

研究报告

莲雾采后病原菌的分离鉴定及抑制剂的筛选

姚欢格¹, 胡宇欣¹, 惠欣雨¹, 牛晓敏¹, 邵远志^{*2}¹ 海南大学 食品科学与工程学院, 海南 海口 570228² 海南大学 三亚南繁研究院, 海南 三亚 572025

姚欢格, 胡宇欣, 惠欣雨, 牛晓敏, 邵远志. 莲雾采后病原菌的分离鉴定及抑制剂的筛选[J]. 微生物学通报, 2025, 52(5): 2216-2229.

YAO Huange, HU Yuxin, HUI Xinyu, NIU Xiaomin, SHAO Yuanzhi. Isolation and identification of pathogens from post-harvest fruits of *Syzygium samarangense* and screening of effective inhibitors[J]. Microbiology China, 2025, 52(5): 2216-2229.

摘要:【背景】采后病害是制约热带水果商品产业化发展的一大重要影响因素。【目的】明确采后莲雾腐败病原菌种类, 并筛选高效生物抑制剂。【方法】以‘大叶’莲雾果实为试验材料, 采用组织分离、科赫氏法则、形态学鉴定和 ITS 序列同源性分析对果实表面主要致病菌进行分离纯化及鉴定, 验证莲雾果实主要致病菌种类, 并结合体外和体内试验筛选适宜的高效生物抑制剂。【结果】从莲雾果实中共分离鉴定出 5 种病原菌, 分别是可可毛色二孢菌(*Lasiodiplodia rubropurpurea*)、果生刺盘孢菌(*Colletotrichum fructicola*)、木贼镰刀菌(*Fusarium equiseti*)、小孢拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis microspora*)和棒孢拟盘多毛孢菌(*Neopestalotiopsis clavispora*), 并且发现木贼镰刀菌(*Fusarium equiseti*)能诱发莲雾果实腐烂。体外试验结果表明: 0.3 g/L 咖啡酸(caffeic acid, CA)对 5 种不同病原菌的抑菌率最高, 水杨酸(salicylic acid, SA)次之, 对香豆酸(*p*-coumaric acid, PCA)抑菌效果最差。体内试验结果表明: CA 可以通过延缓莲雾果实硬度(hardness)下降, 降低絮状绵软物的生成, 维持较高的抗坏血酸(vitamin C, V_C)和可滴定酸(titratable acid, TA)含量, 降低丙二醛(malondialdehyde, MDA)累积速率, 同时降低细胞膜透性, 延缓膜脂过氧化, 从而维持采后莲雾较好的贮藏品质。【结论】从采后莲雾果实中分离鉴定出 5 种致病菌, 并筛选出有明显抑菌作用的生物抑制剂, 为莲雾果实病害防治和采后贮藏保鲜提供了理论参考。

关键词: 莲雾果实; 病原菌; 分离鉴定; 生物抑制剂

资助项目: 海南省院士团队创新中心建设项目(SQ2021YSPTJXRWS0074)

This work was supported by the Academician Team Innovation Center Construction Project of Hainan Province (SQ2021YSPTJXRWS0074).

*Corresponding author. E-mail: syz@hainanu.edu.cn

Received: 2024-09-04; Accepted: 2024-10-08; Published online: 2024-11-15

Isolation and identification of pathogens from post-harvest fruits of *Syzygium samarangense* and screening of effective inhibitors

YAO Huang¹, HU Yuxin¹, HUI Xinyu¹, NIU Xiaomin¹, SHAO Yuanzhi^{*2}

¹ School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China

² Sanya Institute of Breeding and Multiplication, Hainan University, Sanya 572025, Hainan, China

Abstract: [Background] Post-harvest diseases are a major factor restricting the industrialization of tropical fruit commodities. [Objective] To screen efficient biological inhibitors for maintaining the post-harvest storage quality of *Syzygium samarangense* by identifying the post-harvest rot-causing pathogens. [Methods] The main pathogens on the fruit surface of *S. samarangense* ‘Daye’ were isolated by the tissue isolation and identified by Koch’s postulates, morphological observation and ITS sequence homology analysis. The efficient inhibitors against the pathogens were screened by *in vitro* and *in vivo* experiments. [Results] Five species of pathogenic fungi were isolated and identified as *Lasiodiplodia rubropurpurea*, *Colletotrichum fructicola*, *Fusarium equiseti*, *Pestalotiopsis microspora*, and *Neopestalotiopsis clavispora*, respectively. *F. equiseti* was discovered to cause fruit rot in *Syzygium samarangense*. The results of *in vitro* experiments showed that 0.3 g/L caffeic acid (CA) had the highest inhibition rates on the five species of pathogenic fungi, followed by salicylic acid, and *p*-coumaric acid had the weakest inhibitory effects. The results of *in vivo* experiments showed that the treatment with CA maintained the hardness, retarded the decomposition of flocculent soft matter, maintained high content of vitamin C and titratable acid, and decreased the accumulation rate of malondialdehyde in the fruits of *S. samarangense* ‘Daye’. In addition, CA reduced the cell membrane permeability and delayed the membrane lipid peroxidation, being conducive to maintaining the storage quality of post-harvest fruits of *S. samarangense* ‘Daye’. [Conclusion] Five species of pathogens were isolated and identified from the post-harvest fruits of *S. samarangense* ‘Daye’, and the biological inhibitors were screened out. The results provide a theoretical basis for the biocontrol of diseases affecting the post-harvest fruits of *S. samarangense*.

Keywords: *Syzygium samarangense* fruits; pathogen; isolation and identification; biological inhibitors

莲雾[*Syzygium samarangense* (Blume) Merr. et Perry], 隶属于桃金娘科蒲桃属, 又名洋蒲桃、爪哇蒲桃、水蒲桃等, 非呼吸跃变型热带、亚热带水果, 因其品种繁多、营养丰富, 深受消费者喜爱^[1]。莲雾果实原产于马来西亚马来半岛, 最早于 17 世纪被引入我国种植, 目前我国台湾、海南、广东、云南等热带亚热带地区

实现了大规模栽培^[2]。莲雾果实重量一般在 50–100 g 之间, 果形酷似梨形或钟形, 顶部肉质花萼分裂弯曲, 色泽鲜艳, 果肉呈白色海绵状, 酥脆多汁, 几乎所有部位均可食用, 并且富含多种营养物质, 具有较高的药用和观赏价值, 因此在国际消费市场具有广阔的发展潜力^[3-4]。然而, 新鲜的莲雾果实组织娇嫩、果皮薄脆、果

肉含水量高,所以极易受病原微生物侵染,从而导致果实品质下降,严重缩短其货架期降低莲雾果实的营养价值和商品价值^[5]。

目前,大量研究表明,真菌引起的采后病害是制约莲雾商品经济价值的主要影响因素,如李杨秀等^[6]从腐烂的广西平果莲雾中分离出一株炭疽病原菌,鉴定发现与果生刺盘孢菌(*Colletotrichum fructicola*)相似率高达 99.7%。陈业等^[7]鉴定发现导致采后莲雾灰斑病的病原菌为胶胞炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)。车建美等^[8]报道莲雾黑腐病病原菌与可可球二孢(*Lasiodiplodia theobromae*)亲缘关系高达 99%。此外,莲雾果实软腐病病害主要是拟盘多毛孢属(*Pestalotiopsis*)引起的,包括异色拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis sversicolor*)、小孢拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis microspora*)、茶褐拟盘多毛孢菌(*Pestalotiopsis guepinii*)^[9]。因此,对莲雾果实采后主要病原微生物进行分离鉴定并进行防治,对改善其采后贮藏品质、延长贮藏货架期、实现远距离销售有重要的意义。

近年来,随着人们对食品安全意识的不断提高,纯天然、绿色、无毒、无害、安全的生物防治方法成为了果蔬保鲜的首选。酚酸作为从天然植物中提取的有效活性成分,以其种类多样、资源丰富、绿色安全且能有效抑制果蔬采后病原微生物的生长繁殖等特点,被广泛应用于果蔬采后的病害防治^[10]。因此,本研究主要通过分离莲雾病原菌,结合生物学特征分析,鉴定莲雾果实采后的主要病原菌,进一步通过筛选高效生物抑制剂对莲雾采后病害进行防治,以期探究采后莲雾病害及其防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 样品

