

肉桂精油复合壳聚糖乳液对采后芒果炭疽病的防治效果及作用机制

方 静^{1,2}, 谷 会^{1*}, 姚全胜¹, 杜丽清¹

1. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所/海南省热带园艺产品采后生理与保鲜重点实验室, 广东湛江 524091; 2. 海南大学园艺学院, 海南海口 570228

摘 要: 芒果风味独特、营养丰富, 被誉为“热带果王”, 但芒果在采后后熟过程中极易腐烂变质, 其中由炭疽病引起的腐烂损失最为严重。因此, 如何防治芒果采后炭疽病, 成为制约芒果产业健康发展的瓶颈问题。以台农 1 号芒果为试材, 研究绿色环保的肉桂精油复合壳聚糖乳液对采后芒果炭疽病的防治效果及作用机制。研究表明: 0.5%肉桂精油+0.3%壳聚糖处理对芒果炭疽病的防治效果最好, 0.03%肉桂精油处理可完全抑制离体芒果炭疽菌的生长和产孢, 0.01%、0.02%肉桂精油处理对芒果炭疽菌菌丝有明显的破坏作用; 复合处理显著抑制了芒果炭疽病病斑的扩大, 提高了抗病相关物质木质素、总酚 (TP) 和过氧化氢 (H₂O₂) 的含量, 提高了抗病相关酶苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、过氧化物酶 (POD)、 β -1,3 葡聚糖酶 (β -1,3-GA)、几丁质酶 (CHI) 的活性。由此可见, 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果炭疽病有较好的防治效果, 一方面是由于复合处理抑制或破坏了芒果炭疽菌菌丝的生长和产孢, 另一方面是复合处理诱导芒果果实提高了抗病性。因此, 适宜浓度的肉桂精油复合壳聚糖乳液处理为防治芒果采后炭疽病提供了一种绿色新途径, 研究结果可为我国芒果采后贮运保鲜产业的发展提供理论依据和应用参考。

关键词: 芒果; 炭疽病; 肉桂精油; 壳聚糖; 防治效果

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A

Control Effect and Mechanism of Cinnamon Essential Oil Compound Chitosan Lotion on Postharvest Mango Anthracnose

FANG Jing^{1,2}, GU Hui^{1*}, YAO Quansheng¹, DU Liqing¹

1. Institute of Subtropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Hainan Key Laboratory of Postharvest Physiology and Preservation of Tropical Horticultural Products, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 2. College of Horticulture, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: Mango is known as the “king of tropical fruits” for its unique flavor and rich nutrition. However, mango is extremely perishable during postharvest ripening, and the decay loss caused by anthracnose is the most serious. Therefore, how to prevent and control mango anthracnose after harvest has become a bottleneck problem restricting the healthy development of mango industry. In this paper, Tainong No.1 mango was used as the experimental material, and the green cinnamon essential oil composite chitosan lotion was used as the treatment means to study its control effect and mechanism on postharvest mango anthracnose, which would provide theoretical basis and practical reference for the development of postharvest mango storage, transportation and preservation industry in China. The results showed that the treatment of 0.5% cinnamon essential oil+0.3% chitosan had the best control effect on mango anthracnose, the treatment of 0.03% cinnamon essential oil could completely inhibit the growth and spore production of mango anthracnose *in vitro*, and the treatment of 0.01% and 0.02% cinnamon essential oil had obvious destructive effect on mango

收稿日期 2022-08-24; 修回日期 2022-10-10

基金项目 中国热带农业科学院基本科研业务费专项 (No. 1630062022006); 广东省优稀水果现代农业产业技术体系创新团队建设 (No. 2022KJ116)。

作者简介 方 静 (1991—), 女, 硕士, 研究方向: 热带果蔬采后生理与贮运保鲜。*通信作者 (Corresponding author): 谷 会 (GU Hui), E-mail: guhui0309@163.com。

anthracnose mycelium. The complex treatment significantly inhibited the expansion of mango anthracnose disease spot, increased the content of disease resistance related substances lignin, total phenol (TP) and hydrogen peroxide (H_2O_2), and increased the content of disease resistance related enzymes phenylalanine ammonia lyase (PAL), peroxidase (POD), β -1,3 glucanase (β -1,3-GA) and chitinase (CHI). It can be seen that cinnamon essential oil composite chitosan lotion has a good control effect on mango anthracnose by inhibiting or destroying the growth and spore production of mango anthracnose mycelium, and inducing mango fruit to improve disease resistance. Therefore, the proper concentration of cinnamon essential oil combined with chitosan lotion treatment would provide a new green way to control mango anthracnose after harvest.

Keywords: mango; anthracnose; cinnamon oil; chitosan; control effect

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.07.017

芒果 (*Mangifera indica* L.) 属漆树科芒果属植物, 因果实营养丰富, 风味独特, 含有丰富的碳水化合物、糖、蛋白质、维生素及微量元素, 被誉为“热带果王”^[1]。芒果在高温多雨季节采收, 果实中水分含量较高, 在采后极易受到病原菌侵袭引起腐烂变质, 严重影响果实的商品货架期^[2]。目前, 用于芒果保鲜的方法主要有物理保鲜和化学保鲜, 物理保鲜的方法主要有热处理、低温贮藏、气调贮藏等, 但物理保鲜需要特殊的设备, 成本高, 难以在生产中推广应用; 化学保鲜的方法主要有杀菌剂、抗生素和激素等, 但化学保鲜会有药剂残留, 对人体健康存在潜在的危害, 并对环境造成不良影响^[3-4], 随着人们食品安全意识的逐渐增强, 以及持续用药导致病原菌的耐药性提高, 杀菌剂的药效不断降低^[5-6]。因此, 急需研发一些安全高效、绿色环保、易推广应用的芒果采后炭疽病防治方法。

