活化水对蓝莓表面微生物抑制作用及其贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 359−365. [XIAO W Y, WU X, HUANG X B, et al. Inhibitory effect of low temperature plasma-activated water on the surface microorganisms and the quality attributes of blueberry[J]. Sci-

ence and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 359−365.］
［15］ ZHANG T, ZHANG Q R, LEI Y S, et al. Plasma activated water on improving the quality of fresh-cut banana slices[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 201: 112360.
［16］ 徐玲峰, 吴迅, 林鑫雨, 等. 低温等离子体活化水对采后蓝莓杀菌效果及贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(4): 7−14.［XU L F, WU X, LIN X Y, et al. Effects of low-temperature plasma-activated water on sterilization and storage quality of postharvest blueberry[J]. Storage and Process, 2024, 24(4): 7−14.］
［17］ 赵莹, 严龙飞, 严文静, 等. 低温等离子体活化水与介质阻挡放电联合处理对草莓冷杀菌效果及品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 105−116.［ZHAO Ying, YAN Longfei, YAN Wenjing, et al. Effect of combined cold plasma-activated water and dielectric barrier discharge treatment on the sterilization and quality of strawberry[J]. Food Science, 2022, 43(17): 105−116.］
［18］ 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.［SHEN D S. Study on the control of the lignificanion and browning of fresh-cut bamboo shoot[D]. Hangzhou: Zhejiang gongshang University, 2015.］
［19］ YU L X, PEI J L, ZHAO Y H, et al. Physiological changes of bamboo (*Fargesia yunnanensis*) shoots during storage and the related cold storage mechanisms[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 731977.
［20］ 阚超楠, 高阳, 陈明, 等. 不同采后处理对翠冠梨果实品质的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 518−529.［KAN C N, GAO Y, CHEN M, et al. Effect of different post-harvest treatments on the fruit quality of cuicun pears[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(3): 518−529.］
［21］ 蔡国庆, 靖瑞瑞, 莫君明. 咖啡壳多酚的提取及其在鱼糜保鲜中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(11): 8−15.［CAI G Q, JING R R, MO J M. Extraction of polyphenols from coffee husk and their application in fish surimi preservation[J]. China Food Additives, 2024, 35(11): 8−15.］
［22］ 蒋雨心, 邓岚, 范方宇. 鱼腥草根总黄酮超声辅助酶法提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 226−234.［JIANG Y X, DENG L, FAN F Y. Ultrasonic assisted extraction process of flavonoids from *Houttuynia cordata* Thunb and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 226−234.］
［23］ XU Y Y, TIAN Y, MA R, et al. Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 436−444.
［24］ JIA S T, ZHANG N, JI H P, et al. Effects of atmospheric cold plasma treatment on the storage quality and chlorophyll metabolism of postharvest tomato[J]. Foods, 2022, 11(24): 4088.
［25］ 杨光, 王丹丹, 李琴, 等. 不同贮藏温度对雷竹笋品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(5): 233−239.［YANG G, WANG D D, LI Q, et al. Effect of different storage temperatures on the quality of thunder bamboo shoots[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(5): 233−239.］
［26］ 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): 245−251.［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): 245−251.］
［27］ 贾思瞳, 张子迪, 陈存坤, 等. 低温等离子体处理对冬枣贮藏品质及风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 231−240.［JIA S T, ZHANG Z D, CHEN C K, et al. Effects of different transportation packaging on growth and physiological indexes of inoculated apples with *Trichothecium roseum*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 231−240.］
［28］ YI F, WANG J, XIANG Y, et al. Physiological and quality changes in fresh-cut mango fruit as influenced by cold plasma[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 194: 112105.
［29］ 孙悦芳. 低温等离子体处理对鲜切芒果保鲜效果的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.［SUN Y F. Effect of cold plasma treatment on preservation of fresh-cut mango[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.］
［30］ 袁园. 低温等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.［YUAN Y. Effect of low-temperature plasma-activated water on sterilisation efficacy and storage quality of fresh-cut lettuce[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.］
［31］ GRZERORZEWSKI F, EHIBECK J, SCHUTER O, et al. Treating lamb's lettuce with a cold plasma–Influence of atmospheric pressure Ar plasma immanent species on the phenolic profile of *Valerianella locusta*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2285−2289.
［32］ WU X, ZHAO W, ZENG X, et al. Effects of cold plasma treatment on cherry quality during storage[J]. Food Science and Technology International, 2021, 27(5): 441−455.
［33］ LEE J Y, PARK H J, LEE C Y, et al. Extending shelf-life of minimally processed apples with edible coatings and antibrowning agents[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(3): 323−329.
［34］ 李夏, 钱婧, 章建浩, 等. 等离子体活化水联合介质阻挡放电处理对鲜切莴苣杀菌效果及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 196−205.［LI X, QIAN J, ZANG J H, et al. Effect of combined plasma-activated water and dielectric barrier discharge treatment on the sterilization and quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 196−205.］
［35］ 廖锦晗, 陈季旺, 徐丽敏, 等. 液氮冻结对冻藏雷竹笋生理生化特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 247−255.［LIAO J H, CHEN J W, XU L M, et al. Effect of liquid nitrogen freezing on physiological and biochemical characteristics of *Phyllostachys praecox* shoots during frozen storage[J]. Food Science, 2024, 45(13): 247−255.］
［36］ ZHAO Y, CHEN R, LIU D, et al. Effect of nonthermal plasma-activated water on quality and antioxidant activity of fresh-cut kiwifruit[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(11): 4811−4817.