‘大叶’莲雾果实采自海南省琼海市莲雾种植基地,当天运回海南大学生命科学实验室。挑选健康无机械损伤且病虫害和成熟度一致的

果实存放于(1.0±0.5)℃备用。

1.2 培养基

马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基,青岛高科技工业园海博生物技术有限公司。

1.3 主要试剂和仪器

植物基因组 DNA 提取试剂盒,南京诺唯赞生物科技股份有限公司;咖啡酸(caffeic acid, CA)、水杨酸(salicylic acid, SA)和对香豆酸(*p*-coumaric acid, PCA),上海源叶生物科技有限公司。

生物安全柜,西班牙泰克净化设备(苏州)有限公司;超高压灭菌锅,致微(厦门)仪器有限公司;培养箱,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;正置显微镜,尼康精机(上海)有限公司;质构仪,上海保圣实业发展有限公司;电导率仪,上海仪电科学仪器股份有限公司。

1.4 病原菌的分离纯化

采用组织分离法^[11]对自然发病的莲雾果实病原物进行分离,取 4 mm×4 mm 的病健交界处果肉组织,用 75%乙醇浸泡 30 s,无菌滤纸干燥后采用 1%次氯酸钠浸泡 30 s,无菌水清洗 2–3 次,无菌滤纸干燥后将处理好的果肉组织接种于 PDA 培养基正中央,28℃恒温培养,待组织块周围长出 2–3 cm 菌丝时,取边缘菌丝接入新的 PDA 培养基中再次培养,重复上述操作直至得到纯化的病原菌。

1.5 病原菌的致病性检测

根据科赫氏法则回接病原菌。选取大小一致、健康无损伤的莲雾果实,用 75%的乙醇进行擦拭消毒,无菌水清洗干燥后,将纯化的病原菌菌饼接种至伤口处,同时接种形状大小一致的无菌培养基作为对照,在温度 28℃、湿度为 90%的条件下恒温培养,对发病症状进行观察和记录。取发病组织接种于 PDA 培养基,进一步对病原菌进行分离培养。

1.6 病原菌的形态学鉴定

将纯化后的病原菌接种于 PDA 培养基上,

待 28 °C 恒温培养至产孢子后, 利用显微镜观察并记录菌落、孢子和菌丝的形态结构, 并参照《植物病原真菌学》^[12]进行鉴定。

1.7 病原菌的 rDNA-ITS 序列与系统发育树分析

挑取适量的病原菌菌丝至无菌研钵中, 用液氮速冻并研磨成粉末, 参照植物基因组 DNA 提取试剂盒说明书提取病原菌的 DNA, 以通用引物 ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGC-3') 和 ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') 进行 PCR 扩增。PCR 反应体系(50 μL): 2×Rapid Taq Master Mix 25 μL, ddH₂O 19 μL, 菌 DNA 模板(40 ng/μL) 2 μL, 上、下游引物(10 μmol/L)各 2 μL。PCR 反应条件: 95 °C 5 min; 94 °C 30 s, 55 °C 30 s, 72 °C 2 min, 35 个循环; 72 °C 5 min, 4 °C 保存。

PCR 产物送至海口基睿生物科技有限公司进行测序, 测序结果在 NCBI 数据库在线进行 BLAST 分析比对, 采用 MEGA 11 软件构建系统发育树。

1.8 抑菌剂对病原菌的体外抑菌效果

参照瞿光凡等^[13]方法通过测定病原菌菌丝直径, 计算病原菌菌丝生长速率, 对不同的抑菌剂效果进行筛选。将咖啡酸、水杨酸及对香豆酸分别加入 100 mL 的 PDA 培养基中摇匀至浓度为 0.3 g/L, 每种抑制剂设置 3 个平行。待平板冷却后, 用 6 mm 打孔器取菌饼置于 PDA 平板上, 同时取不加抑制剂的空白菌饼作为对照组。运用十字交叉法记录菌落直径并根据公式(1)计算抑菌率。

$$\text{菌丝生长抑制率(\%)} = \frac{\text{对照菌落生长直径} - \text{处理菌落直径}}{\text{对照菌落直径} - \text{菌饼直径}} \times 100 \quad (1)$$

1.9 咖啡酸对莲雾果实采后品质的影响

选取无病害且大小均匀一致, 色泽统一的果实分为 2 个组, 咖啡酸处理组(CA)和对照组(control, CK): 将预处理后的莲雾果实浸泡于 0.3 g/L 咖啡酸溶液, 20 min 后捞出, 晾干装入

保鲜袋后, 贮藏于 25 °C、湿度为 90% 的恒温培养箱; CK 组: 浸泡于无菌水, 其他操作与 CA 组相同。

每组设置 3 个平行, 分别在 0、2、4、6、8 及 10 d 进行取样, 贮藏于 -80 °C 冰箱备用, 进行后续指标测定。

1.9.1 果实硬度的测定

采用质构仪测定莲雾果实硬度, 在果实中部选择 2 个位点对果实硬度进行测量, 每个处理每次测定 3 个果实, 取平均值, 记录下硬度值(N), 重复 3 次。

1.9.2 絮状绵软系数的测定

参照陈前等^[14]的方法纵向切开莲雾果实, 分别测量莲雾果实纵切面面积和絮状绵软组织的纵切面面积。其絮状绵软指数以絮状绵软组织的纵切面面积占整个莲雾果实纵切面面积的比例表示, 见公式(2):

$$\text{絮状绵软指数(\%)} = \frac{\text{絮状绵软面积}}{\text{莲雾果实纵切面面积}} \times 100 \quad (2)$$

1.9.3 抗坏血酸(vitamin C, Vc)含量的测定

分别取不同处理组不同贮藏时间的莲雾果实 5 g, 参照阎根柱等^[15]方法, 测定莲雾果实中抗坏血酸的含量, 以 mg/100 g 表示。

1.9.4 可滴定酸(titratable acid, TA)含量的测定

参照曹建康^[16]等方法并加以修改, 使用酸碱滴定法测定 TA 含量。取 5 g 莲雾皮肉混合样本溶解于 50 mL 蒸馏水中, 充分摇匀, 静置 20 min 后于 4 °C、10 000 r/min 离心 10 min, 吸取上清液 10 mL, 加入 2 滴 1% 酚酞指示剂, 用 0.05 mol/L 的 NaOH 溶液进行滴定, 蒸馏水作为空白对照, 结果以苹果酸进行折算。

1.9.5 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量的测定

参照张翼钊等^[17]方法并加以修改, 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量。

1.9.6 细胞膜渗透性的测定

根据曹建康等^[16]方法加以修改, 称取 2 g

莲雾果皮,加入 20 mL 蒸馏水浸泡、振荡 10 min 后用电导率仪进行第 1 次电导率测定(γ_1)。测定结束后,将其放入 100 °C 沸水浴中煮沸 15 min,待冷却后进行第 2 次电导率测定(γ_2),每处理组测定重复 3 次。根据公式(3)计算相对电导率。

$$\text{相对电导率}(\gamma) = \frac{\text{活组织提取液电导率}(\gamma_1)}{\text{被杀死后提取液的电导率}(\gamma_2)} \quad (3)$$

1.10 数据处理

利用 Excel 2021 处理和分析数据,采用 GraphPad Prism 9.5.0 软件作图,并采用 t 检验来计算显著性差异, $P < 0.05$ 表示差异显著,用“*”表示, $P < 0.01$ 表示差异极显著,用“**”表示。每组设置 3 个重复,数据以均值 $\pm$ 标准差(SD)表示。