壳聚糖 (chitosan, CTS) 是从虾、蟹、昆虫等低等动物和菌、藻类等动植物为原料提取出来的一种天然高分子化合物, 因其具有无毒、成膜性好、抗菌性能广、对气体有选择渗透性等优点, 已广泛应用于水果涂膜保鲜, 可为水果提供良好的气调微环境, 减少气体交换, 延缓果实成熟^[7]。已有研究表明, 壳聚糖在甜瓜^[8]、桃^[9]、猕猴桃^[10]等果实上具有良好的保鲜效果。然而, 壳聚糖单独使用作为涂膜保鲜剂仍具有一定的局限性, 由于亲水性基团的存在, 强度、韧性不够, 机械性能较差, 一段时间后涂膜易断裂破碎, 壳聚糖的抑菌性能也有限, 不能很好地应用于果蔬保鲜。为了进一步提高壳聚糖的成膜性和抑菌性, 通常会加入一些植物精油, 在果实上涂膜形成可食用性薄膜。

肉桂精油作为天然提取物的植物精油, 具有挥发性, 无毒无害, 因其具有良好的抗氧化性和

抗菌活性, 成为果蔬保鲜的研究热点。肉桂精油和壳聚糖联合使用可以提高单一壳聚糖涂膜的水汽渗透性能, 增加其结构的稳定性, 在果实表面形成一个高 CO_2 、低 O_2 的微环境, 减少肉桂精油的蒸气扩散和损失, 能够更好地抑制微生物生长和保持果实的贮藏品质。MA 等^[11]研究发现, 哈密瓜在 21 °C 下贮藏 14 d, 1%壳聚糖和 1%肉桂精油复合涂膜对病原菌和微生物的抑制效果最好。XING 等^[12]利用 1%壳聚糖复合 0.25%肉桂精油涂膜处理甜椒, 在 8 °C 下贮藏 35 d 后, 甜椒的病情指数低于 5%。BASAGLIA 等^[13]利用 2%壳聚糖复合 0.5%肉桂精油对鲜切菠萝进行涂膜处理, 能够明显抑制病原菌的生长。黄文佳^[14]研究发现, 0.5%壳聚糖复合 0.3%肉桂精油对番木瓜炭疽病的防治效果最好, 在 25 °C 下贮藏 15 d 后的防治效果为 92.5%。赵亚珠等^[15]研究发现, 用肉桂精油和壳聚糖等材料制备抗菌纸, 可明显抑制甜樱桃病原真菌的生长, 降低腐烂率。可见, 肉桂精油和壳聚糖复合处理在采后果蔬上有明显的抗病及保鲜效果, 但肉桂精油和壳聚糖复合处理在芒果保鲜上的应用鲜有报道, 本研究以此为切入点, 探索肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果炭疽菌的防治效果以及相关作用机制, 为芒果采后贮运保鲜产业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试品种 台农 1 号芒果 (*Mangifera indica* L. Tainong No.1), 采收成熟度为七八分熟果实, 留约 1~2 cm 果柄, 挑选大小均匀、表面光滑、无病虫害、无机械损伤的果实, 采后立即运回中国热带农业科学院南亚热带作物研究所采后保鲜实验室进行处理。

1.1.2 化学试剂 马铃薯葡萄糖琼脂培养基

(PDA), 广东环凯微生物技术有限公司; 壳聚糖 (低粘度 $<200 \text{ mpa}\cdot\text{s}$, 分析纯), 上海阿拉丁生化科技有限公司; 吐温 80, 上海麦克林生化科技有限公司; 肉桂精油, 陕西森朗生物化工有限公司; 冰醋酸(分析纯), 天津市江天化工技术有限公司; 纤维素纳米纤维, 开翊新材料科技(上海)有限公司。

1.1.3 供试菌株 芒果炭疽病菌 (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.), 由中国热带农业科学院南亚热带作物研究所采后保鲜实验室分离纯化。

1.1.4 主要仪器设备 RCT 型加热磁力搅拌器, 德国 IKA 公司; T25 型剪切分散乳化机, 德国 IKA 公司; THZ-98C 型霉菌培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; ZRD-A5210 型电热烘箱, 上海智城分析仪器制造有限公司; Axiomager M2 型全自动研究级生物显微镜, 德国 ZEISS 公司; 902GP 型超低温冰箱, 美国 Thermo Fisher 公司; MIR-553 低温恒温培养箱, 日本三洋电机株式会社。

1.2 方法

1.2.1 肉桂精油壳聚糖复合乳液的制备 将壳聚糖加入 0.5% 冰醋酸溶液后, 在磁力搅拌器 1000 r/min 转速下搅拌, 使壳聚糖完全溶解, 壳聚糖溶液的浓度为 0.3%, 之后依次加入 0.1% 纤维素纳米纤维和肉桂精油, 用锡箔纸包裹, 在不透光条件下用磁力搅拌器搅拌, 再用 10 000 r/min 剪切分散乳化机搅拌 2 min, 直至液体完全乳化, 静置, 待泡沫消失后备用。

