金煌芒和贵妃芒抗病性差异与果实角质层之间的关系

李芬芳，段颖玥，李奕星，陈娇，袁德保*

（中国热带农业科学院热带生物技术研究所，海南海口 571101）

摘要：为了探明芒果果实抗病性与果实角质层的关系，从 5 个品种中筛选到抗病性最强的金煌芒和抗病性最弱的贵妃芒，通过蜡质去除、体外抑菌、扫描电镜（SEM）、气质联用（GC-MS）等方法和手段初步揭示金煌芒和贵妃芒抗病性差异与果实角质层之间的关系。结果显示：金煌芒的病情指数显著低于贵妃芒（贮藏 12 d 时分别为 37.83% 和 86.72%）；金煌芒和贵妃芒去除总蜡后，炭疽病发病严重；体外抑菌结果显示两个品种芒果的蜡质没有呈现明显抑制胶胞炭疽病菌丝生长的作用；相比贵妃芒，SEM 显示金煌芒具有更致密的蜡质形态且金煌芒的蜡质含量显著高于贵妃芒，因此金煌芒蜡质具有更好的屏障作用；GC-MS 显示金煌芒和贵妃芒蜡质的主要成分分别为醛类物质和醇类物质，且均在内蜡中检测出萜类物质异松油烯和 *β*-瑟林烯；金煌芒的角质层基质单体含量是贵妃芒的 1.55 倍。该文揭示了芒果果实抗病性与果实角质层之间存在紧密联系，该结果将为芒果的贮运保鲜提供理论和技术支持。

关键词：芒果；抗病性；蜡质；角质；炭疽病

文章编号：1673-9078(2025)12-117-123 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1308

Relationship between Disease Resistance and Fruit Cuticle of Jinhuang and Guifei Mangoes

LI Fenfang, DUAN Yingyue, LI Yixing, CHEN Jiao, YUAN Debao*

(Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

Abstract: In order to examine the relationship between disease resistance and the cuticle of mango fruits, the more disease-resistant Jinhuang and less disease-resistant Guifei mangoes were selected from five mango varieties and analyzed using wax stripping, *in vitro* bacteriostatic, scanning electron microscopy (SEM), and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that Jinhuang mangoes exhibited a disease index of 37.83%, considerably lower than the 86.72% observed in Guifei mangoes after 12 days of storage. After the complete removal of wax, the occurrence of anthracnose notably affected the two mango varieties. *In vitro* antibacterial results showed that the wax from the two varieties of mangoes did not exhibit any obvious inhibitory effect on the hyphal growth of *Colletotrichum gloeosporioides*. SEM results showed that Jinhuang mangoes possessed a denser waxy morphology and remarkably higher wax content than Guifei mangoes, indicating a superior barrier effect of the Jinhuang mango wax. GC-MS results showed that the primary wax components of Jinhuang and Guifei mangoes were aldehydes and alcohols, respectively, with the terpenoids isopterene and *β*-serinene detected in the inner wax of both varieties. The cuticle monomer matrix in Jinhuang mango was 1.55 times that in Guifei mango. This study revealed a strong correlation between disease resistance in mango fruit and the cuticle, providing theoretical and technical support for the

引文格式：

李芬芳,段颖玥,李奕星,等.金煌芒和贵妃芒抗病性差异与果实角质层之间的关系[J].现代食品科技,2025,41(12):117-123.

LI Fenfang, DUAN Yingyue, LI Yixing, et al. Relationship between disease resistance and fruit cuticle of jinhuang and guifei mangoes [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 117-123.

收稿日期：2024-09-03；修回日期：2024-11-18；接受日期：2024-11-22

基金项目：海南省自然科学基金面上项目（322MS108）

作者简介：李芬芳（1981-），女，硕士，助理研究员，研究方向：果蔬贮运保鲜，E-mail：lifenfang@itbb.org.cn

通讯作者：袁德保（1982-），男，博士，研究员，研究方向：果蔬贮藏与加工，E-mail：yuandebao@163.com

storage, transportation, and preservation of mango fruits.