2 结果与分析

2.1 莲雾采后病原菌的分离鉴定结果

2.1.1 病原菌分离与致病性测定结果

从莲雾病健交界处共分离得到 5 种形态不同的菌株,分别命名为 Y1–Y5。菌株 Y1 菌落前期为白色,后期为黑色;菌株 Y2 菌落前期为白色,后期为灰色;菌株 Y3 初期为白色,后期为粉白色;菌株 Y4、Y5 菌落颜色一致。通过科赫氏法则将纯化后的菌饼接种至莲雾伤口处观察发病症状。菌株 Y1 发病症状:前期感染部位果皮颜色转淡、水渍状,发病较快,伴随着黑灰色菌丝,感染后期莲雾表面干瘪变黑,果肉腐烂;菌株 Y2 菌饼处长出灰色菌丝,前期表面有褐色小病斑,略微凹陷,后期病斑上伴有凝胶状橙色孢子堆;菌株 Y3 病斑不规则,前期莲雾果皮为黄褐色,表面粉白色菌丝分布,后期莲雾凹陷,汁水流出并有明显酸腐味;菌株 Y4 和 Y5 的发病症状相似,菌饼处均有白色霉层分布,菌株 Y4 果实早期表面水渍、淡黄色小病斑,稍凹陷,后期病斑逐渐加深,表面散生黑色圆形小点,迅速软腐,菌株 Y5 菌丝有明显同心圆状,对照没有发病(图 1)。对回接

后的病原菌再次进行组织分离,所得到的病原菌与最初菌株形态一致。

2.1.2 形态学鉴定结果

菌株 Y1 在 PDA 培养基上的形态如图 1 所示,菌落形状为圆形,前期菌丝为白色,向周围扩展,3 d 长满培养基;培养 5 d 后最外圈菌丝有黑色色素附着,呈现黑绿色,气生菌丝为灰白色;培养后期颜色变深、面积扩大,整个培养皿变为黑色,并伴随着黑色小粒产生。分生孢子前期无色透明,后期为黑色色素附着的粒状,根据形态初步鉴定为毛色二孢属(*Lasiodiplodia*)。

菌株 Y2 在 PDA 培养基上近似圆形,正面菌丝为灰白色,呈现羊毛状卷且密,有时有同心轮纹,后期有黑色的基座,散生,会产生凝胶状粉红色或橙黄色分生孢子;分生孢子呈胶囊状,单孢子出现;根据菌落、孢子形态方面 Y2 与炭疽菌属(*Colletotrichum*)较为相似。

菌株 Y3 在 PDA 培养基上菌落呈现圆形,表面干燥,正面气生菌丝呈绒毛状卷曲且密长,背面为浅粉色和粉白色,培养基中间有一圈凹陷轮纹,表面附着淡粉色或淡橘色粉尘,为分生孢子;其分生孢子中部略微弯曲,两端稍尖,呈镰刀状;菌丝分枝,有间隔,根据形态初步判断为镰刀菌属(*Fusarium*)。

菌株 Y4 在 PDA 培养基上菌落呈现白色絮状的同心轮纹,气生菌丝茂密,培养基背面则为淡米黄色;培养后期菌丝表面分散着大量微凸黑色油状圆点,为病原菌的分生孢子,其分生孢子为长梭状,单孢,细胞有 5 个间隔,中间 3 个间隔有颜色,其中第 2 个颜色最深,其余颜色较浅,顶端有 2–3 根无色透明附属丝,尾部有 1 根短小的基部附属丝,其形态特征与已报道的拟盘多毛孢属(*Pestalotiopsis*)较为相似。

菌株 Y5 在 PDA 培养基上菌落呈现近似同心圆的轮纹,正面菌丝为白色,向四周扩展,背

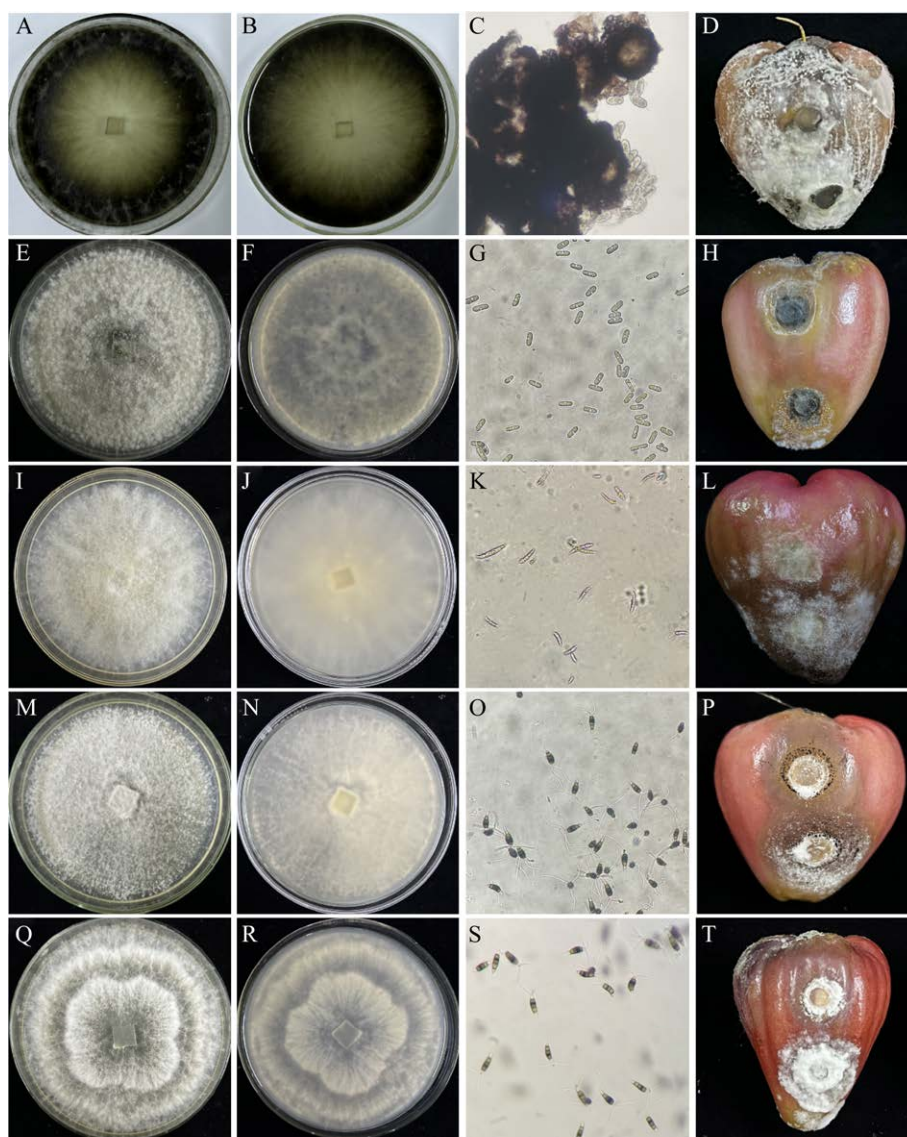


图1 莲雾果实病原菌菌落、菌丝、孢子形态特征和回接发病症状 A–D 为菌株 Y1; E–H 为菌株 Y2; I–L 为菌株 Y3; M–P 为菌株 Y4; Q–T 为菌株 Y5。从左到右列分别为菌丝正面、背面、孢子形态及回接发病症状。

Figure 1 Morphological characteristics of the pathogen colonies, mycelium, and spores of *Syzygium samarangense*, and the disease symptoms. A–D for strain Y1, E–H for strain Y2, I–L for strain Y3, M–P for strain Y4, Q–T for strain Y5. From the left to right was front and back of the mycelium, the spore morphology and the disease symptoms.