1.2.2 复合乳液对芒果炭疽病的防治效果 将挑选好的芒果随机分为 1 个对照组和 4 个处理组。处理组分别为: 0.7% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖、0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖、0.3% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖、0.3% 壳聚糖, 喷雾处理果实表面, 以清水处理为对照, 自然晾干后套袋, 置于 22 °C 贮藏, 24 h 后取出芒果果实, 用针刺接种法接种, 在每个芒果果面靠近两端处刺出 2 个接种点, 接种直径为 5 mm 的炭疽菌菌块, 用棉块保湿, 之后将果实装入厚度为 0.03 mm 的 PE 保鲜袋, 放入恒温箱 22 °C 培养, 24 h 后去除菌块, 每隔 3 d 用十字交叉法测定病斑直径, 每处理 8 个果实, 3 次重复。

芒果发病程度参照曾凯芳等^[16]的方法, 稍加改进, 根据果实表面病斑面积分为 0~4 等级, 分级标准: 0 级 (病斑面积 $>50\%$); 1 级 (病斑面积 20%~50%); 2 级 (病斑面积 10%~20%); 3 级 (病斑面积 $<10\%$); 4 级 (无病斑)。病情指数= $\sum(\text{发$

病等级 \times 病害果数)/(发病最高级值 \times 总果数) $\times 100$; 防治效果=(对照病情指数-处理病情指数)/对照病情指数 $\times 100\%$ 。

1.2.3 肉桂精油对芒果炭疽菌菌丝生长和产孢的影响 制作 PDA 平板, 其中处理组 PDA 平板中分别含有 0.005% 肉桂精油、0.01% 肉桂精油、0.015% 肉桂精油、0.02% 肉桂精油、0.025% 肉桂精油、0.03% 肉桂精油, 空白 PDA 平板为对照。取提前培养好的芒果炭疽菌平板, 在菌落边缘打取直径为 5 mm 的菌块, 接种到含肉桂精油的 PDA 平板中央, 28 °C 恒温培养, 用十字交叉法每天测量炭疽菌菌落直径, 并在培养 7 d 后用血球计数板计量每个培养皿的产孢量, 重复 3 次。

1.2.4 菌丝形态结构观察 含肉桂精油的 PDA 平板制作方法同 1.2.3, 用镊子将无菌盖玻片以 45° 角斜插入 PDA 平板培养基中, 并在平板上放入菌块, 菌块与插片的间距为 1.0~1.5 cm, 每皿插入 2 排 2 列载玻片, 倒置放入 28 °C 恒温培养箱培养, 7 d 后取出附有炭疽菌菌丝的载玻片, 用擦镜纸擦去载玻片背面的菌丝和培养基, 置于显微镜下进行观察记录。

1.2.5 芒果果实抗病相关物质含量和抗病相关酶活性的测定 芒果果实处理方法同 1.2.2, 处理组为 0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖, 清水处理为对照, 分别在采后 0、3、6、9、12、15 d 时取样, 取样部位为果实病健交界处的果皮组织, 每处理 6 个果实, 重复 3 次。木质素含量、总酚 (TP) 含量、过氧化氢 (H_2O_2) 含量及苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、过氧化酶 (POD)、 β -1,3 葡聚糖酶 (β -1,3-GA)、几丁质酶 (CHI) 活性均采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒进行测定。

1.3 数据处理

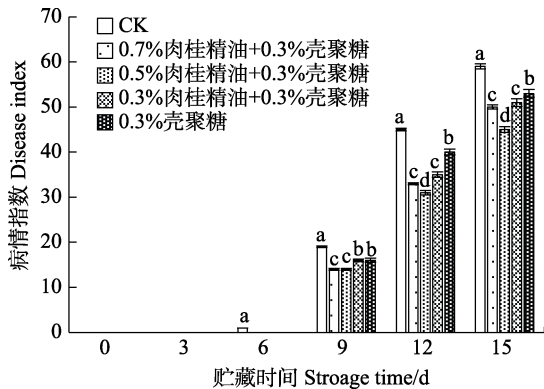
采用 Excel 2010 软件统计试验数据, 计算平均值和标准误差并制图; 采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析 (ANOVA), 利用 Duncan's 多重比较分析显著性差异 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果炭疽病的防治效果

由图 1 可知, 对照组在贮藏第 6 天开始发病, 各处理组在贮藏第 9 天开始发病, 各处理组的病情指数明显低于对照组, 在贮藏第 12、15 天时, 0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖的病情指数显著低于

其他处理组 ($P<0.05$), 在贮藏第 15 天时, 0.7% 肉桂精油+0.3%壳聚糖、0.5%肉桂精油+0.3%壳聚糖、0.3%肉桂精油+0.3%壳聚糖和 0.3%壳聚糖处理组的防治效果分别为 15.25%、22.03%、13.56%、10.17%, 其中以 0.5%肉桂精油+0.3%壳聚糖处理组的防治效果最好, 因此后续试验采用该组合处理。



不同小写字母表示相同贮藏时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different small letters indicate significant difference between different treatments at the same storage time ($P<0.05$).

