

杨通琴, 邓艳梅, 袁国惠, 等. 低温等离子体处理对采后鲜切甜龙竹笋贮藏品质的影响研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 370–379. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060004

YANG Tongqin, DENG Yanmei, YUAN Guohui, et al. Effect of Cold Plasma Treatment on the Storage Quality of Postharvest Fresh-cut *Dendrocalamus brandisii* Shoots[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 370–379. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060004

· 贮运保鲜 ·

# 低温等离子体处理对采后鲜切甜龙竹笋贮藏品质的影响研究

杨通琴<sup>1</sup>, 邓艳梅<sup>1</sup>, 袁国惠<sup>1</sup>, 马倩<sup>1,2</sup>, 郭磊<sup>1,2</sup>, 雀晓光<sup>3</sup>, 范方宇<sup>1,2,\*</sup>

(1. 西南林业大学生物与食品工程学院, 云南昆明 650224;

2. 云南省森林灾害预警与控制实验室, 云南昆明 650224;

3. 高黎贡山国家级自然保护区怒江管护局, 云南怒江 673199)

**摘要:** 本研究采用介电阻挡放电低温等离子体 (Dielectric barrier discharge-cold plasma, DBD-CP) 探究了不同处理时间 (40、50、60 s) 对采后鲜切甜龙竹笋贮藏期间理化特性及酶活性变化的影响。结果表明, 与 CK 组相比, DBD-CP 可提高鲜切甜龙竹笋亮度, 总酚、总黄酮、可溶性蛋白、可溶性糖含量最高; CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 处理的甜龙竹笋贮藏第 30 d 时, 过氧化物酶活性下降了 11.13、15.96、5.03 U/g ( $P<0.05$ ), 多酚氧化酶活性下降了 0.28、1.21、0.62 U/g ( $P<0.05$ ), 苯丙氨酸解氨酶活性下降了 1.99、7.19、5.81 U/g ( $P<0.05$ ), 4-香豆酰辅酶 A 连接酶活性下降了 3.17、4.41、1.81 U/g ( $P<0.05$ ), 果胶含量提高了 23.61%、58.33%、44.44% ( $P<0.05$ ), 纤维素、木质素累积含量分别降低了 7.81、37.24、13.86 mg/g ( $P<0.05$ ), 0.54、0.68、0.55 mg/g ( $P<0.05$ )。主成分分析显示, CP<sub>2</sub> 置信圈最小, 表明其甜龙竹笋品质稳定性最佳。该研究为 DBD-CP 技术在甜龙竹笋采后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, 甜龙竹笋, 贮藏品质, 木质化

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0370-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060004



本文网刊:

## Effect of Cold Plasma Treatment on the Storage Quality of Postharvest Fresh-cut *Dendrocalamus brandisii* Shoots

YANG Tongqin<sup>1</sup>, DENG Yanmei<sup>1</sup>, YUAN Guohui<sup>1</sup>, MA Qian<sup>1,2</sup>, GUO Lei<sup>1,2</sup>, QUE Xiaoguang<sup>3</sup>, FAN Fangyu<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Biological and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Laboratory of Forest Disaster Warning and Control of Yunnan Province, Kunming 650224, China;

3. Nujiang Management Bureau of Gaoligong Mountain National Nature Reserve, Nujiang 673199, China)

**Abstract:** In this study, the effects of different treatment times (40, 50, 60 s) on the changes of physicochemical properties and enzyme activities of postharvest fresh-cut *Dendrocalamus brandisii* (*D. brandisii*) shoots during storage were investigated using dielectric barrier discharge-cold plasma (DBD-CP). The results showed that DBD-CP improved the brightness of fresh-cut *D. brandisii* shoots with the highest contents of total phenols, total flavonoids, soluble proteins, and soluble sugars compared with CK group. At the 30th day of storage of CP<sub>1</sub>, CP<sub>2</sub>, and CP<sub>3</sub>-treated *D. brandisii* shoots, peroxidase activity decreased by 11.13, 15.96, and 5.03 U/g ( $P<0.05$ ), polyphenol oxidase activity decreased by 0.28, 1.21, and 0.62 U/g ( $P<0.05$ ), phenylalanine deaminase activity decreased by 1.99, 7.19, and 5.81 U/g ( $P<0.05$ ), 4-coumaroyl-

收稿日期: 2025-06-01

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。

coenzyme A ligase activity decreased by 3.17, 4.41, and 1.81 U/g ( $P<0.05$ ), pectin content increased by 23.61%, 58.33%, and 44.44% ( $P<0.05$ ), and cumulative synthesis of cellulose and lignin decreased by 7.81, 37.24, and 13.86 mg/g ( $P<0.05$ ), 0.54, 0.68, and 0.55 mg/g ( $P<0.05$ ), respectively. Principal component analysis showed that CP<sub>2</sub> had the smallest confidence circle, indicating that it had the best quality stability of *D. brandisii* shoots. This study provides some theoretical basis for the application of DBD-CP technology in the field of postharvest preservation and processing of *D. brandisii* shoots.

**Key words:** cold plasma; *D. brandisii* shoots; storage quality; lignify

甜龙竹笋(*Dendrocalamus brandisii*, *D. brandisii*)

属禾本科(Gramineae)牡竹属(*Dendrocalamus*)竹种,因其生食口感微甜,具有“甜笋”之称<sup>[1]</sup>,主要分布于云南普洱、临沧、西双版纳等地,以及老挝、柬埔寨、缅甸等亚热带国家<sup>[2]</sup>。甜龙竹笋富含蛋白质、碳水化合物、粗纤维等营养物质,且脂肪含量低,生物活性物质丰富,有助于改善消化、缓解高血压、预防心血管疾病,对人体健康有益<sup>[3-5]</sup>。甜龙竹笋采收时,易因切割损伤,破坏组织完整性,导致其呼吸强度增加、氧化酶激活及活性氧(Reactive oxygen species, ROS)的爆发等生理生化反应,加速笋体老化、褐变或腐烂,导致营养物质流失<sup>[6]</sup>。常温下放置 2~3 d 即失去食用价值,贮藏困难<sup>[7]</sup>。近年来竹笋采后保鲜一直是研究热点。为延长竹笋采后新鲜度,冰温保鲜<sup>[8]</sup>、化学保鲜剂<sup>[9]</sup>、紫外辐射<sup>[10]</sup>等方法已成功应用于各类竹笋贮藏品质劣变的评估,且取得一定效果,但限于技术、设备、成本等问题,这些方法仍不易实施。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,延缓木质化并维持采后贮藏品质,对促进其产业发展具有重要意义。

介质阻挡放电低温等离子体(Dielectric barrier discharge-cold plasma, DBD-CP)是一种安全、环保的新型非热杀菌方法,在果蔬保鲜领域备受关注<sup>[11]</sup>。DBD-CP 通过电离空气产生带电粒子、紫外线光子及 ROS(臭氧、过氧化氢、超氧阴离子、羟自由基等)和活性氮等杀菌物质<sup>[12]</sup>,这些活性物质可作为消毒剂,引发膜脂过氧化破坏微生物细胞,导致其死亡<sup>[13]</sup>。此外,DBD-CP 可改变果蔬代谢特征,增强抗衰老和抗逆能力,从而维持贮藏品质并延长货架期<sup>[14]</sup>。目前,DBD-CP 处理可延缓麻竹笋采后木质化和褐变,有效保持其贮藏品质<sup>[15]</sup>;降低番茄的腐烂率,并减少可溶性固形物和可滴定酸含量的流失<sup>[16]</sup>;抑制小白杏丙二醛含量及细胞壁降解酶活性的上升<sup>[17]</sup>;减少鲜切猕猴桃片表面菌落总数,改善褐变,延长货架期<sup>[18]</sup>。因此,采用 DBD-CP 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,有关 DBD-CP 处理鲜切甜龙竹笋的研究鲜见报道。