面为米白色，与正面形状相似，菌丝与菌丝之间存在明显的分界条带；后期菌丝表面有大量的黑色小点，散生外露，排列稀疏，为病原菌的分生孢子，其分生孢子与 Y4 相似，根据形态初步鉴定为拟盘多毛孢属(*Pestalotiopsis*)。

2.1.3 病原菌 rDNA-ITS 序列和系统发育树分析结果

以莲雾果实 5 株病原菌基因组 DNA 为模板，采用 ITS1 和 ITS4 为引物进行扩增，得到约为 500–750 bp 的 PCR 产物(图 2)，符合真菌

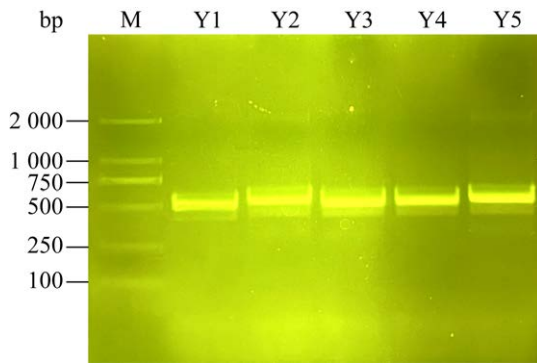


图2 病原菌 PCR 扩增产物凝胶电泳图

Figure 2 Gel electrophoresis of PCR amplification products of isolated pathogens.

ITS 区域长度。将测序得到的病原菌 ITS 序列通过美国国家生物技术信息中心 (NCBI) 的 BLAST 在线平台进行序列同源性比对分析, 并采用邻接法 (neighbor-joining method) 构建系统发育树。结果如图 3 所示, 菌株 Y1 (GenBank 登录号 PQ517009) 与毛色二孢菌属 (*Lasioidiplodia*) 处于同一分支上, 其中与 *L. rubropurpurea* 的同源性较高, 相似度高达 99%, 并与巴西毛色二孢菌 (*Lasioidiplodia brasiliense*) 和可可球二孢 (*Lasioidiplodia theobromae*) 亲缘关系高达 100%。菌株 Y2 (GenBank 登录号 PQ517012) 与炭疽菌

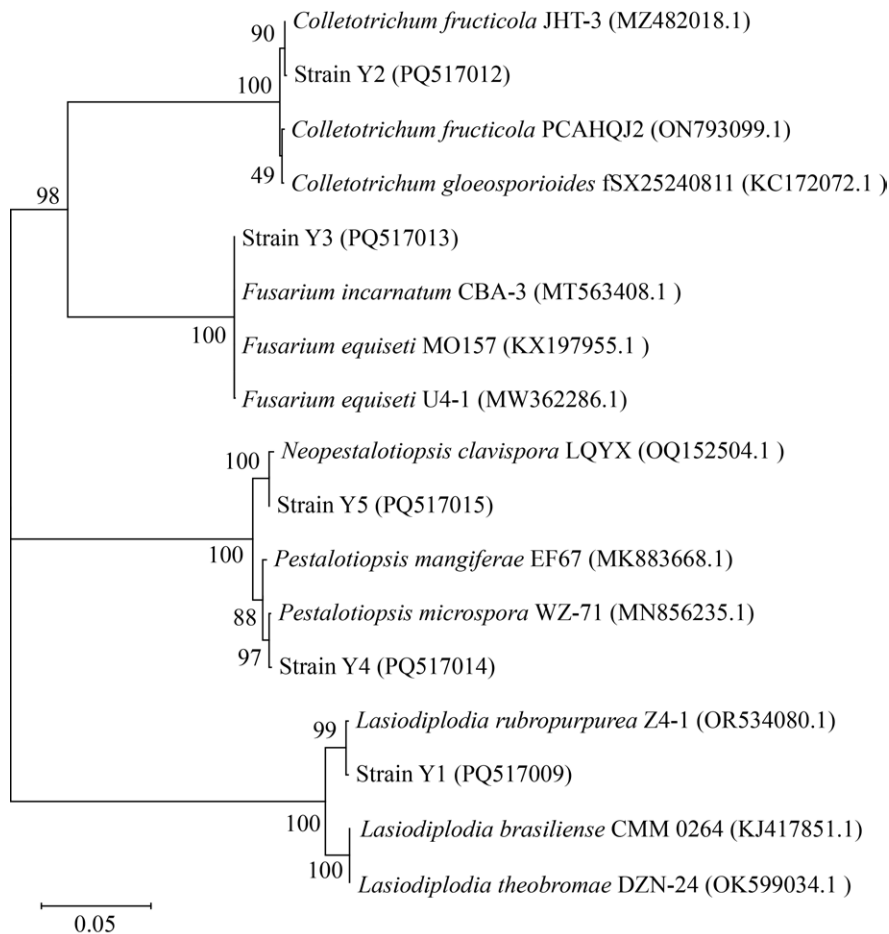


图3 基于 ITS 序列构建的 5 株菌株的系统发育树 括号中的序号为 GenBank 登录号; 分支点上的数字为置信程度; 标尺 0.05 为系统发育树的遗传距离。

Figure 3 Phylogenetic tree of five strains constructed based on ITS sequences. The serial number in bracket is the GenBank accession number; Numbers on branch points is the self expanding value; The scale 0.05 is the genetic distance of the phylogenetic tree.

属的果生刺盘孢菌(*Colletotrichum fructicola*)处于同一分支上,相似性高达 90%,结合其形态特征,推测该菌株为 *C. fructicola*。菌株 Y3 (GenBank 登录号 PQ517013)与镰刀菌属(*Fusarium*)有较高的同源性,相似度高达 100%,结合其形态特征和培养特性,推测菌株 Y3 为木贼镰刀菌(*Fusarium equiseti*)。菌株 Y4 (GenBank 登录号 PQ517014)和菌株 Y5 (GenBank 登录号 PQ517015)在同一分支上,菌株 Y4 与拟盘多毛孢属(*Pestalotiopsis*)在同一个分支上,与小孢拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis microspora*)具有较高的同源性,其相似度高达 97%,菌株 Y5 与棒孢拟盘多毛孢菌(*Neopestalotiopsis clavispora*)有较高的同源性,亲缘距离为零,相似度高达 100%。菌株 Y4 和 Y5 的相似性高达 100%,形态特征略有些差异,可能为同属病原菌。因此,通过测序和形态特征综合分析,菌株 Y1、Y2、Y3、Y4 和 Y5 分别鉴定为可可毛色二孢菌(*Lasiodiplodia rubropurpurea*)、果生刺盘孢菌(*Colletotrichum fructicola*)、木贼镰刀菌(*Fusarium equiseti*)、小孢拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis microspora*)和棒孢拟盘多毛孢菌(*Neopestalotiopsis clavispora*)。进一步将回接的病果组织表面的病原菌进行分离纯化,采用植物基因组 DNA

提取试剂盒对病原菌 DNA 进行提取,通过 ITS 扩增,经 1%的琼脂糖凝胶电泳检测发现,5 种病原菌的 ITS 片段大小为 500–750 bp 左右。进一步经过 BLAST 在线对比,与第 1 次结果相符。

2.2 抑菌剂对莲雾采后病原菌的抑菌活性

2.2.1 体外抑菌效果

在研究不同抑制剂对莲雾病原菌抑制效果实验中,发现咖啡酸、对香豆酸和水杨酸对 5 种莲雾病原菌菌丝生长均有抑制作用(表 1)。其中咖啡酸对病原菌 Y2、Y3、Y4 和 Y5 的抑制效果最好($P<0.05$),抑菌直径和抑菌率分别是 4.9 cm (29.02%)、4.2 cm (38.31%)、4.7 cm (38.59%)和 5.1 cm (27.35%)。水杨酸对病原菌 Y1 的抑制效果较好($P<0.05$),抑菌直径和抑菌率分别是 3.3 cm 和 55.40%。对香豆酸对 5 种病原菌的抑制效果不佳,其中对病原菌 Y5 的抑制效果低至 7.36%。此外,如图 4 所示,分别采用 0.3 g/L 的咖啡酸、水杨酸及对香豆酸对新鲜莲雾果实处理发现,CK 组和对香豆酸处理组分别在 4 d 时,莲雾表皮出现病斑,并随着贮藏时间延长,进一步扩大。在贮藏后期,水杨酸和咖啡酸处理组果实表皮出现病斑,但咖啡酸处理组果实表皮病斑

表 1 三种抑制剂对莲雾病原菌的菌丝生长抑制率

Table 1 Inhibition rates of mycelial growth of the *Syzygium samarangense* pathogen by three types of inhibitors