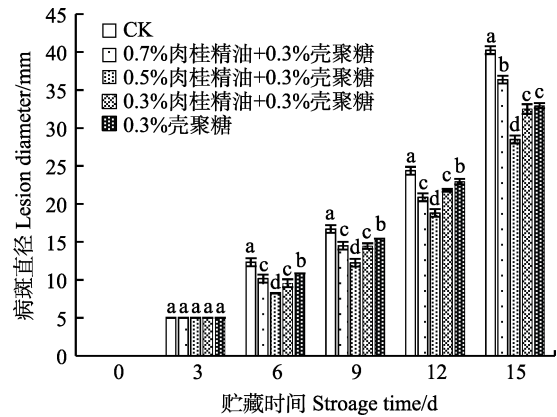
图 1 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果病情指数的影响
Fig. 1 Effect of cinnamon essential oil and chitosan lotion on mango disease index

2.2 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果炭疽病病斑直径的影响

由图 2 可知, 从贮藏第 6 天开始, 处理组的炭疽病病斑直径均显著低于对照组, 其中以 0.5% 肉桂精油+0.3%壳聚糖处理的效果最佳, 在贮藏 6、9、12、15 d 时, 0.5%肉桂精油+0.3%壳聚糖处理的病斑直径分别为 8.25、12.25、18.81、30.50 mm, 分别比对照组低 33.03%、26.60%、22.85%、24.22%。

2.3 肉桂精油对芒果炭疽菌菌丝生长和产孢的影响

由表 1 可知, 芒果炭疽菌在含有不同浓度肉桂精油的平板上培养 7 d 后, 处理组的菌落直径均显著小于对照 ($P<0.05$), 随着精油浓度的增加, 菌落抑制率逐渐增大, 精油浓度为 0.03%时的菌落抑制率为 100.00%, 说明肉桂精油的最低抑菌浓度为 0.03%。肉桂精油促进芒果炭疽菌产孢, 其中 0.015%肉桂精油处理的产孢最多, 0.005%、0.01%、0.02%肉桂精油处理的产孢量也显著高于对照 ($P<0.05$), 0.03%肉桂精油完全抑制产孢。



不同小写字母表示相同贮藏时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different small letters indicate significant difference between different treatments at the same storage time ($P<0.05$).

图 2 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果病斑直径的影响
Fig. 2 Effect of cinnamon essential oil combined with chitosan lotion on diameter of diseased spots of mango

表 1 肉桂精油对芒果炭疽菌菌丝生长和产孢的影响
Tab. 1 Effects of cinnamon essential oil on mycelial growth and sporulation of *C. gloeosporioides*

处理 Treatment	菌落直径 Colony diameter/mm	菌丝抑制率 Mycelial inhibition rate/%	产孢量 Spore numbers
CK	84.0 ^a	0.00	7.3×10 ^{6d}
0.005%肉桂精油	76.0 ^b	9.52	23.9×10 ^{6b}
0.01%肉桂精油	68.7 ^c	18.25	18.0×10 ^{6c}
0.015%肉桂精油	64.7 ^c	23.02	49.3×10 ^{6a}
0.02%肉桂精油	40.3 ^d	51.98	24.8×10 ^{6b}
0.025%肉桂精油	21.7 ^e	74.21	6.5×10 ^{6d}
0.03%肉桂精油	0.0	100.00	0

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

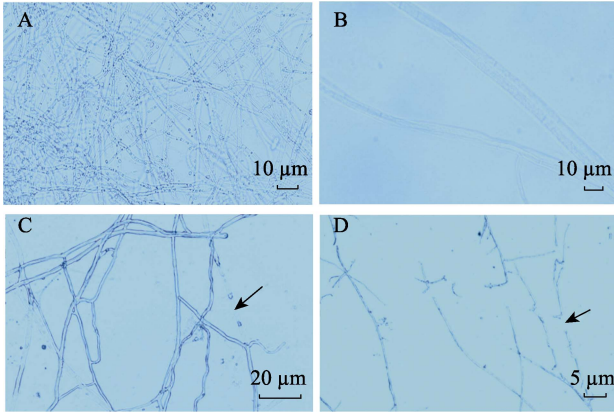
Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.4 肉桂精油对芒果炭疽菌菌丝形态的影响

图 3 表明, 肉桂精油可明显抑制芒果炭疽菌菌丝的生长。通过低倍镜发现, 对照组菌丝生长浓密, 细胞形态规则, 长势良好 (图 3A); 通过高倍镜发现, 菌丝内含物丰富, 菌丝饱满、细长, 表面光滑、粗细均匀 (图 3B)。经肉桂精油处理后, 菌丝生长稀疏、分叉、断裂变短, 细胞内陷, 内含物外泄, 菌丝有缺口 (图 3C); 随着肉桂精油浓度加大, 菌丝变形程度和范围加大, 表现为菌丝断裂 (图 3D)。

2.5 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果抗病相关物质的影响

由图 4A 可知, 在芒果贮藏过程中, 对照组



A: 对照 ($\times 10$); B: 对照 ($\times 40$); C: 0.01% 肉桂精油 ($\times 20$); D: 0.02% 肉桂精油 ($\times 20$).
A: CK ($\times 10$); B: CK ($\times 40$); C: 0.01% cinnamom essential oil ($\times 20$); D: 0.02% cinnamom essential oil ($\times 20$).