基于此,本研究以鲜切甜龙竹笋为原料,探究 DBD-CP 不同处理时间对其理化特性及酶活性变化的影响,为 DBD-CP 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(挑选大小一致,无病虫害、无机械损伤的甜龙竹笋,采后 0~2 °C 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);萘酚、乙酸乙酯、愈创木酚、邻苯二酚 上海麦克林生化科技有限公司;氢氧化钠、碳酸钠、亚硝酸钠、醋酸、醋酸钠 广东光华科技股份有限公司;4-香豆酰辅酶 A 连接酶(4-Coumarate coenzyme A ligase, 4CL)试剂盒、果胶试剂盒 上海源叶生物试剂有限公司;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;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;SC-80 色差仪 北京康光仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品的处理 清洗甜龙竹笋表面污泥、剥壳,切除底部约 2 cm,将笋体切片,长宽约 5~6 cm,厚度约 2~3 mm。DBD 处理参数为:放电电压 60 V、放电电流 0.95 A、放电频率 5 Hz,上层介质阻挡与样品接触面距离约 1 cm。以未处理的甜龙竹笋为对照组 CK(0 s),实验组分别处理 40、50 和 60 s(标记为 CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub>)。聚乙烯袋真空包装,4 °C 贮藏 30 d,每 6 d 取样测甜龙竹笋性质。

1.2.2 色差测定 采用色差仪进行测定,数据采集前用白/黑板进行校准,选择甜龙竹笋片中心点测量,分别记录  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。 $L^*$  表示明暗度; $a^*$  表示红-绿轴,正值表示红,负值表示绿; $b^*$  表示黄-蓝轴,正值表示黄,负值表示蓝。

1.2.3 可溶性蛋白测定 采用考马斯亮蓝 G-250 法测定<sup>[19]</sup>。取 2.0 g 甜龙竹笋,加入 5.0 mL 蒸馏水充分研磨,移入 10 mL 离心管,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  $y=0.0056x+0.0075$ ,  $R^2=0.9994$ ,  $x$  为可溶性蛋白浓度(对应的标准蛋白浓度),  $y$  为所测吸光值。可溶性蛋白

含量按公式(1)计算。

$$\text{可溶性蛋白含量(mg/g)} = \frac{m' \times V}{V_s \times m \times 1000} \quad \text{式(1)}$$

式中,  $m'$  为标准蛋白含量,  $\mu\text{g}$ ;  $V$  为提取液总体积, 5 mL;  $V_s$  为测定时提取液体积, 1 mL;  $m$  为样品质量, 2 g。

1.2.4 可溶性糖测定 采用蒽酮-硫酸法测定<sup>[19]</sup>。取 1.0 g 甜龙竹笋, 加入 5.0 mL 蒸馏水充分研磨, 移入刻度试管, 沸水浴提取 30 min, 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, 煮沸提取 10 min, 滤液移入 10 mL 离心管。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 mL 浓硫酸, 混匀, 沸水浴保温 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  $y=0.0066x-0.0017$ ,  $R^2=0.9993$ ,  $x$  为可溶性糖浓度(对应的蔗糖标准液的浓度),  $y$  为所测吸光值。可溶性糖含量按公式(2)计算。

$$\text{可溶性糖含量(\%)} = \frac{m' \times V}{V_s \times m \times 10^6} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中,  $m'$  为蔗糖含量,  $\mu\text{g}$ ;  $V$  为提取液总体积, 10 mL;  $V_s$  为测定时提取液体积, 0.5 mL;  $m$  为样品质量, 1 g。

1.2.5 总酚测定 采用福林酚法测定<sup>[6]</sup>。取 5.0 g 甜龙竹笋, 加入 30 mL 70% 乙醇充分研磨, 移入 50 mL 离心管, 超声提取 1 h, 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), 避光静置反应 5 min, 加入 2.0 mL 碳酸钠溶液(7.5%), 摇匀, 避光静置反应 1 h, 760 nm 测定吸光值。绘制没食子酸标准曲线, 得回归方程  $y=10.026x-0.0166$ ,  $R^2=0.9992$ ,  $x$  为总酚浓度(对应的没食子酸浓度),  $y$  为所测吸光度。总酚含量按公式(3)计算。

$$\text{总酚含量(mg/g)} = \frac{C \times V \times N}{m} \quad \text{式(3)}$$

式中,  $C$  为没食子酸当量,  $\text{mg/mL}$ ;  $V$  为提取液总体积, 30 mL;  $N$  为稀释倍数, 20;  $m$  为样品质量, 5 g。

1.2.6 总黄酮测定 采用  $\text{AlCl}_3$  比色法测定<sup>[6]</sup>。取 1.0 g 甜龙竹笋, 加入 5.0 mL 无水乙醇充分研磨, 移入 10 mL 离心管, 12000 r/min 离心 10 min。取 1.0 mL 上清液于 10 mL 比色管, 各加入 0.3 mL 亚硝酸钠溶液(5.0%)、硝酸铝溶液(10.0%), 摇匀、静置反应 6 min, 加入 4.0 mL NaOH 溶液(4.0%), 50% 乙醇溶液定容, 摇匀、静置反应 15 min, 510 nm 测定吸光值。绘制芦丁标准曲线, 得回归方程  $y=10.871x-0.003$ ,  $R^2=0.999$ ,  $x$  为总黄酮浓度(对应的芦丁浓度),  $y$  为所测吸光度。总黄酮含量按公式(4)计算。

$$\text{总黄酮含量(mg/g)} = \frac{V_1 \times C \times V_2}{m} \quad \text{式(4)}$$

式中,  $V_1$  为加显色试剂后待测液体积, 10 mL;

$C$  为总黄酮浓度,  $\text{mg/mL}$ ;  $V_2$  为提取液总体积, 5 mL;  $m$  为样品质量, 1 g。

1.2.7 过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性测定 采用愈创木酚法测定<sup>[19]</sup>。酶液提取: 取 1.0 g 甜龙竹笋, 加入 9.0 mL 提取缓冲液, 冰浴条件下研磨成匀浆, 移入 10 mL 离心管, 4 °C、12000 r/min 离心 10 min, 得酶提取液。取 3.0 mL 愈创木酚溶液(25 mmol/L)于 10 mL 比色管, 加入 0.5 mL 酶提取液, 200  $\mu\text{L}$   $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液(0.5 mol/L), 立即混匀, 470 nm 测定吸光值。每隔 1 min 测定一次, 连续测定 6 次。POD 活性按公式(5)计算。

$$\text{POD活性(U/g)} = \frac{\text{OD}_{470\text{F}} - \text{OD}_{470\text{I}}}{t_p - t_i} \quad \text{式(5)}$$

式中,  $\text{OD}_{470\text{F}}$  为反应液终止吸光值;  $\text{OD}_{470\text{I}}$  为反应液初始吸光值;  $t_p$  为反应终止时间, 6 min;  $t_i$  为反应初始时间, 1 min。