菌株编号 Strain No.	咖啡酸 Caffeic acid		对香豆酸 <i>p</i> -coumaric acid		水杨酸 Salicylic acid	
	菌落直径 Colony diameter (cm)	抑菌率 Inhibition rate (%)	菌落直径 Colony diameter (cm)	抑菌率 Inhibition rate (%)	菌落直径 Colony diameter (cm)	抑菌率 Inhibition rate (%)
Y1	3.60±0.20b	49.97	4.20±0.12a	42.37	3.30±0.12c	55.40
Y2	4.90±0.12a	29.02	5.20±0.00a	24.72	5.00±0.20a	27.94
Y3	4.20±0.32b	38.31	5.60±0.23a	13.33	4.70±0.12b	31.09
Y4	4.70±0.31b	38.59	6.20±0.12a	22.76	4.90±0.42b	35.63
Y5	5.10±0.23c	27.35	6.40±0.12a	7.36	5.50±0.00b	22.09

表中数值以平均数±标准差($n=3$)表示,横向比中不同小写字母代表具有显著差异($P<0.05$)。

The values in the table are expressed as mean±SD ($n=3$), and different lowercase within the same row letters indicate significant differences ($P<0.05$).

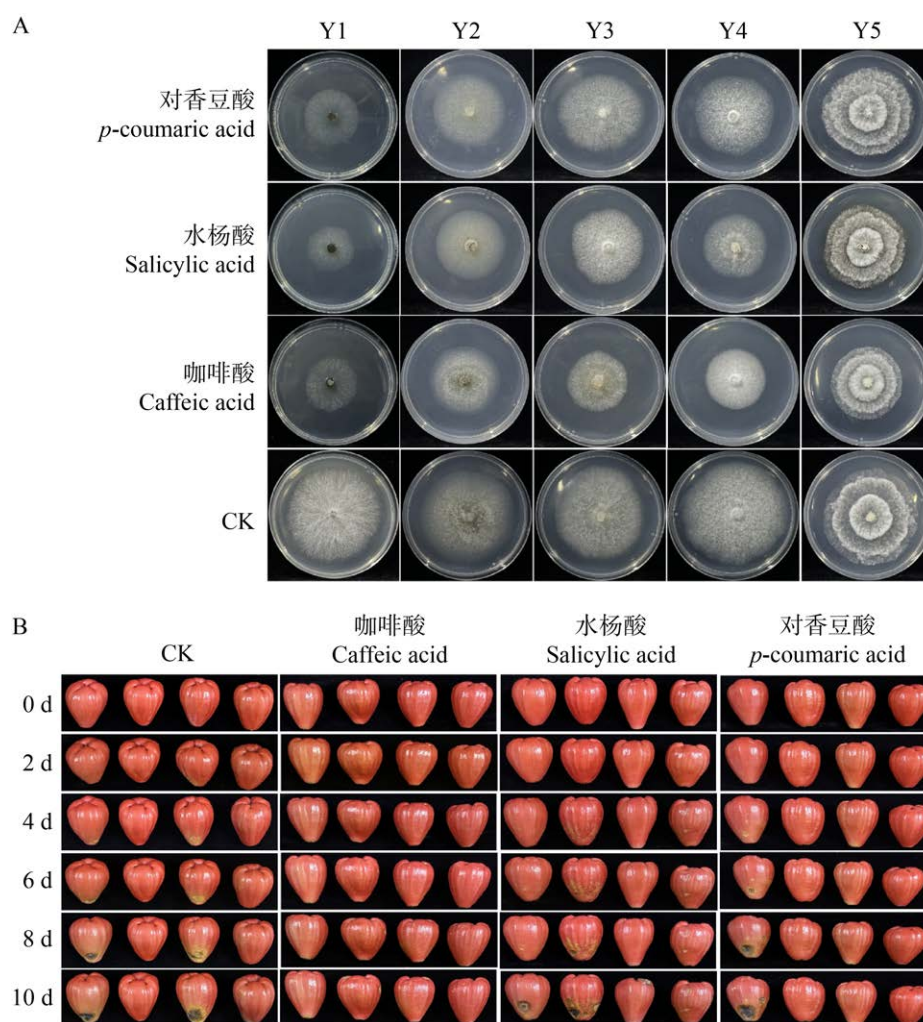


图 4 0.3 g/L 的咖啡酸、水杨酸及对香豆酸对莲雾病原菌菌丝生长(A)和果实感官品质的影响(B)

Figure 4 The effects of 0.3 g/L caffeic acid, salicylic acid and *p*-coumaric acid on the growth rate of pathogenic fungus (A) and sensory quality (B) of *Syzygium samarangense*.

程度明显小于水杨酸处理组。综上, 0.3 g/L 的咖啡酸处理不仅可以抑制莲雾果实病原菌生长繁殖速率, 还可以维持采后莲雾果实较好的贮藏品质, 因此, 选择浓度为 0.3 g/L 的咖啡酸作为最优条件, 对莲雾果实进行处理。

2.2.2 咖啡酸对采后莲雾果实品质的影响

硬度是判断果实成熟度和品质的关键指标之一, 由图 5A 可知, 随着贮藏时间延长, 两组果实的硬度均呈现下降趋势, 在贮藏第 2 天咖啡酸处理组果实硬度低于对照组, 但组间差异不显著; 在贮藏 4 d 后咖啡酸处理组的硬度均

显著高于对照组($P < 0.05$), 说明咖啡酸处理明显延缓了莲雾果实硬度的下降。

絮状绵软是莲雾果实特有的一种软化现象, 是判断莲雾果实在贮藏过程中成熟衰老的重要指标之一。莲雾果实成熟以后, 其果实内部絮状绵软组织面积不断扩大, 使得果实品质下降。由图 5B 可知, 咖啡酸处理组和对照组在采后贮藏期间絮状绵软系数的发展趋势相似, 呈现大幅度上升趋势。咖啡酸处理组在贮藏第 4 天和第 8 天与对照组差异极显著($P < 0.01$), 并且处理组的絮状绵软系数始终低于对照组。