图 3 肉桂精油对芒果炭疽菌菌丝形态的影响

Fig. 3 Effect of Cinnamon essential oil on mycelial morphology of *C. gloeosporioides*

与 0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理组果皮的木质素含量的变化趋势基本一致，整体呈先上升后略下降的趋势，在贮藏后期处理组的木质素含量显著高于对照组 ($P < 0.05$)。由图 4B 可知，对照组和 0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理组的芒果果皮 H_2O_2 含量均呈先上升后略下降的趋势，处理组在前 6 d 缓慢上升，与对照组差别不大，在第 6 天后迅速上升，在 12 d 时达到最大值 $53.0 \mu\text{mol/g}$ ，处理组在第 9 天后 H_2O_2 含量显著高于对照组 ($P < 0.05$)。由图 4C 可知，0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理组的果皮总酚含量在前 3 d 稍有下降，随后呈直线上升趋势，且在贮藏第 6 天后，处理组的总酚含量显著高于对照组 ($P < 0.05$)。

2.6 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果抗病相关酶的影响

由图 5 可知，在整个贮藏期间，0.5% 肉桂精

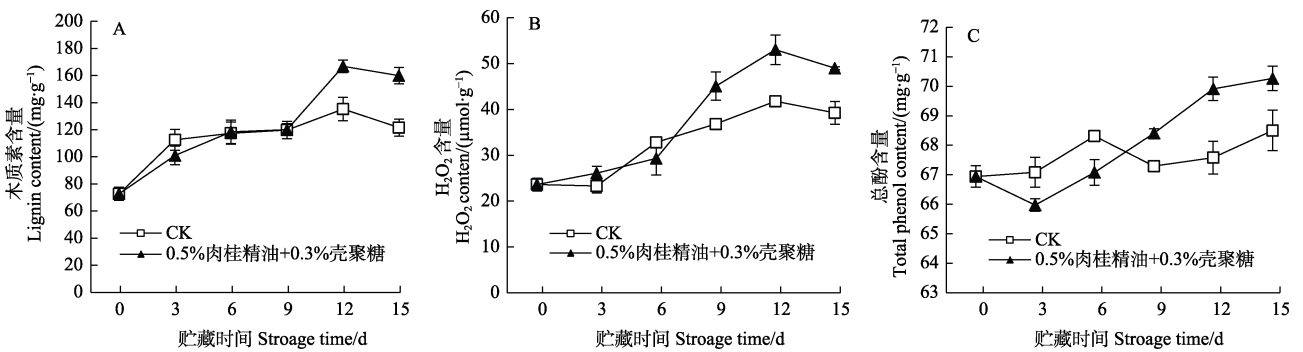


图 4 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果抗病相关物质的影响

Fig. 4 Effects of cinnamon essential oil combined with chitosan lotion on disease resistance related substances of mango

油+0.3% 壳聚糖处理组的果皮苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、 β -1,3 葡聚糖酶 (β -1,3-GA)、几丁质酶 (CHI) 活性均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。PAL 活性在贮藏 3 d 后迅速上升，在 9 d 时达到最高峰 627.45 U/g ，比对照组高 37.8%；处理组和对照组 β -1,3-GA 活性均都在第 6 天达到最高峰，处理组最高峰值为 75.41 U/g ，比对照组高 36.0%；CHI 活性在前 3 d 无显著差异，但处理组在 3 d 后迅速上升，在第 6~15 天一直保持较高水平，明显高于对照 ($P < 0.05$)。在贮藏前期 0.5% 肉桂精油+ 0.3% 壳聚糖处理组的过氧化物酶 (POD) 活性低于对照，但在贮藏 6 d 后迅速上升，在贮藏 9 d 后一直保持着较高水平，明显高于对照 ($P < 0.05$)。

3 讨论

不同浓度肉桂精油复合壳聚糖乳液对采后芒果炭疽病均有一定的防治效果。其中，0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理后的防治效果最佳，0.7% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理和 0.3% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理的防治效果显著低于 0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理，这是由于 0.7% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理后的芒果果面出现了灼伤现象，可能是精油浓度偏高损坏了芒果果皮而降低了抗病性，而 0.3% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理则浓度偏低，不能获得较好的抗病效果。肉桂精油的抑菌机理主要是其中的反式肉桂醛可破坏细胞膜，使内含物外渗，阻碍菌体能量代谢过程，从而抑制孢子萌发、菌丝正常生长发育^[17]。蒋帅^[18]研究发现，0.01% 肉桂精油在离体条件下对灰葡萄孢生长的抑制率达 96.85%。毛雪琳^[19]研究发现，0.04% 肉桂精油对巨峰葡萄黑曲霉菌、青霉菌、灰霉菌具有良好的抑制作用。何靖柳^[20]研究发现，0.02%