1.2.8 多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)活性测定 采用邻苯二酚法测定<sup>[20]</sup>。酶液提取: 取 1.0 g 甜龙竹笋, 加入 9.0 mL 提取缓冲液, 冰浴条件下研磨成匀浆, 移入 10 mL 离心管, 4 °C、12000 r/min 离心 10 min, 得酶提取液。取 4.0 mL 乙酸钠缓冲液(50 mmol/L、pH5.5)于 10 mL 比色管, 加入 1.0 mL 邻苯二酚溶液(50 mmol/L), 100  $\mu\text{L}$  酶提取液, 立即混匀, 470 nm 测定吸光值。每隔 1 min 测定一次, 连续测定 6 次。PPO 活性按公式(6)计算。

$$\text{PPO活性(U/g)} = \frac{\text{OD}_{420\text{F}} - \text{OD}_{420\text{I}}}{t_p - t_i} \quad \text{式(6)}$$

式中,  $\text{OD}_{420\text{F}}$  为反应液终止吸光值;  $\text{OD}_{420\text{I}}$  为反应液初始吸光值;  $t_p$  为反应终止时间, 6 min;  $t_i$  为反应初始时间, 1 min。

1.2.9 苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性测定 酶液提取: 取 1.0 g 甜龙竹笋, 加入 9.0 mL 提取缓冲液, 冰浴条件下研磨成匀浆, 移入 10 mL 离心管, 4 °C、12000 r/min 离心 10 min, 得酶提取液。取 3.0 mL 硼酸缓冲液(50 mmol/L、pH8.8)于 10 mL 比色管, 加入 0.5 mL L-苯丙氨酸(20 mmol/L), 37 °C 水浴 10 min, 加入 0.5 mL 酶提取液, 立即混匀, 290 nm 测定初始吸光值。将比色管置于 37 °C 继续水浴 1 h, 290 nm 测定终止吸光值<sup>[19]</sup>。PAL 活性按公式(7)计算。

$$\text{PAL活性(U/g)} = \frac{(\text{OD}_1 - \text{OD}_0) \times V}{0.01 \times V_s \times t \times m} \quad \text{式(7)}$$

式中,  $\text{OD}_0$  水浴 10 min 反应液吸光值;  $\text{OD}_1$  水浴 1 h 反应液吸光值;  $V$  为混合液总体积, 4 mL;  $V_s$  为测定提取液体积, 0.5 mL;  $t$  为反应时间, 1 h;  $m$  为样品质量, 1 g。

1.2.10 4CL 活性测定 采用 4CL 试剂盒测定。取 1.0 g 甜龙竹笋, 加入 9.0 mL 缓冲液, 冰浴研磨成匀浆, 4 °C、12000 r/min 离心 10 min。按说明书进行测

定, 结果以 U/g 鲜重表示。

1.2.11 果胶测定 采用果胶试剂盒测定。取 1.0 g 甜龙竹笋, 加入 9.0 mL 缓冲液, 冰浴研磨成匀浆, 4 °C、12000 r/min 离心 10 min。按说明书进行测定, 结果以 mg/g 鲜重表示。

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

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

### 1.3 数据处理

所有测定指标重复 3 次, 结果表示为平均值±标准差。利用 SPSS 26 进行 ANOVA 方差分析 ( $P < 0.05$  为显著差异), Origin 2021 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋色差的影响

颜色是判断果蔬感官品质和衡量货架期长短的重要指标。如图 1 所示, 贮藏第 0 d 时, 各处理组甜龙竹笋表面呈乳白色; 贮藏至第 30 d 时, 各处理组甜龙竹笋表面均出现明显黄变现象, 黄色区域持续扩大且颜色不断加深; 其中, CK 组黄变程度较为严重, 而 PAW 处理组的甜龙竹笋表面黄变程度相对较轻, 颜色保持较好。

如表 1 所示, 随贮藏时间的延长,  $L^*$  值呈下降趋势,  $a^*$ 、 $b^*$  值呈上升趋势。原因为甜龙竹笋组织受到机械损伤与氧气接触时, 大量氧气侵入组织, 导致酚类物质在酶催化作用下迅速氧化, 破坏了原有的酚-醌动态平衡体系, 促使醌类物质不断积累, 从而通过氧化聚合反应生成黑色素类物质, 导致组织褐变,

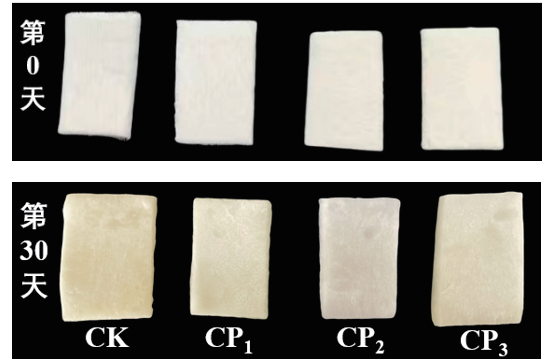


图 1 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋表观品质的影响  
Fig.1 Effect of DBD-CP treatment on the apparent quality of fresh-cut *D. brandisii* shoots

$L^*$  值下降、 $a^*$ 、 $b^*$  值上升<sup>[21]</sup>。贮藏至第 30 d 时, CK、CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 组  $L^*$  值为 41.34、42.80、47.20、45.32;  $a^*$  值为 1.31、-0.53、-1.90、-1.26;  $b^*$  值为 8.79、7.11、6.06、6.74。结果表明, CP<sub>2</sub> 组  $L^*$  值最高,  $a^*$ 、 $b^*$  值最低, 这归因于 CP<sub>2</sub> 中的 ROS 通过破坏 POD、PPO 的结构来抑制其活性延缓组织发生褐变, 从而改善鲜切甜龙竹笋的颜色<sup>[22-23]</sup>; CP<sub>3</sub> 处理时间过长, 产生过多 ROS 物质, 这些物质可能导致甜龙竹笋表面的色素氧化, 亮度降低; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 产生的活性物质含量较少, 抑制效果较差。

### 2.2 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋可溶性蛋白含量的影响

可溶性蛋白是果蔬的重要营养成分, 参与多种代谢过程, 与其衰老和耐贮藏性密切相关<sup>[24]</sup>。如图 2 所示, 随贮藏时间的延长, 各组可溶性蛋白含量呈下降趋势。这归因于鲜切甜龙竹笋采后仍在进行呼吸作用, 加速了新陈代谢, 造成能量消耗并促进了可溶性蛋白的降解<sup>[25]</sup>。贮藏第 30 d 时, CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 分别比 CK 组提高了 24.70%、39.27%、32.79% ( $P < 0.05$ ), 表明适当 DBD-CP 处理有效抑制可溶性蛋白的降解, 延缓营养物质流失, 有利于保持甜龙竹笋贮藏品质<sup>[26]</sup>; CP<sub>3</sub> 处理组时间过长, 产生过量的活性物

表 1 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋色差的影响

Table 1 Effect of DBD-CP treatment on colour difference of fresh-cut *D. brandisii* shoots