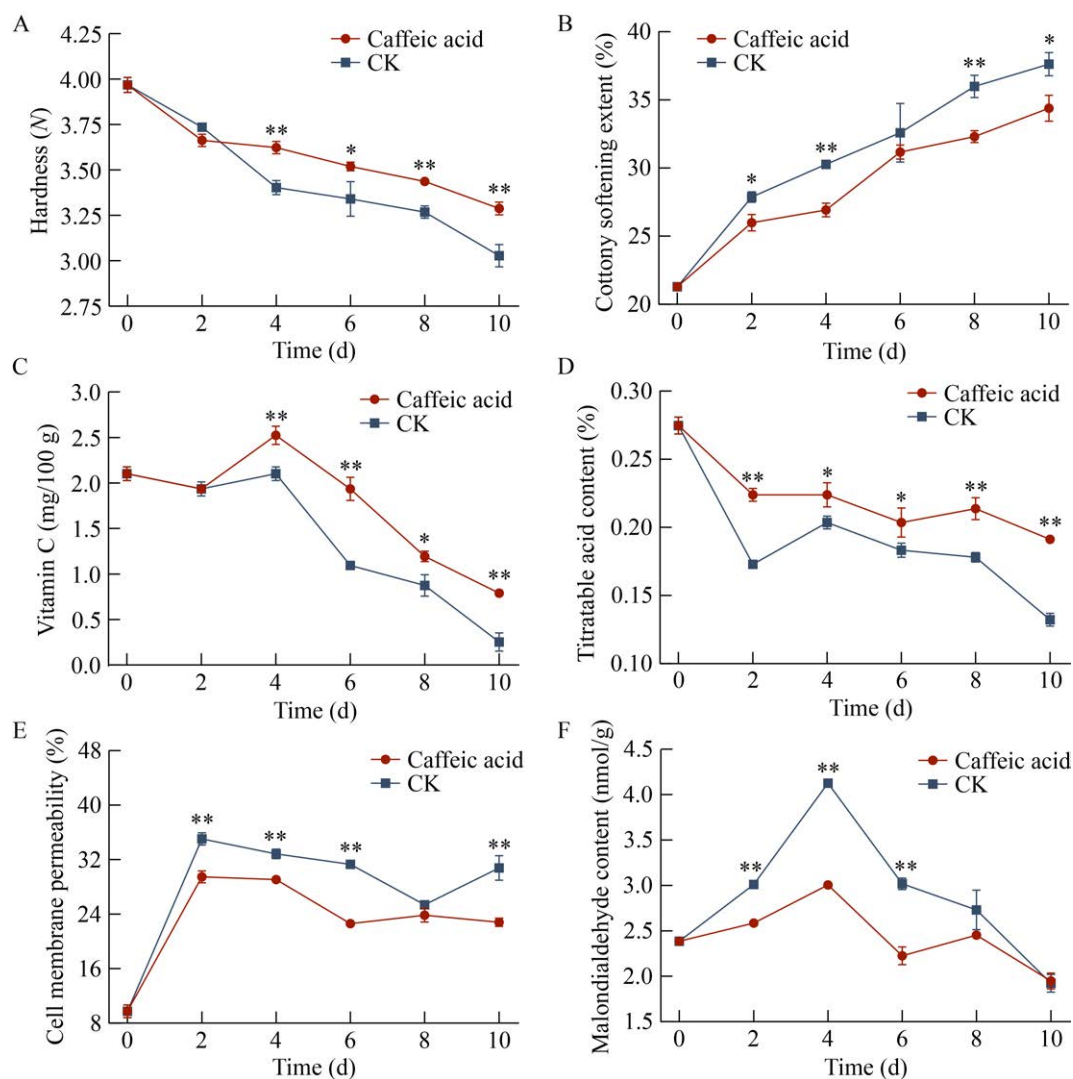


图 5 常温条件下咖啡酸对莲雾果实品质的影响 A: 硬度; B: 絮状绵软指数; C: 抗坏血酸含量; D: 可滴定酸含量; E: 细胞膜渗透性; F: 丙二醛含量。

Figure 5 The effects of caffeic acid on the quality of wax apple fruit under room temperature conditions. A: Hardness; B: Cottony softening extent; C: Vitamin C content; D: Titratable acid content; E: Cell membrane permeability; F: Malondialdehyde content. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

抗坏血酸是一种抗氧化活性物质,对植物的生长发育中具有重要作用。抗坏血酸易氧化,在贮藏期间呈现减少趋势。由图 5C 可知,咖啡酸处理组和对照组的抗坏血酸含量在初期稍下降后上升,之后呈现急速下降的变化趋势。贮藏第 2 天后,咖啡酸处理组的抗坏血酸含量明显高于对照组,两组在第 4 天均达到了最大值,分别为 2.52 mg/100 g 和 2.1 mg/100 g,在贮藏

末期,咖啡酸处理组抗坏血酸含量都保持较高的水平,说明咖啡酸有利于抑制莲雾果实抗坏血酸含量的降低,保持其品质。

可滴定酸是影响水果风味品质的指标之一,代表了果实的酸味。由于采后莲雾果实呼吸作用的持续发生,使得果实中可滴定酸继续被消耗,导致其含量不断减少^[18]。由图 5D 可知,在整个贮藏期间,处理组和对照组果实的可滴定

酸含量总体呈现由高到低的趋势,相比对照组,咖啡酸处理组的下降趋势比较缓慢。在贮藏期间,咖啡酸处理组的可滴定酸含量均显著高于对照组($P<0.05$),其中第2天和第10天分别是对照组的1.29倍和1.45倍。综上可知,咖啡酸处理组可以在贮藏后期更好地延缓莲雾果实可滴定酸含量的下降。

由图5E和图5F可知,咖啡酸处理组和对照组的细胞膜透性和丙二醛含量均呈现先上升后下降的趋势,其中两组的细胞膜透性在贮藏第2天达到最大值,之后开始缓慢下降;丙二醛含量在贮藏第4天差异最大($P<0.01$)并达到最大值(4.127 nmol/g),之后两组均急剧下降。咖啡酸处理抑制了细胞膜渗透性和MDA含量的上升,使其始终低于对照组,说明咖啡酸维持了细胞膜的完整性,减轻了莲雾果实在贮藏期间的品质裂变。

3 讨论

莲雾属于热带、亚热带特色水果,其果实含水量高,组织娇嫩,代谢旺盛,在运输途中极易受到机械损伤及病原微生物侵染,从而诱发采后病害。本研究从莲雾果实病健交界处分离鉴定出5株病原菌,Y1为可可毛色二孢菌(*L. rubropurpurea*)、Y2为果生刺盘孢菌(*C. fructicola*)、Y3为木贼镰刀菌(*F. equiseti*)、Y4为小孢拟盘多毛孢(*P. microspora*)和Y5为棒孢拟盘多毛孢菌(*Neopestalotiopsis clavispora*)。

Lasiodiplodia rubropurpurea,又名*Botryodiplodia theobroma*,属于葡萄孢菌科(*Botryosphaeriaceae*),是一种热带果蔬常见的真菌性病原菌,是导致许多重要经济农作物品质下降的主要病原菌之一,如芒果、葡萄及莲雾等^[19-21]。本研究从采后莲雾果实中分离出一株能导致果实腐烂的黑腐病病原菌*L. rubropurpurea*,该结果与Ko等^[22]研究结论高度相似。

炭疽病是常见的果蔬病害,主要由炭疽菌诱发,据报道暹罗炭疽菌(*C. siamense*)可导致草莓采

后病害,此外胶孢炭疽菌(*C. gloeosporioides*)也是引发柑橘褐斑病^[23]、芒果炭疽病和葡萄炭疽病等的主要病原菌。本研究在莲雾病害果中分离出一株炭疽菌,可以导致果实腐烂软化,并且褐变部位产生大量黑色孢子,该菌与李杨秀等^[6]从广西平果莲雾中分离得到的炭疽病病原菌一致,属于果生刺盘孢菌(*C. fructicola*)。

木贼镰刀菌在不同植株上呈现不同的病害,目前国内外研究报道木贼镰刀菌引起的病害有腐烂病、枯萎病、疫霉病、果腐病^[24]等,本研究发现该菌对莲雾果实采后病害有一定的诱发作用,该结论表明莲雾采后病害由多种不同病原菌诱发。因此,了解菌群结构的多样性对维持采后果实贮藏品质有极其重要的作用。

根据形态特征和基因序列可将原拟盘多毛孢属分为拟盘多毛孢属(*Pestalotiopsis*)、新拟盘多毛孢属(*Neopestalotiopsis*)和假拟盘多毛孢属(*Pseudopestalotiopsis*)^[25]三类,其是常见的植物病原菌,可引起叶斑病、结痂病、果实腐烂等多种采后病害,使果蔬造成严重的经济损失^[26-27]。据报道,原拟盘多毛孢属菌能引发莲雾果实软腐病害,导致果实变软,果肉迅速腐烂^[28]。莲雾果实采后病害种类是多样性的,常见多种病原菌一起作用,从而导致果实病变腐烂。

真菌性病害是制约果蔬商品价值的一大重要影响因素,目前果实采后病害的防治方法主要为化学杀菌剂,如环内酯类抗生素和唑类杀菌剂,不仅容易污染环境,也会威胁人体生命健康^[29-30]。而以植物提取的活性物质为主的生物杀菌剂逐渐走进大众视野,在本研究中以“咖啡酸、水杨酸和对香豆酸”3种不同的酚酸分别处理莲雾果实病原菌(Y1-Y5),结果表明,咖啡酸有较广的抑菌谱,对5种不同的病原菌抑菌效果最好,水杨酸次之,对香豆酸抑菌效果最差(表1和图4A),研究表明,咖啡酸可以较好抑制小麦哈茨木霉菌(*Trichoderma harzianum*)、“富士”苹果灰霉菌(*Botrytis cinerea*)及玉米镰刀菌(*Fusarium* sp.),生长繁殖速率,降低病害发生率^[31-33]。