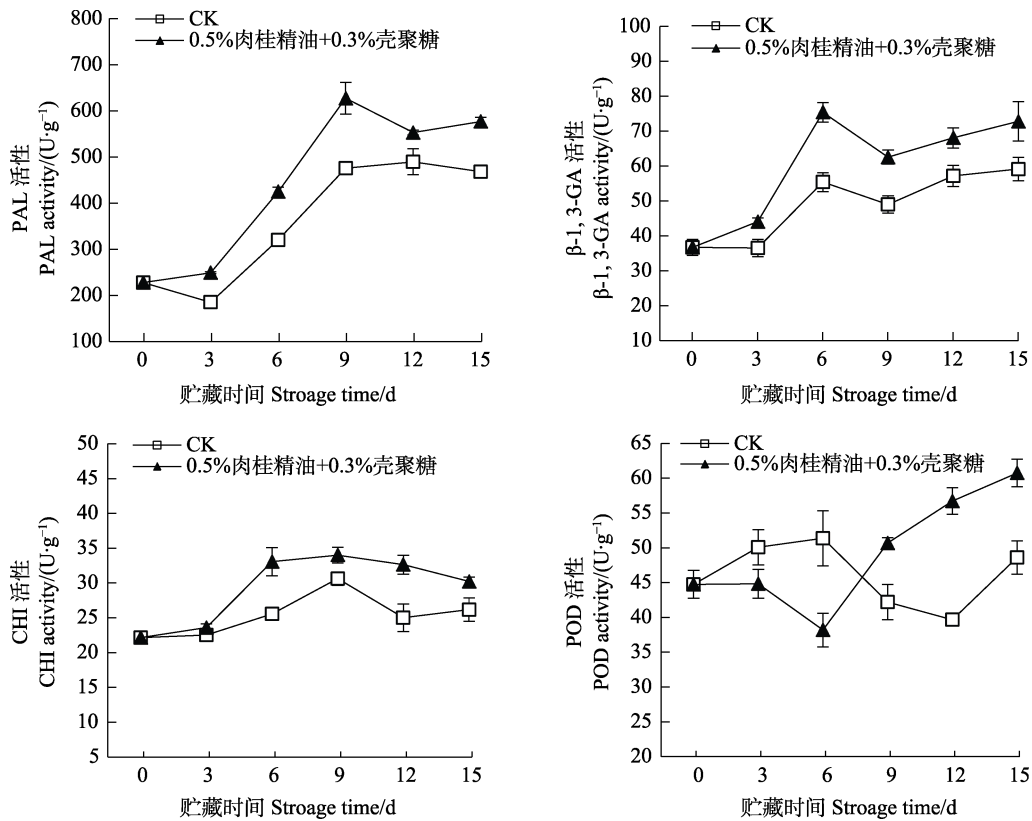


图 5 肉桂精油复合壳聚糖乳液对芒果抗病相关酶的影响

Fig. 5 Effects of cinnamon essential oil and chitosan lotion on disease resistance related enzymes of mango

肉桂精油对猕猴桃尖孢炭疽菌和葡萄座腔菌有良好的抑制作用。本研究发现, 0.03%肉桂精油可完全抑制炭疽菌菌丝生长和产孢, 0.02%、0.015%、0.01%、0.005%肉桂精油均在一定程度上抑制菌丝生长, 反而促进产孢, 可能是精油给病原菌生长造成逆境而促进产孢。不同浓度的肉桂精油均可使芒果炭疽菌的菌丝形态发生变化, 使菌丝内含物外渗, 干扰并抑制病原菌的营养生长, 且浓度越大对芒果炭疽菌的破坏越大, 这与肉桂精油对葡萄病原菌的抑制情况一致^[19]。

木质素、总酚、 H_2O_2 是重要的抗病相关物质, 木质素是植物细胞壁的主要成分, 木质素含量的提高可加强对病原菌侵入细胞的抵御; 总酚具有较强的抗菌性, 可以直接或间接杀死病原菌, 从而抑制其扩散^[21]; 弓德强等^[22]研究了芒果采后抗病性与木质素和总酚含量的关系, 发现芒果果实抗病性的提高与抗性物质木质素和总酚密切相关。刘淑宇^[23]研究发现, 芒果采后抗病性的提高与总酚、木质素含量的增加有关。本研究中木质素和总酚含量的提高, 可能与果实采后防御酶活性如 PAL、POD 活性的提高密切相关。 H_2O_2 作为

一种活性氧, 不仅可直接杀死病原菌, 还是一种扩散的小分子, 可作为第二信使激活防卫基因的表达, 最终导致病原菌产生抗性^[24]。王近近等^[25]研究发现, 茶树精油可使灰葡萄孢霉菌丝体内大量积累 H_2O_2 , 增加病菌的细胞膜通透性, 破坏菌体结构进而发挥抑制作用。陈晓晶等^[26]研究了香茅精油对番木瓜炭疽病的诱导抗病机制, 发现 H_2O_2 含量的升高可明显提升番木瓜的诱导抗病性。本研究也得到相似结果, 在芒果贮藏 12 d 后, H_2O_2 含量达到最大值, 同时木质素和总酚含量也达到较高水平, 可能是 0.5%肉桂精油+0.3%壳聚糖复合处理后, H_2O_2 作为信号分子参与了芒果果实内的抗病信号传导, 诱导了抗病防御系统的启动。

苯丙烷代谢是果实体内重要的次生代谢途径, 具有杀菌、抗病毒、清除自由基等多种生物活性, 参与果实的防御反应。苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、过氧化物酶 (POD)、 β -1,3 葡聚糖酶 (β -1,3-GA)、几丁质酶 (CHI) 都是重要的抗病相关酶, 其中 PAL 是苯丙烷代谢的首要关键酶, 参与由多途径激发子诱导植物的抗病反应, 增强植物对不良因子的抵御, 是酚类、类黄酮、木质

素等合成的关键限速酶；POD 在植物体内参与酚类物质的合成，调节植物代谢过程中的活性氧，是植物组织内抗性物质合成的关键酶；CHI 和 β -1,3-GA 是植物体内 2 种最重要的病程相关蛋白，分别通过降解病原菌细胞壁的几丁质和 β -1,3 葡聚糖而破坏病原菌的细胞结构^[27]。肉桂精油和壳聚糖复合处理能提高果蔬采后抗病性已有较多报道，如黄文佳等^[28]用肉桂精油复合壳聚糖涂膜对番木瓜进行处理，发现番木瓜抗病机制与提高抗病相关酶 PAL、POD、 β -1,3-GA 的活性呈正相关；蒋帅^[18]研究发现，肉桂精油结合壳聚糖处理提高抗病性与 PAL、POD 活性的升高有密切关系；郭欣等^[29]研究发现壳聚糖处理可增加西番莲果皮抗病相关酶 PAL、POD、CHI、 β -1,3-GA 的活性，从而增强西番莲果实的抗病性。这与本研究结果相契合。