颜色	组别	第0 d	第6 d	第12 d	第18 d	第24 d	第30 d
$L^*$	CK	55.91±0.36 <sup>a</sup>	52.28±0.38 <sup>a</sup>	50.03±0.87 <sup>c</sup>	45.94±0.77 <sup>c</sup>	43.08±0.67 <sup>d</sup>	41.34±0.83 <sup>b</sup>
	CP <sub>1</sub>	56.49±0.46 <sup>a</sup>	52.84±0.69 <sup>a</sup>	50.94±1.18 <sup>bc</sup>	47.88±0.61 <sup>b</sup>	44.82±0.91 <sup>c</sup>	42.80±0.49 <sup>b</sup>
	CP <sub>2</sub>	56.42±0.24 <sup>a</sup>	54.77±0.40 <sup>a</sup>	54.38±1.28 <sup>a</sup>	51.45±0.93 <sup>a</sup>	49.13±0.48 <sup>a</sup>	47.20±0.62 <sup>a</sup>
	CP <sub>3</sub>	55.89±0.50 <sup>a</sup>	53.23±2.18 <sup>a</sup>	52.50±0.14 <sup>ab</sup>	48.99±0.52 <sup>b</sup>	46.90±0.62 <sup>b</sup>	45.32±0.71 <sup>a</sup>
$a^*$	CK	-2.77±0.81 <sup>a</sup>	-1.50±0.22 <sup>a</sup>	-1.21±0.15 <sup>a</sup>	-0.12±0.09 <sup>a</sup>	0.34±0.22 <sup>a</sup>	1.31±0.10 <sup>a</sup>
	CP <sub>1</sub>	-3.25±0.32 <sup>a</sup>	-3.01±0.2 <sup>b</sup>	-2.05±1.16 <sup>ab</sup>	-1.92±0.95 <sup>b</sup>	-1.59±0.18 <sup>ab</sup>	-0.53±0.35 <sup>b</sup>
	CP <sub>2</sub>	-3.63±0.53 <sup>a</sup>	-2.81±0.17 <sup>b</sup>	-2.71±0.61 <sup>b</sup>	-2.76±0.96 <sup>b</sup>	-2.41±2.09 <sup>b</sup>	-1.90±0.24 <sup>d</sup>
	CP <sub>3</sub>	-2.93±0.82 <sup>a</sup>	-2.70±0.41 <sup>b</sup>	-2.51±0.38 <sup>b</sup>	-2.42±0.13 <sup>b</sup>	-2.37±0.52 <sup>b</sup>	-1.26±0.23 <sup>c</sup>
$b^*$	CK	3.98±0.84 <sup>a</sup>	4.87±0.79 <sup>a</sup>	6.36±0.30 <sup>a</sup>	7.48±0.72 <sup>a</sup>	8.11±0.49 <sup>a</sup>	8.79±0.41 <sup>a</sup>
	CP <sub>1</sub>	2.58±0.48 <sup>b</sup>	3.47±0.38 <sup>b</sup>	5.74±0.09 <sup>a</sup>	6.34±0.04 <sup>ab</sup>	6.82±0.78 <sup>b</sup>	7.11±0.40 <sup>b</sup>
	CP <sub>2</sub>	3.25±0.62 <sup>ab</sup>	3.41±0.41 <sup>b</sup>	5.70±0.90 <sup>a</sup>	5.73±0.93 <sup>b</sup>	5.94±0.62 <sup>b</sup>	6.06±0.83 <sup>b</sup>
	CP <sub>3</sub>	3.36±0.57 <sup>ab</sup>	3.83±0.13 <sup>b</sup>	5.93±1.04 <sup>a</sup>	5.99±0.68 <sup>ab</sup>	6.25±0.60 <sup>b</sup>	6.74±0.49 <sup>b</sup>

注: 表中上标不同字母表示同一时间不同组别间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

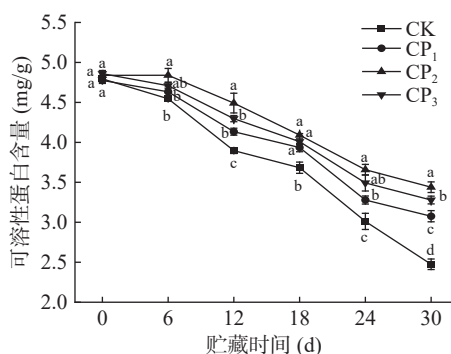


图2 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋可溶性蛋白含量的影响

Fig.2 Effect of DBD-CP treatment on soluble protein content of fresh-cut *D. brandisii* shoots

质可能破坏了可溶性蛋白结构, 导致其变性, 可溶性蛋白含量下降; CP<sub>1</sub> 处理组时间较短, 产生的活性物质较少, 抑制可溶性蛋白降解的作用较差。

### 2.3 DBD-CP 对鲜切甜龙竹笋可溶性糖含量的影响

可溶性糖不仅是果蔬中重要的营养成分, 也是植物在逆境胁迫下产生的渗透调节物质, 对细胞起到一定的保护作用<sup>[24]</sup>。如图 3 所示, 随贮藏时间的延长, 各组呈先升高后降低的趋势。贮藏前期, 由于大分子化合物逐渐降解导致葡萄糖和果糖等可溶性糖含量升高<sup>[27]</sup>; 贮藏第 18 d 后, 可能是甜龙竹笋组织受损导致呼吸作用增强, 加速可溶性糖的消耗, 含量下降<sup>[27]</sup>。贮藏第 30 d 时, CK 组、CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 可溶性糖含量为 1.97%、2.05%、2.15%、2.09% ( $P < 0.05$ )。结果表明, 适当 DBD-CP 处理有效抑制可溶性糖的降解, 从而延缓可溶性糖的消耗, 对其品质保持具有积极的调控作用<sup>[28]</sup>; CP<sub>3</sub> 处理时间过长, 产生过多的 ROS 物质, 在高 ROS 胁迫下加速可溶性糖的消耗; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 产生 ROS 较少, 抑制可溶性糖降解效果较差。

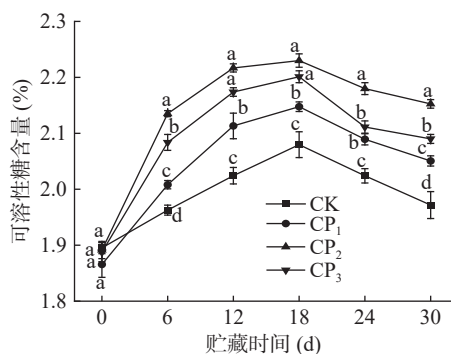


图3 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋可溶性糖含量的影响

Fig.3 Effects of DBD-CP treatments on soluble sugar content of fresh-cut *D. brandisii* shoots

### 2.4 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋总酚、总黄酮含量的影响

总酚和总黄酮是果蔬组织内产生的次生代谢产物, 与果蔬的色泽、品质、风味、成熟衰老和抗逆性

有密切关系<sup>[20]</sup>。如图 4a 所示, 随贮藏时间的延长, 各组总酚含量呈先升高后降低的趋势。贮藏前期, 由于甜龙竹笋组织受到机械损伤, 激活苯丙烷代谢途径, PAL 活性上升促进总酚合成<sup>[29]</sup>, 这与 PAL 活性的变化趋势一致; 贮藏第 18 d 后, 可能是组织细胞破裂, 生理活动剧烈, 总酚被迅速氧化和消耗, 导致含量下降<sup>[30]</sup>。贮藏第 30 d 时, CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组提高了 6.07%、18.22%、13.08% ( $P < 0.05$ )。结果表明, 适当 DBD-CP 处理激活了其自身应答机制, 刺激酚类物质生成, 减缓总酚含量下降<sup>[31]</sup>; CP<sub>3</sub> 处理时间过长产生过多臭氧和单线态氧, 裂解总酚物质骨架中的中心杂环, 导致其含量降低<sup>[32]</sup>; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 产生活性物质较少, 抑制总酚的降解作用较弱。