由图 4B 所示,不同的酚酸处理均可以降低采后莲雾病害程度,其中 CA 效果最佳,贮藏至 10 d 时,果皮多呈现粉色,果形饱满,病斑面积随时间延长未明显扩大,感官品质明显优于其他处理组。研究发现表明,CA 处理可以在 24 h 内,通过降低甘蔗黑穗病病原菌甘蔗鞭黑粉菌(*Sporisorium scitamineum*)的孢子萌发率,延缓其侵染过程^[34],相似的研究也发现,通过分别接种 CA 和扩展青霉菌(*Penicillium expansum*)孢子悬浮液后,苹果病斑直径和发病率显著降低^[35]。综上,CA 处理可能通过在前抑制莲雾病原真菌孢子萌发,抑制莲雾果实病害程度。

感官品质是维持消费者接受度的一大重要指标,在本研究中,0.3 g/L 的咖啡酸可以显著抑制莲雾果实棉絮指数升高,维持子实体较高的硬度,降低果实失重率从而延缓果实皱缩现象,维持采后莲雾较好的感官品质,这与 Bai 等^[36]研究类似, ϵ -聚-L-赖氨酸可以通过维持莲雾果实较高的硬度、降低腐烂率,维持较好的贮藏品质。此外,0.3 g/L 的咖啡酸处理后的莲雾果实营养物质,如 TA、可溶性固形物(total soluble solids, TSS)和 Vc 消耗速率显著降低,Cheng 等^[37]研究表明,Vc 含量高低与果实抗氧化水平相关,绿原酸结合暹罗芽孢杆菌(*Bacillus siamensis*) N-1 处理可以维持莲雾果实较高的 Vc 含量,维持较高的抗氧化能力,进而调控果实抗病力。细胞膜是植物抵御病原微生物的第一道防线,Lin 等^[38]研究表明,龙眼果实 MDA 大量累积,进一步导致细胞膜氧化受损,果肉从而发生软化分解,在本研究中 CA 处理后的莲雾果实 MDA 和细胞膜通透性降低,果肉维持较高的硬度,棉絮状结构减少,与 CK 组相比,处理组果实的货架期延长至 10 d。

4 结论

在本研究中,从采后莲雾果实中分离鉴定出 5 种致病菌,并通过体外试验筛选出最佳抑制剂。CA 处理一方面能够通过抑制莲雾果实病

原菌生长繁殖,降低果实病害程度;另一方面,能维持果实较高的营养品质,保持细胞膜较完整的结构,抑制果肉降解,从而延长果实货架期。

REFERENCES

- [1] 李宏杨,柯用春,邢增通,任红,邢军. 莲雾加工利用的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(7): 131-134.
- [2] LI HY, KE YC, XING ZT, REN H, XING J. Advances in research on processing technology of *Syzygium samarangense*[J]. Food Research and Development, 2013, 34(7): 131-134 (in Chinese).
- [3] 孙勇,高乐,张先,甘霖,邢宏宝,何海林,何鹏. 莲雾营养成分及利用价值研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(11): 23-25, 31.
- [4] SUN Y, GAO L, ZHANG X, GAN L, XING HB, HE HL, HE P. Research progress of nutrient composition and utilization value on *Syzygium samarangense*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(11): 23-25, 31 (in Chinese).
- [5] KHANDAKER MM, BOYCE AN, OSMAN N, HOSSAIN AS. Physiochemical and phytochemical properties of wax apple (*Syzygium samarangense* [Blume] Merrill & L. M. Perry var. Jambu Madu) as affected by growth regulator application[J]. The Scientific World Journal, 2012, 2012: 728613.
- [6] 孙勇,高乐,张先,甘霖,何鹏. 莲雾产期调控及果实生理生化研究进展[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(S1): 9-12.
- [7] SUN Y, GAO L, ZHANG X, GAN L, HE P. Research progress of the regulation of production period and fruit physiology and biochemistry on *Syzygium samarangense*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(S1): 9-12 (in Chinese).
- [8] 马华青,安娜,陈萍. 莲雾保鲜研究进展[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(6): 162-165.
- [9] MA HQ, AN N, CHEN P. Research progress on preservation of wax-apple fruit[J]. Storage and Process, 2018, 18(6): 162-165 (in Chinese).
- [10] 李杨秀,吴凡,蒙姣荣,李界秋. 广西平果莲雾炭疽病病原菌鉴定[J]. 中国果树, 2018(1): 36-40, 44.
- [11] LI YX, WU F, MENG JR, LI JQ. Identification of the causal agent causing waxapple anthracnose in Pingguo country, Guangxi[J]. China Fruits, 2018(1): 36-40, 44 (in Chinese).
- [12] 陈业,袁盛勇,梁文凯,李芝丽,刘峻秀,张红丽,孔琼. 莲雾灰斑病病原菌鉴定及室内药剂筛选[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(10): 24-29.
- [13] CHEN Y, YUAN SY, LIANG WK, LI ZL, LIU JX, ZHANG HL, KONG Q. Pathogen identification and fungicides screening for grey spot of *Syzygium samarangense*[J]. China Plant Protection, 2021, 41(10): 24-29 (in Chinese).
- [14] 车建美,刘波,阮传清,王国芬,黄丹丹,杨忠来,郭慧慧. 莲雾黑腐病病原菌的鉴定及其生物学特性研究[J]. 福建农业学报, 2014, 29(6): 580-585.
- [15] CHE JM, LIU B, RUAN CQ, WANG GF, HUANG DD, YANG ZL, GUO HH. Identification pathogen causing black spot disease on wax apple (*Syzygium*