综上所述，不同浓度肉桂精油复合壳聚糖乳液处理对芒果炭疽病均有一定程度的抑制效果，其中以 0.5% 肉桂精油+0.3% 壳聚糖处理效果最好，在贮藏第 15 天时的防治效果为 22.03%。抗病相关机制主要有 2 方面，一方面是肉桂精油抑制或破坏了芒果炭疽菌菌丝生长；另一方面是肉桂精油复合壳聚糖处理提高了抗病相关物质木质素、 H_2O_2 、总酚的含量，增强了抗病相关酶 PAL、POD、 β -1,3-GA、CHI 的活性，从而诱导芒果果实提高抗病性。

参考文献

- [1] 王挥. 采后热处理对芒果贮藏特性影响及机理的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
WANG H. Study on the effect and mechanism of postharvest heat treatment on mango storage characteristics[D]. Nanning: Guangxi University, 2012. (in Chinese)
- [2] 高豪杰. 1-MCP 对芒果采后品质和生理的影响[D]. 海口: 海南大学, 2012.
GAO H J. Effects of 1-MCP on postharvest quality and physiology of mango[D]. Haikou: Hainan University, 2012. (in Chinese)
- [3] 程守前, 赖伟勇, 翁少瑞, 李廷周, 谭银丰, 李海龙, 张俊清, 李友宾. 高良姜复配保鲜剂对芒果常温贮藏品质的影响[J]. 广州化工, 2015, 43(24): 81-83.
CHENG S Q, LAI W Y, WENG S R, LI T Z, TAN Y F, LI H L, ZHANG J Q, LI Y B. Effect of galangal compound preservative on mango storage quality at room temperature[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(24): 81-83. (in Chinese)
- [4] 杨华, 江雨若, 邢亚阁, 郭训练, 李文秀, 郑毅, 苟俊, 李宣林, 税玉儒. 壳聚糖/纳米 TiO_2 复合涂膜对芒果保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 297-301.
YANG H, JIANG Y R, XING Y G, GUO X L, LI W X, ZHENG Y, GOU J, LI X L, SHUI Y R. Chitosan/nano TiO_2 effect of composite coating on mango preservation[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(11): 297-301. (in Chinese)
- [5] SARKHOSH A, VARGAS A I, SCHAFFER B, PALMATTEER A J, LOPEZ P, SOLEYMANI A, FARZANEH M. Postharvest management of anthracnose in avocado (*Persea americana* Mill.) fruit with plant-extracted oils[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2017, 12(20): 16-22.
- [6] RAMEZANIAN A, AZADI M, MOSTOWFIZADEH-GHALAMFARSA R, SAHARKHIZ M J. Effect of *Zataria multiflora* Boiss and *Thymus vulgaris* L. essential oils on black rot of 'Washington Navel' orange fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 112(16): 152-158.
- [7] MANTHOU E, COEURET G, CHAILLOU S, NYCHAS G E. Metagenetic characterization of bacterial communities associated with ready-to-eat leafy vegetables and study of temperature effect on their composition during storage[J]. Food Research International, 2022, 158: 111563.
- [8] 祁岩龙, 廖新福, 孙丽娜, 杨军, 庞玉菲, 程卫国, 李学文. 壳聚糖涂膜对甜瓜采后生理及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(1): 116-122.
QI Y L, LIAO X F, SUN L N, YANG J, PANG Y F, CHENG W G, LI X W. Effects of chitosan coating on postharvest physiology and quality of melon[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2011, 48(1): 116-122. (in Chinese)
- [9] TRAN V T, KINGWASCHARAPONG P, TANAKA F, TANAKA F. Effect of edible coatings developed from chitosan incorporated with tea seed oil on Japanese pear[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288: 110314.
- [10] 祝美云, 党建磊. 壳聚糖复合膜涂膜保鲜猕猴桃的研究[J]. 果树学报, 2010, 27(6): 1006-1009.
ZHU M Y, DANG J L. Study on the preservation of kiwi fruit with chitosan composite film[J]. Journal of Fruit Trees, 2010, 27(6): 1006-1009. (in Chinese)
- [11] MA Q M, ZHANG Y, CRITZER F, DAVIDSON P M, ZHONG Q X. Quality attributes and microbial survival on whole cantaloupes with antimicrobial coatings containing chitosan, lauric arginate, cinnamon oil and ethylenediamine-tetraacetic acid[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 235(18): 103-108.
- [12] XING Y G, LI X H, XU Q L, YUN J, LU Y Q, TANG Y. Effects of chitosan coating enriched with cinnamon oil on qualitative properties of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Food Chemistry, 2011, 124(14): 1443-1450.
- [13] BASAGLIA R R, PIZATO S, SANTIAGO N G, ALMEIDA M M M D, PINEDO R A, CORTEZ-VEGA W R. Effect of edible chitosan and cinnamon essential oil coatings on the shelf life of minimally processed pineapple (*Smooth cay-*