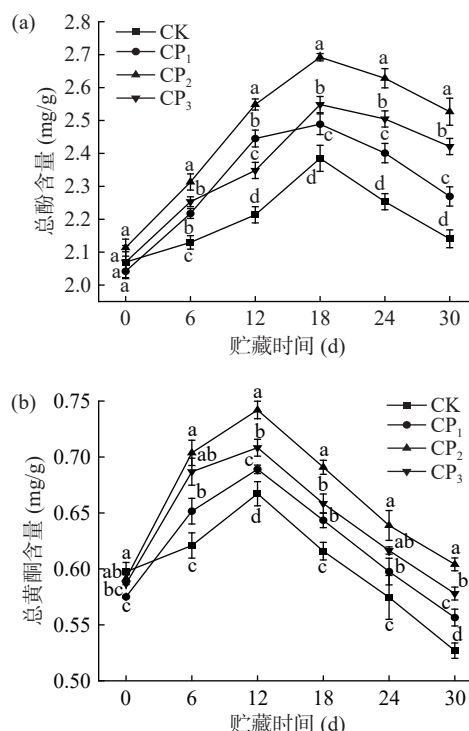


图4 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋总酚(a)、总黄酮(b)含量的影响

Fig.4 Effects of DBD-CP treatments on total phenol (a) and total flavonoid (b) content of fresh-cut *D. brandisii* shoots

如图 4b 所示, 随贮藏时间的延长, 各组呈先升高后降低的趋势。这归因于总黄酮是次生代谢产物, 具有抗氧化作用, 总黄酮有合成也有分解, 当合成量大于分解量时, 总黄酮被积累, 含量上升; 当分解量大于合成量, 总黄酮被消耗, 含量下降, 这与申德省<sup>[20]</sup>研究的趋势变化一致。贮藏第 30 d 时, CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组提高了 5.66%、13.21%、9.43% ( $P < 0.05$ )。结果表明, 适当 DBD-CP 处理能够刺激参与苯丙烷代谢相关的酶活, 抑制总黄酮的降解<sup>[31]</sup>; CP<sub>3</sub> 处理时间较长, 产生过多活性物质, 在强氧化条件下, ROS 引起表皮组织层的侵蚀, 使总黄酮暴露于 ROS, 导致其降解<sup>[33]</sup>; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 产生的活性物质少, 抑制总黄酮的降解作用较弱。

## 2.5 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋 POD、PPO、PAL、4CL 活性变化的影响

POD 通过催化果蔬中过量  $H_2O_2$  分解,引起木质素单体的脱氢聚合反应,是木质素合成的关键酶<sup>[34]</sup>;PPO 通过催化酚类物质产生氧化反应,在竹笋褐变和木质化过程中发挥重要调控作用<sup>[35]</sup>;PAL 是苯丙烷代谢途径的关键限速酶,通过催化苯丙氨酸脱氨反应调控木质素、黄酮类和多酚类等次生代谢产物的合成<sup>[30]</sup>;4CL 是苯丙烷代谢途径的终端酶,是连接苯丙烷代谢与木质素单体合成的关键调控点。

如图 5a 所示,随贮藏时间的延长,各组 POD 活性呈先升高后降低的趋势。贮藏前期,可能是预处理过程中机械切割破坏了甜龙竹笋细胞膜系统的完整性,引发氧化应激反应,诱导 POD 活性升高<sup>[35]</sup>;贮藏第 12 d 后,由于植物细胞内自由基大量产生,超过了植物自身的调节能力,抑制了 POD 活性<sup>[24]</sup>。贮藏第 30 d 时,CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组下降了 11.13、15.96、5.03 U/g ( $P < 0.05$ ),原因为 CP<sub>2</sub> 中的 ROS 与蛋白质侧链上的半胱氨酸和酪氨酸等氨基酸发生反应,导致酶活性丧失,从而抑制了 POD 活性,缓解酚类物质氧化,延缓甜龙竹笋发生木质化<sup>[23]</sup>;CP<sub>1</sub>、CP<sub>3</sub> 处理对 POD 活性有一定的抑制作用,但抑制效果与处理时间不成正比。

如图 5b 所示,随贮藏时间的延长,各组 PPO 活性呈先升高后降低的趋势。贮藏前期,由于在采摘或加工过程中,甜龙竹笋组织受到机械损伤或在不良贮藏条件下,导致 PPO 活性上升<sup>[35]</sup>;贮藏第 18 d 后,可能是底物浓度减少及细胞膜氧化程度的改变,抑制了 PPO 活性<sup>[25]</sup>。贮藏第 30 d 时,CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组下降了 0.28、1.21、0.62 U/g ( $P < 0.05$ ),原因为 CP<sub>2</sub> 通过诱导 ROS 生成,导致甜龙竹笋切面的 PPO 降解和酶蛋白变性,从而抑制酶活性,减缓酚类物质氧化,降低组织褐变<sup>[23]</sup>;CP<sub>1</sub> 和 CP<sub>3</sub> 抑制效果不佳,这归因于 DBD-CP 对果蔬中 PPO 活性的作用效应存在差异,这种差异可能受到处理参数(频率、持续时间)和基质特性(组织类型、微观结构、孔隙度)等多重因素的协同影响<sup>[36]</sup>。

如图 5c 所示,随贮藏时间的延长,各组 PAL 活性呈先升高后降低的趋势。原因为新鲜植物组织中 PAL 活性初期通常呈现上升趋势,在逆境胁迫下,植物通过代谢调控产生肉桂酸、富马酸等次级代谢产物,这些产物的积累抑制 PAL 活性,导致其活性下降<sup>[8]</sup>。贮藏第 30 d 时,CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组下降了 1.99、7.19、5.81 U/g ( $P < 0.05$ )。结果表明,适当 DBD-CP 处理有效抑制 PAL 活性,延缓酚类物质氧化,提高甜龙竹笋采后贮藏品质;甜龙竹笋组织对 DBD-CP 具有一定的耐受性,CP<sub>3</sub> 处理时间较长,产生过量的活性物质,促进 PAL 活性升高;CP<sub>1</sub> 处理时间较短,活性物质浓度低,抑制 PAL 活性效果较差。