- samarangense* merr. et perry) and its biological characteristics[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 29(6): 580-585 (in Chinese).
- [9] 陈前, 吴光斌, 杨秋明, 陈发河. 莲雾软腐病病原菌鉴定及其生物学特性研究[J]. *中国植保导刊*, 2015, 35(7): 5-10.
CHEN Q, WU GB, YANG QM, CHEN FH. Pathogen identification and biological characteristics of wax apple soft rot disease[J]. *China Plant Protection*, 2015, 35(7): 5-10 (in Chinese).
- [10] ALIBI S, CRESPO D, NAVAS J. Plant-derivatives small molecules with antibacterial activity[J]. *Antibiotics*, 2021, 10(3): 231.
- [11] 张琼, 刘甜甜, 徐成, 李迪平, 申利民, 姜欢欢, 刘燕, 袁湘锋, 张娟, 唐俊. 湖南邵阳柑桔炭疽病菌分离鉴定及药剂筛选初报[J]. *中国南方果树*, 2023, 52(1): 16-21, 26.
ZHANG Q, LIU TT, XU C, LI DP, SHEN LM, LOU HH, LIU Y, YUAN XF, ZHANG J, TANG J. Isolation and identification of *Citrus* anthracnose pathogen in Shaoyang and its fungicides screening[J]. *South China Fruits*, 2023, 52(1): 16-21, 26 (in Chinese).
- [12] 陆家云. 植物病原真菌学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
LU JY. *Plant Pathogenic Mycology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001 (in Chinese).
- [13] 瞿光凡, 巴良杰, 雷霖卿, 马超, 张旭阳, 曹森. 茉莉酸甲酯对脆红李采后病原菌的抑制作用[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(24): 95-101.
QU GF, BA LJ, LEI JQ, MA C, ZHANG XY, CAO S. Inhibitory effect of methyl jasmonate on postharvest storage disease of *Prunus salicina*[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(24): 95-101 (in Chinese).
- [14] 陈前. 莲雾果实采后软腐病病原菌分离鉴定与致病机理的研究[D]. 厦门: 集美大学硕士学位论文, 2015.
CHEN Q. Identification and biological characterization of wax apple soft rot disease pathogen and the research of pathogenic mechanism of the pathogen[D]. Xiamen: Master's Thesis of Jimei University, 2015 (in Chinese).
- [15] 阎根柱, 赵迎丽, 施俊凤, 石磊, 陈会燕. 不同品种草莓采后生理及贮藏特性研究[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(4): 34-38.
YAN GZ, ZHAO YL, SHI JF, SHI L, CHEN HY. Study on postharvest physiological and storage characteristic of different varieties of strawberry[J]. *Storage and Process*, 2018, 18(4): 34-38 (in Chinese).
- [16] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. *Guidance on Postharvest Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007 (in Chinese).
- [17] 张翼钊, 王宝刚, 李文生, 钱建平, 王云香, 郝光飞, 孟凡翔, 常虹, 周家华, 赵山山. 温度波动对贮藏猕猴桃品质劣变的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(19): 43-48, 103.
ZHANG YZ, WANG BG, LI WS, QIAN JP, WANG YX, HAO GF, MENG FX, CHANG H, ZHOU JH, ZHAO SS. Effect of temperature fluctuations on quality deterioration of stored kiwifruit[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(19): 43-48, 103 (in Chinese).
- [18] 尹青春, 杨穗珊, 潘永波, 肖璇, 王承业, 陈春泉, 邓浩. 复合型涂膜剂对莲雾保鲜效果主成分分析综合评价[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 254-260.
YIN QC, YANG SS, PAN YB, XIAO X, WANG CY, CHEN CQ, DENG H. Use of principal component analysis for the evaluation of the effect of composite coatings in preserving the quality of wax apples (*Syzygium samarangense*)[J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 254-260 (in Chinese).
- [19] MUNIRAH MS. Characterization of *Lasiodiplodia theobromae* and *L. pseudotheobromae* causing fruit rot on pre-harvest mango in Malaysia[J]. *Plant Pathology & Quarantine*, 2017, 7(2): 202-213.
- [20] CORREIA KC, SILVA MA, de MORAIS MA Jr, ARMENGOL J, PHILLIPS AJL, CÂMARA MPS, MICHEREFF SJ. Phylogeny, distribution and pathogenicity of *Lasiodiplodia* species associated with dieback of table grape in the main Brazilian exporting region[J]. *Plant Pathology*, 2016, 65(1): 92-103.
- [21] MENG CR, ZHANG Q, YANG ZF, GENG K, ZENG XY, THILINI CHETHANA KW, WANG Y. *Lasiodiplodia syzygii* sp. nov. (*Botryosphaeriaceae*) causing post-harvest water-soaked brown lesions on *Syzygium samarangense* in Chiang Rai, Thailand[J]. *Biodiversity Data Journal*, 2021, 9: e60604.
- [22] KO YZ, LIYANAGE WK, SHIH HC, TSENG MN, SHIAO MS, CHIANG YC. Unveiling cryptic species diversity and genetic variation of *Lasiodiplodia* (*Botryosphaeriaceae*, *botryosphaeriales*) infecting fruit crops in Taiwan, China[J]. *Journal of Fungi*, 2023, 9(9): 950.
- [23] 邹娟, 姚卓, 尚永华. 柑橘炭疽病菌的生物学特性及枯草芽孢杆菌对其的抑制作用[J]. *植物保护*, 2016, 42(1): 61-67.
ZOU J, YAO Z, SHANG YH. Biological characteristics of *Citrus* pathogen *Colletotrichum gloeosporioides* and the inhibitory effect of *Bacillus subtilis* on the fungus[J]. *Plant Protection*, 2016, 42(1): 61-67 (in Chinese).
- [24] HAMI A, RASOOL RS, KHAN NA, MANSOOR S, MIR MA, AHMED N, MASOODI KZ. Morpho-molecular identification and first report of *Fusarium equiseti* in causing chilli wilt from Kashmir (Northern Himalayas)[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 3610.
- [25] MAHARACHCHIKUMBURA SSN, HYDE KD, GROENEWALD JZ, XU J, CROUS PW. *Pestalotiopsis* revisited[J]. *Studies in Mycology*, 2014, 79(1): 121-186.
- [26] SHU J, YU ZH, SUN WX, ZHAO J, LI QL, TANG LH, GUO TX, HUANG SP, MO JY, HSIANG T, LUO SM. Identification and characterization of pestalotioid fungi causing leaf spots on mango in Southern China[J]. *Plant Disease*, 2020, 104(4): 1207-1213.
- [27] KEITH LM, VELASQUEZ ME, ZEE FT. Identification and characterization of *Pestalotiopsis* spp. causing scab disease of guava, *Psidium guajava*, in Hawaii[J]. *Plant Disease*, 2006, 90(1): 16-23.
- [28] 何文琪, 王雅君, 尤文静, 葛春晖, 邵远志. 采后莲雾果实软腐病病原菌的分离鉴定和拮抗菌的筛选及防治机理[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(7): 102-108.
HE WQ, WANG YJ, YOU WJ, GE CH, SHAO YZ. Isolation and identification of soft rot pathogen in postharvest wax apple, screening of its antagonistic strain and prevention mechanism[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(7): 102-108 (in Chinese).

- [29] YAMAGISHI T, HORIE Y, TATARAZAKO N. Synergism between macrolide antibiotics and the azole fungicide ketoconazole in growth inhibition testing of the green alga *Pseudokirchneriella subcapitata*[J]. Chemosphere, 2017, 174: 1-7.
- [30] de JESÚS CENOBIO-GALINDO A, HERNÁNDEZ-FUENTES AD, GONZÁLEZ-LEMUS U, ZALDÍVAR-ORTEGA AK, GONZÁLEZ-MONTIEL L, MADARIAGA-NAVARRETE A, HERNÁNDEZ-SOTO I. Biofungicides based on plant extracts: on the road to organic farming[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(13): 6879.
- [31] SINGH UB, MALVIYA D, SINGH S, KUMAR M, SAHU PK, SINGH HV, KUMAR S, ROY M, IMRAN M, RAI JP, SHARMA AK, SAXENA AK. *Trichoderma harzianum*- and methyl jasmonate-induced resistance to *Bipolaris sorokiniana* through enhanced phenylpropanoid activities in bread wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1697.
- [32] ZHANG MY, WANG DJ, GAO XX, YUE ZY, ZHOU HL. Exogenous caffeic acid and epicatechin enhance resistance against *Botrytis cinerea* through activation of the phenylpropanoid pathway in apples[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 268: 109348.
- [33] CRUZ-RODRÍGUEZ RI, CRUZ-SALOMÓN A, RUIZ-LAU N, PÉREZ-VILLATORO JI, ESQUINCA-AVILÉS HA, MEZA-GORDILLO R. Potential application of *Crotalaria longirostrata* branch extract to reduce the severity of disease caused by *Fusarium*[J]. Agronomy, 2020, 10(4): 524.
- [34] SANTIAGO R, de ARMAS R, BLANCH M, VICENTE C, LEGAZ ME. *In vitro* effects of caffeic acid upon growth of the fungi *Sporisorium scitamineum*[J]. Journal of Plant Interactions, 2010, 5(3): 233-240.
- [35] HUANG R, LI CY, GUO M, LIU JX, QU LH, FAN YT, ZHANG CY, GE YH. Caffeic acid enhances storage ability of apple fruit by regulating fatty acid metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112012.
- [36] BAI JL, WANG HH, ZHANG JM, WU QP, MO SP, HE YL, WENG SQ, YANG XJ, LI CZ. Postharvest quality maintenance of wax apple and guava fruits by use of a fermented broth of an ϵ -poly-L-lysine-producing *Streptomyces* strain[J]. PLoS One, 2022, 17(3): e0265457.
- [37] CHENG ZY, LI R, JIANG ZC, TANG Y, LI W, SHAO YZ. Combined effect of *Bacillus siamensis* and chlorogenic acid on maintenance of quality and control of disease in stored wax apple fruit[J]. Food Quality and Safety, 2022, 610.1093: fqsafe.
- [38] LIN YF, CHEN J, LIN YX, LIN MS, WANG H, FAN ZQ, LU WJ, CHEN YH, LIN HT. DNP and ATP modulate the pulp softening and breakdown in fresh Longan by acting on the antioxidant system and the metabolisms of membrane lipids and cell wall polysaccharides[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140531.