- enne)[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100966.
- [14] 黄文佳. 肉桂精油复合壳聚糖涂膜对采后番木瓜的保鲜效果及生理机制分析[D]. 海口: 海南大学, 2022.
HUANG W J. Analysis of preservation effect and physiological mechanism of cinnamon essential oil composite chitosan coating on postharvest papaya[D]. Haikou: Hainan University, 2022. (in Chinese)
- [15] 赵亚珠, 郝晓秀, 刘光发, 高翔. 肉桂精油抗菌包装纸对甜樱桃防腐保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 153-159.
ZHAO Y Z, HAO X X, LIU G F, GAO X. Influence of anti-bacterial packaging paper of cinnamon essential oil on sweet cherry preservation[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48 (14): 153-159. (in Chinese)
- [16] 曾凯芳, 姜微波. 2,6-二氯异烟酸处理对芒果果实采后品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 267-271.
ZENG K F, JIANG W B. Effect of 2,6-dichloroisonicotinic acid treatment on postharvest quality of mango fruit[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 267-271. (in Chinese)
- [17] 陈玉环. 桂枝主要抑菌活性成分对‘新余蜜橘’青霉病抑菌机理及其保鲜效果的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
CHEN Y H. Study on the antibacterial mechanism and fresh-keeping effect of the main antibacterial active components of *Ramulus cinnamomi* on ‘Xinyu tangerine’ penicilliosis[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [18] 蒋帅. 肉桂精油对苹果灰霉病防治效果的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
JIANG S. Influence of cinnamon essential oil on the control effect of apple gray mold[D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [19] 毛雪琳. 肉桂精油对巨峰葡萄采后部分致病菌的抑制及其保鲜效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
MAO X L. Study on the inhibition and preservation effect of cinnamon essential oil on some postharvest pathogenic bacteria of Jufeng grape[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Seed Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 何靖柳. 肉桂精油对红阳猕猴桃采后两种致病菌抑制机制及其应用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
HE J L. Study on the inhibition mechanism and application of cinnamon essential oil on two postharvest pathogens of Hongyang kiwi[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [21] 陈晓晶. 香茅精油对番木瓜果实采后保鲜及作用机制研究[D]. 海口: 海南大学, 2021.
CHEN X J. Study on the postharvest preservation and mechanism of citronella essential oil on papaya fruit[D]. Haikou: Hainan University, 2021. (in Chinese)
- [22] 弓德强, 黄训才, 黄光平, 宋淑芳, 王爱平. 茉莉酸甲酯处理对采后芒果果实抗病性的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(12): 2294-2299.
GONG D Q, HUANG X C, HUANG G P, SONG S F, WANG A P. Effect of methyl jasmonate treatment on disease resistance of postharvest mango fruit[J]. Journal of Tropical Crops, 2016, 37(12): 2294-2299. (in Chinese)
- [23] 刘淑宇. 绿色木霉菌发酵液对芒果炭疽菌抑制作用及采后保鲜效果研究[D]. 厦门: 集美大学, 2013.
LIU S Y. Study on the inhibitory effect of *Trichoderma viride* fermentation liquid on mango anthracnose and its postharvest preservation effect[D]. Xiamen: Jimei University, 2013. (in Chinese)
- [24] 王晶波. 黄瓜体内酚性抗病物质合成和诱导信号转导相关机制的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
WANG J B. Experimental study on the synthesis of phenolic disease resistant substances and the related mechanism of induced signal transduction in cucumber[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [25] 王近近, 邵兴锋, 罗淑敏, 许凤, 王鸿飞. 茶树精油对灰葡萄孢霉生理功能的干扰研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(6): 56-62.
WANG J J, SHAO X F, LUO S M, XU F, WANG H F. Study on the interference of tea tree essential oil on the physiological function of *Botrytis cinerea*[J]. Modern Food Technology, 2016, 32(6): 56-62. (in Chinese)
- [26] 陈晓晶, 谷会, 帅希祥, 杜丽清. 香茅精油熏蒸对番木瓜炭疽病的防治效果及生理生化机制分析[J]. 中国南方果树, 2022, 51(1): 82-94.
CHEN X J, GU H, SHUAI X X, DU L Q. Analysis on the control effect and physiological and biochemical mechanism of citronella essential oil fumigation on papaya anthracnose[J]. Fruit Trees in Southern China, 2022, 51(1): 82-94. (in Chinese)
- [27] 龙清红, 高梵, 李晓安, 金鹏, 郑永华. BABA 处理对葡萄果实采后灰霉病的影响及机理[J]. 食品科学, 2016, 37(14): 213-218.
LONG Q H, GAO F, LI X A, JIN P, ZHENG Y H. Effect and mechanism of baba treatment on postharvest gray mold of grape fruit[J]. Food Science, 2016, 37(14): 213-218. (in Chinese)
- [28] 黄文佳, 杜丽清, 谷会. 肉桂精油复合壳聚糖涂膜对采后番木瓜炭疽病的防治效果及作用机制分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(2): 369-376.
HUANG W J, DU L Q, GU H. Analysis on the control effect and mechanism of cinnamon essential oil composite chitosan coating on postharvest papaya anthracnose[J]. Journal of Tropical Crops, 2022, 43(2): 369-376. (in Chinese)
- [29] 郭欣, 林育钊, 林河通, 李倩, 段睿琦. 壳聚糖处理对西番莲果实感病指数、抗病相关酶活性和抗病相关物质含量的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 206-212.
GUO X, LIN Y Z, LIN H T, LI Q, DUAN R Q. Effects of chitosan treatment on the disease susceptibility index, disease resistance related enzyme activity and disease resistance related substance content of passion fruit[J]. Food Science, 2021, 42(15): 206-212. (in Chinese)