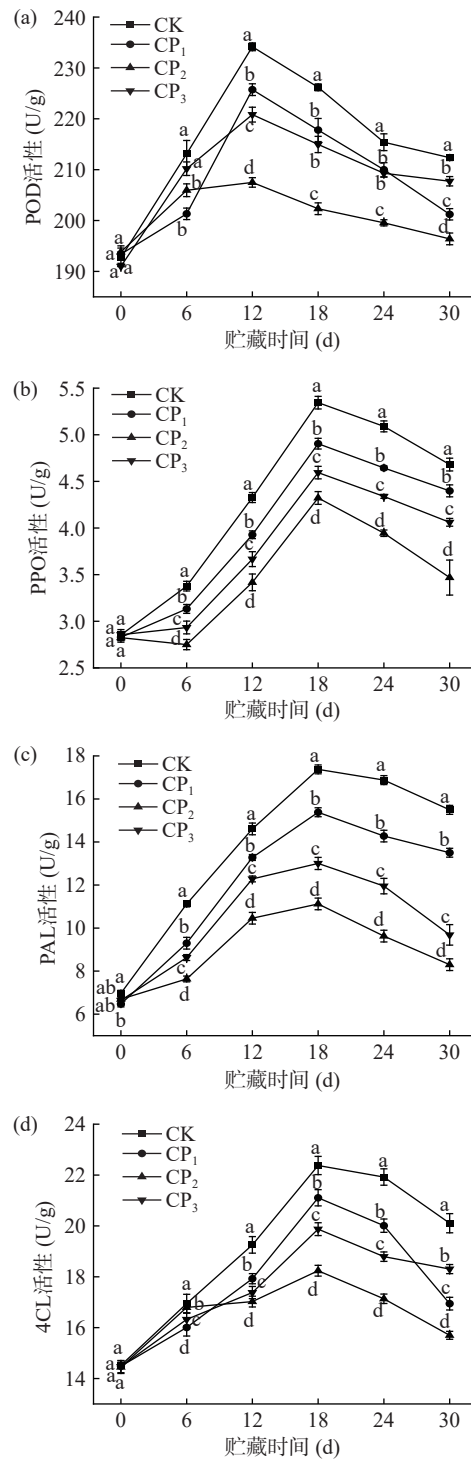


图 5 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋 POD(a)、PPO(b)、PAL(c)、4CL(d)活性的影响

Fig.5 Effect of DBD-CP treatment on the activities of POD (a), PPO (b), PAL (c), 4CL (d) in fresh-cut *D. brandisii* shoots

如图 5d 所示,随贮藏时间的延长,各组 4CL 活性呈先升高后降低的趋势。贮藏前期,由于采摘后甜龙竹笋因环境变化及机械损伤产生应激反应,激活苯丙烷代谢途径,导致 4CL 活性上升;贮藏第 18 d 后,可能是生理活动逐渐减缓,苯丙烷代谢途径受到抑制,4CL 活性下降,这与郑剑<sup>[19]</sup>研究的结果变化趋势基本一致。贮藏第 30 d 时,CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组下降了 3.17、4.41、1.81 U/g ( $P < 0.05$ )。结果表明,适

当 DBD-CP 处理有效抑制 4CL 活性的升高, 延缓木质素的合成速率, 以提高甜龙竹笋的贮藏品质; CP<sub>3</sub> 处理时间较长, 因活性物质过量引发氧化应激反应, 导致 4CL 活性升高; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 产生的活性物质较少, 抑制 4CL 活性效果较差。

### 2.6 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋果胶、纤维素含量的影响

果胶、纤维素是细胞壁结构的重要组成部分, 决定着细胞壁的坚固性、解聚和细胞间的完整性。如图 6a 所示, 随贮藏时间的延长, 各组果胶含量呈先升高后降低的趋势。贮藏前期, 可能是甜龙竹笋细胞内果胶酶活性升高促进不溶性果胶向可溶性果胶转化, 导致其含量增加<sup>[28]</sup>; 贮藏第 18 d 后, 由于甜龙竹笋组织产生氧化应激反应引起膜损伤, 导致细胞内容物渗漏, 加快了果胶的解聚和溶解, 含量下降。贮藏第 30 d 时, CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组提高了 23.61%、58.33%、44.44% ( $P < 0.05$ )。结果表明, 适当 DBD-CP 处理有效抑制甜龙竹笋组织产生氧化应激反应, 减轻细胞膜损伤, 延缓果胶降解; CP<sub>3</sub> 处理时间过长, 诱导氧化应激反应并造成表皮局部热损伤, 导致细胞壁多糖结构被破坏, 含量下降<sup>[37]</sup>; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 抑制果胶含量合成的效果较弱。

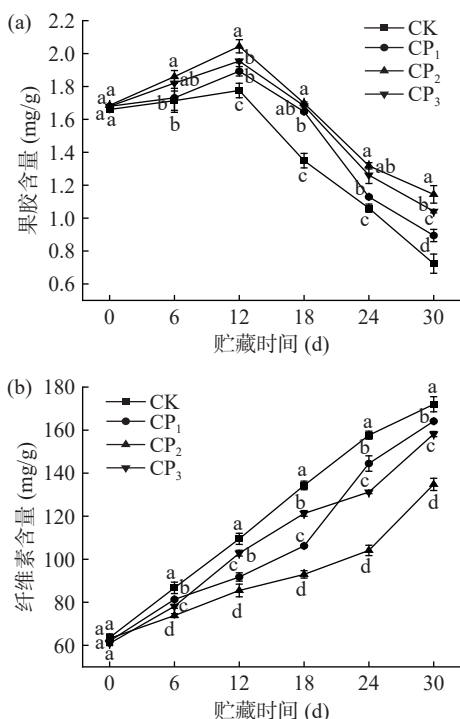


图 6 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋果胶(a)、纤维素(b)含量的影响

Fig.6 Effect of DBD-CP treatment on pectin (a) and cellulose (b) content of fresh-cut *D. brandisii* shoots

如图 6b 所示, 随贮藏时间的延长, 各组纤维素含量呈上升的趋势。原因为甜龙竹笋组织受到机械损伤, 导致笋体水分含量下降和营养物质流失, 加速了纤维素的合成。贮藏第 30 d 时, CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比

CK 组下降了 7.81、37.24、13.86 mg/g ( $P < 0.05$ ), 可能是 CP<sub>2</sub> 处理抑制了细胞壁增厚和次生细胞壁形成, 破坏了纤维素积累的环境, 从而减缓其品质劣变<sup>[37]</sup>; CP<sub>3</sub> 处理时间过长导致活性物质过量积累, 诱导细胞壁应激增厚, 导致纤维素升高; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 活性物质生成量少, 抑制纤维素含量合成的效果较差。

### 2.7 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋木质素含量的影响

竹笋中木质素是以苯丙氨酸为前体物质经过酶促反应转化为木质素单体(对香豆醇、芥子醇、松柏醇等), 这些中间产物在 PAL、POD 酶作用下发生莽草酸-苯丙烷酶促反应所形成<sup>[8]</sup>。如图 7 所示, 随贮藏时间的延长, 各组木质素含量呈上升趋势。原因为甜龙竹笋组织被破坏后产生氧化应激反应, 诱导 PAL、POD 和 4CL 活性升高促进木质素合成, 导致其含量上升<sup>[10]</sup>。贮藏第 30 d 时, CP<sub>1</sub>、CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 比 CK 组下降了 0.54、0.68、0.55 mg/g ( $P < 0.05$ )。结果表明, 适当 DBD-CP 处理有效抑制木质素合成关键酶的活性, 从而减少木质素积累, 延缓组织发生木质化; CP<sub>3</sub> 处理时间较长, 活性物质积累量增加, 在持续高 ROS 环境中引发氧化应激反应, 激活木质素合成途径中的关键酶, 导致其含量上升; CP<sub>1</sub> 处理时间较短, 活性物质生成量少, 抑制木质素含量的合成效果较弱。