Key words: mango; disease resistance; wax; cuticle; anthracnose

芒果（*Mangifera india* L.）是漆树科（Anacardiaceae）杧果属（*Mangifera*）植物。芒果是世界第五大水果，被誉为“热带果王”。2023 年我国芒果种植面积 600 万亩，产量达到 400 万 t（居世界第三位）[1]。果实货架期短和品质不稳定是影响芒果产业健康的重要问题。作为呼吸跃变型果实，后熟启动后迅速衰老并腐烂；果实常温下采后生理代谢异常旺盛，而低温下又易出现冷害（适宜贮藏温度为 12~13 ℃）。因此，芒果果实在贮运销过程中损耗介于 25%~40% 之间[2]。炭疽病是造成采后损耗的最重要原因。所以，围绕芒果果实炭疽病的发生与防控开展相关基础与应用基础研究具有重要意义。

角质层是覆盖在植物各器官细胞壁外表面的非细胞结构。角质层的化学成分、物理排列结构以及晶体结构类型等与其功能紧密相关。与植物细胞壁相连的角质素作为角质层的骨架；而蜡质填充于角质素骨架结构域并积累在外表面形成蜡膜或脂质晶体。角质素主要是十六和十八碳链羟基脂肪酸单体交联形成的多聚酯类复合物；蜡质由超长链（＞C20）脂肪酸及其衍生物、烯萜类和甾醇类环状化合物组成[3,4]。果实表皮蜡质成分复杂，且不同的果实种类，其蜡质成分存在很大的差异[5,6]。果皮蜡质层的厚度、结构和形态等对果实贮藏性具有重要影响。果皮蜡质在防止果实贮藏中的水分散失、延缓果实软化过程以及抗病等都有显著作用[7]。果实角质层在果实采后处于一个动态的变化过程，显著影响果实采后的贮藏性能[8]。

目前对于果实角质层的研究主要集中在柑橘、番茄和苹果等果实上，鲜有对芒果角质层的研究报道。本文首先从 5 个品种中筛选得到抗病性最强的金煌芒和抗病性最弱的贵妃芒，进而基于金煌芒和贵妃芒抗病性差异，试图初步明确芒果抗病性与角质层之间的关系。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 材料与试剂

芒果：实验所用芒果均采购于中国热带农业科学院儋州实验基地，选取果形端正、大小均匀、无病虫害及机械伤，成熟饱满度为 7~8 成的芒果果实，采摘后立即运回实验室。

供试菌株：胶孢炭疽病菌株，该菌株分离自芒果炭疽病病样，低温贮藏于课题组菌种保存室。

所用试剂：氮气购自海南锋利气体有限公司，正二十四烷标准品、磷酸二氢钠、无水硫酸钠、阿拉伯树胶、磷酸氢二钠、碳酸氢钠、三氟化硼甲醇溶液、N,O-双（三甲基硅烷）三氟乙酰胺（N,O-bis(trimethylsilyl trifluoroacetamid, BSTFA)），购自上海麦克林生化科技股份有限公司；戊二醛，购自上海易恩化学技术有限公司；无水乙醇、叔丁醇、正己烷、次氯酸钠，AR，购自西陇科学股份有限公司；三氯甲烷，购自广州市广试化学试剂有限公司；纤维素酶、半纤维素酶、果胶酶，购自 Sigma-Baldric 上海贸易有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

JC-9030A 电热鼓风干燥箱，上海博讯有限公司；ME203/02 电子分析天平，梅特勒－托利多仪器有限公司；ND200 氮吹仪，杭州瑞诚仪器有限公司；Axio lab. A1 电子显微镜，德国卡尔蔡司集团；K850 超临界点干燥仪，英国 Quorum 公司；SC7620 离子溅射仪，英国 Quorum 公司；Zeiss Sigma 场发射扫描电子显微镜，德国卡尔蔡司集团；7890B-5977A 气相色谱－质谱联用仪，安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同品种芒果抗病性比较