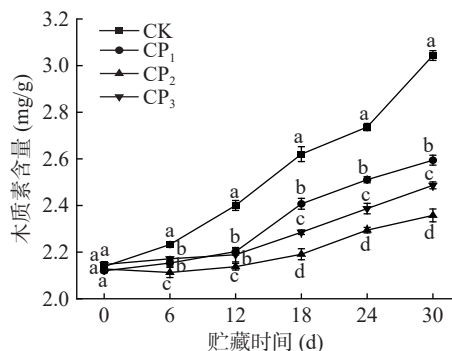


图 7 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋木质素含量的影响

Fig.7 Effect of DBD-CP treatment on lignin content of fresh-cut *D. brandisii* shoots

### 2.8 相关性分析

相关性分析可用于研究品质指标在贮藏期间整体变化规律和相互联系。如图 8 所示, 在 CK 组中, 贮藏时间与  $a^*$  值、 $b^*$  值、PPO、PAL、4CL、纤维素、木质素呈显著或极显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.001$ ); CP<sub>1</sub> 组中, 贮藏时间与  $a^*$  值、 $b^*$  值、PPO、PAL、纤维素、木质素呈显著或极显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.001$ ); CP<sub>2</sub> 组中, 贮藏时间与  $a^*$  值、 $b^*$  值、纤维素、木质素呈显著或极显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.001$ ); CP<sub>3</sub> 组中, 贮藏时间与  $a^*$  值、 $b^*$  值、PPO、纤维素、木质素呈显著或极显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.001$ )。CK 组、CP<sub>1</sub> 组中, 贮藏时间与  $L^*$  值、可溶性蛋白、果

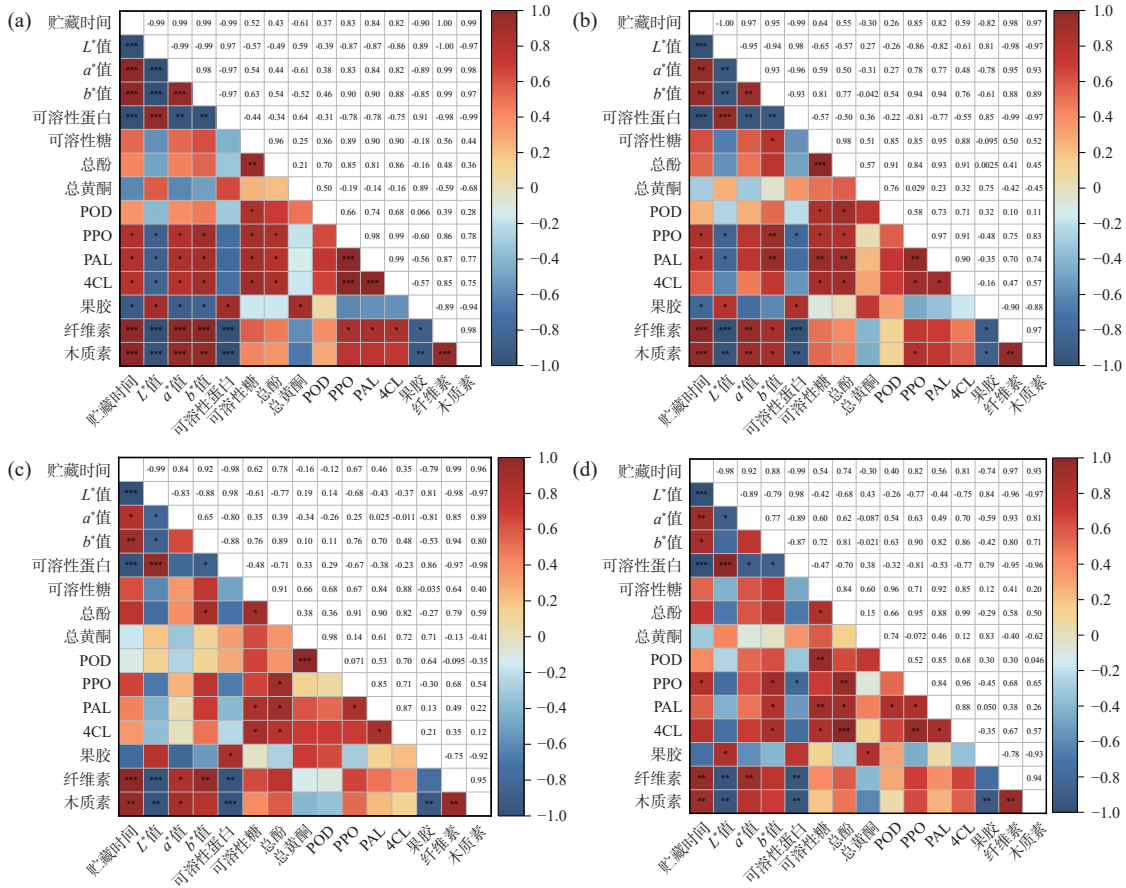


图 8 鲜切甜龙竹笋品质指标的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of quality indexes of fresh-cut *D. brandisii* shoots

注: a-CK; b-CP<sub>1</sub>; c-CP<sub>2</sub>; d-CP<sub>3</sub>; \**P*<0.05; \*\**P*<0.01; \*\*\**P*<0.001。

胶呈极显著负相关(*P*<0.001); CP<sub>2</sub>、CP<sub>3</sub> 组中, 贮藏时间与 *L*\*值、可溶性蛋白呈显著负相关(*P*<0.05)。综上, 鲜切甜龙竹笋贮藏期间与各品质指标均存在着相关性, 纤维素、木质素在不同处理条件下与贮藏时间呈极显著正相关, 能更好地反映鲜切甜龙竹笋的贮藏品质。

### 2.9 主成分分析

为了对比不同处理与指标之间的关系, 采用主成分分析法对鲜切甜龙竹笋贮藏期间的品质指标进行分析。如图 9 所示, 由因子载荷图可以看出可溶性糖、总酚、POD、4CL、PAL、PPO、*b*\*值、*a*\*值、纤

维素、木质素在 PC1 轴有较高载荷, 证明这些指标对第一主成分贡献大; *L*\*值、可溶性蛋白、果胶、总黄酮在 PC2 轴有较高载荷, 这些指标对第二主成分贡献大。基于主成分分析反映不同 DBD-CP 处理时间对甜龙竹笋保鲜稳定性的影响, 且 CP<sub>2</sub> 置信圈最窄小, 表明各指标在贮藏期间变化最小。

### 3 结论

本试验采用不同时间的 DBD-CP 处理采后鲜切甜龙竹笋, 研究了 DBD-CP 处理对鲜切甜龙竹笋贮藏品质的影响。结果表明, 随贮藏时间的延长, DBD-CP 处理提高了鲜切甜龙竹笋的亮度, 降低了可溶性蛋白和可溶性糖的流失, 延缓总酚和总黄酮的消耗及果胶的降解, POD、PPO、PAL、4CL 活性较低, 纤维素和木质素的累积合成量较少。主成分分析显示 60 V、50 s 保鲜效果最佳。因此, 利用适当时间的 DBD-CP 处理鲜切甜龙竹笋, 对减缓其组织发生木质化, 延长货架期具有重要意义。本研究为 DBD-CP 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。

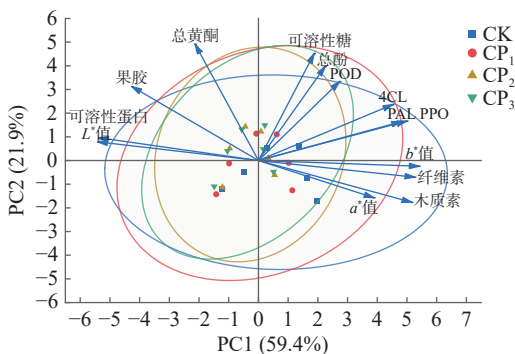


图 9 鲜切甜龙竹笋主成分分析因子载荷图

Fig.9 Factor analysis loading diagram for principal component analysis of fresh-cut *D. brandisii* shoots

## 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 D B, DUAN S Y, CHEN Z et al. Variation of the phytolith content and morphology in *Dendrocalamus brandisii* leaf at different growth stages[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(1): 198-204.]
- [2] PENG X W, LIU J J, TANG N, et al. Sequential extraction, structural characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from *Dendrocalamus brandisii* bamboo shoot shell[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100621.
- [3] BASUMATARY A, MIDDHA S K, USHA T, et al. Bamboo shoots as a nutritive boon for northeast india: An overview[J]. 3 Biotech, 2017, 7(3): 169.
- [4] DEVI Y R, CHAKMA A, YENKOKPAM S. Traditional wisdom of Meitei community regarding elimination of cyanogenic glycosides in bamboo shoot food products[J]. Indian Journal of Traditional Knowledge, 2017, 16(3): 470-475.
- [5] PANEE J. Potential medicinal application and toxicity evaluation of extracts from bamboo plants[J]. Journal of Medicinal Plant Research, 2015, 9(23): 681.
- [6] 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.
- [7] WU P R, HUANG S G, CHEN C L, et al. Effects of storage duration and temperature on browning and quality of postharvest bamboo shoots[J]. Horticulturae, 2024, 10(6): 616.
- [8] 段梦晴, 张高鹏, 洪鑫飞, 等. 冰温保鲜对雷竹笋贮藏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] 张静美, 张锡庆, 李翔翔. 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.]
- [10] 郑剑, 郑小林. UV-C 辐照处理对高节笋冷藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 258-263. [ZHENG J, ZHENG X L. Effects of UV-C treatment on the quality of bamboo shoots (*Phyllostachys prominens*) during cold storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 258-263.]
- [11] 吴志豪, 张富强, 吴彩娥, 等. 低温等离子体处理对采后雷竹笋贮藏品质的影响[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(5): 1-8. [WU Z H, ZHANG F Q, WU C E, et al. Effect of atmospheric cold plasma treatment on storage quality of post-harvest bamboo shoots[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(5): 1-8.]
- [12] 马晓艳, 王娟, 张海红, 等. 低温等离子体处理对采后黄花草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): 245-251.]
- [13] SAREMNEZHAD S, SOLTANI M, FARAJI A, et al. Chemical changes of food constituents during cold plasma processing: A review[J]. Food Research International, 2021, 147: 110552.
- [14] SRUTHI N U, JOSNA K, PANDISELVAM R, et al. Impacts of cold plasma treatment on physicochemical, functional, bioactive, textural, and sensory attributes of food: A comprehensive review[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130809.
- [15] LIU D, WANG F, XIAO G, 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.
- [16] JIA S, ZHANG N, JI H, et al. Effects of atmospheric cold plasma treatment on the storage quality and chlorophyll metabolism of postharvest tomato[J]. Foods, 2022, 11(24): 4088.
- [17] 潘越, 李婷婷, 吴彩娥. 低温等离子体处理对小白杏细胞壁代谢及软化特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 168-175. [PAN Y, LI T T, WU C E. Effect of cold plasma on cell wall metabolism and softening characteristics of apricot[J]. Food Science, 2024, 45(8): 168-175.]
- [18] 田方, 徐咏菁, 孙志栋, 等. 低温等离子体处理对鲜切猕猴桃片微观结构及理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(21): 167-174. [TIAN F, XU Y J, SUN Z D, et al. Effects of cold plasma treatment on microstructure and physicochemical properties of fresh-cut kiwifruit slices[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(21): 167-174.]
- [19] 郑剑. 中短波紫外辐照和草酸处理对去壳竹笋冷藏下的保鲜效果及其机制研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018. [ZHENG J. Effect of UV-B/C or oxalic acid treatment on improving quality in bamboo shoots (*P. prominens* or *B. oldhami*) without sheaths and its involved mechanism during cold storage[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018.]
- [20] 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 lignification and browning of fresh-cut bamboo shoot[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2015.]
- [21] 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): 331-343. [SHI M M, ZHANG W, LIU F X, et al. A review on postharvest physiological and biochemical changes, storage and preservation of bamboo shoots[J]. Food Science, 2023, 44(7): 331-343.]
- [22] ZHANG T, ZHANG Q, LEI Y, et al. Plasma activated water on improving the quality of fresh-cut banana slices[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 201: 112360.
- [23] 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.
- [24] 吕朝燕, 高智席, 王宇星, 等. 海藻酸钠涂膜对方竹笋贮藏品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(2): 112-118. [LÜ C Y, GAO Z X, WANG X Y, et al. Effects of sodium alginate coating film on the storage quality of chimonobambusa quadrangularis shoots[J]. China Food Additives, 2024, 35(2): 112-118.]
- [25] 雷雨, 潘梦娟, 陈飞鹏, 等. 壳聚糖功能化纳米硒的性质及其在鲜切苦竹笋保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 303-313. [LEI Y, PAN M J, CHEN F P, et al. Properties of chitosan functionalized nano-selenium and its application in the preservation of fresh-cut bamboo shoots (*pleioblastus amarus*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 303-313.]
- [26] XIAO H, ZHANG S, XI F, et al. Preservation effect of plasma-activated water (PAW) treatment on fresh walnut kernels[J].

- Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 85: 103304.
- [ 27 ] JIA S, ZHENG P, LI M, et al. The effect of cold plasma treatment on the fruit quality and aroma components of winter jujubes (*Ziziphus jujuba* mill. 'dongzao')[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(10): 6350–6361.
- [ 28 ] 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. ]
- [ 29 ] 张雄峰, 赵一鹤, 李沁. 三种生物保鲜剂处理对采后勃氏甜龙竹笋木质化的影响[J]. 西部林业科学, 2022, 51(5): 43–49. [ ZHANG X F, ZHAO Y H, LI Q. Effects of three biological preservatives on the lignification of postharvest *Dendrocalamus brandisii* bamboo shoots[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(5): 43–49. ]
- [ 30 ] 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. ]
- [ 31 ] 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. ]
- [ 32 ] GUO Y, XIA S, SHI C, et al. The Effect of cold plasma treatment on the storage stability of mushrooms (*agaricus bisporus*)[J]. Foods, 2024, 13(21): 3393.
- [ 33 ] SELLAM P, VALERIE O, DARWIN L, et al. Effect of plasma activated water on *Escherichia coli* disinfection and quality of kale and spinach[J]. Food Chemistry, 2022, 397:133793.
- [ 34 ] DONG G, WANG C, LIU H, et al. Impact of ethanol vapor treatment on the quality of water bamboo (*Zizania caduciflora* L.) shoots during cold storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5): e16494.
- [ 35 ] 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.
- [ 36 ] JI Y, HU W, LIAO J, et al. Effect of atmospheric cold plasma treatment on antioxidant activities and reactive oxygen species production in postharvest blueberries during storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5586–5595.
- [ 37 ] LIU M, LI G, ZHANG L, et al. Cold plasma treatment delays the texture softening of apricot fruit through PAPL-PL-pectin changes[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104693.