孢子悬浮液的制备：参考杨利艳等[9]的方法制备芒果胶孢炭疽病菌孢子悬浮液，使用血球计数板在显微镜下进行计数，并将孢子悬浮液调制至每毫升 1×10^5 个，待用。

芒果用 2% 次氯酸钠溶液浸泡 2 min，然后用大量清水冲洗，风干。将 5 mL 浓度为每毫升 1×10^5 个的孢子悬浮液均匀喷洒于 5 种芒果表面，用聚乙烯薄膜保鲜袋套袋挽口后置于室温贮藏，每天观察果实发病情况，统计发病个数与发病程度，计算果实病情指数，每个品种 30 个芒果为一次重复，设置 3 个重复。

1.2.2 病情指数

根据果实表面的病斑大小进行分级[10]，其中，0 级：表面无病斑；1 级：表面可见针头大小的病斑，病斑面积小于 1/10；2 级：病斑面积在 1/10~1/4 之间；3 级：病斑面积在 1/4~1/2 之间；4 级：病斑面积大于 1/2。病情指数公式：

$$Y=\frac{\sum(A\times B)}{C\times 4}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

Y——病情指数，%;

A——病级果数，个;

B——该级代表数值;

C——调查总果数，个;

4——最高级代表数值。

1.2.3 蜡质去除对芒果果实炭疽病发病的影响

两个品种芒果（贵妃芒和金煌芒）的外蜡和总蜡分别剥离后进行无损接种，而未去除蜡质的果实直接进行无损接种作为对照。将生长两周的胶胞炭疽病菌落上取直径约 8 mm 琼脂块接种至芒果果面中央，然后将接种后的芒果置于 27 ℃培养，4 d 后观察果实的发病情况。设置 3 个重复。外蜡剥离方法：阿拉伯树胶在三氯甲烷中浸泡 15 min，抽滤后置于通风橱晾干待用。将处理后的阿拉伯树胶配置成 90% 的溶液，并将溶液用刷子均匀地涂于芒果果实表面，风干后剥离。上述操作重复两次。总蜡去除方法：将果实置于三氯甲烷中浸泡 30 s，然后将芒果取出置于通风橱晾干待用。

1.2.4 蜡质对胶胞炭疽病菌菌丝生长的体外抑制

蜡质对菌丝生长的抑制参考 Russin 等[11]的方法。培养皿中装满 20 mL PDA 培养基，400 μL 的蜡质喷在培养基的表面。轻微盖上盖子以让有机溶剂挥发。400 μL 的有机溶剂喷到 PDA 培养基上作为对照。从生长两周的胶胞炭疽病菌落上取直径约 8 mm 琼脂块，放置在培养皿的中间。培养皿置于 27 ℃暗光培养 24 h，72 h 后对胶胞炭疽病菌的生长进行统计。设置 3 个重复。

1.2.5 扫描电镜观察

贵妃芒和金煌芒各取 3 个果面光洁、无机械损伤、大小及成熟度均一的果实，自来水冲洗后再用蒸馏水清洗 3 次，风干。用手术刀在果实赤道处取 5 mm×5 mm ×3 mm 的果皮，将取好的果皮样品在 2.5%（φ）戊二醛中固定 6 h，用 0.1 mol/L 的磷酸缓冲溶液冲洗（3 次，每次 15 min），然后用不同体积分数的乙醇溶液洗脱（30%、50 %、70 %、80%、90% 和 100% 分别洗 2、2、1、1、1、2 次，每次 15 min），将洗脱后的样品浸泡在叔丁醇中待干燥。取出待测样品用二氧化碳临界点干燥仪干燥后，采用离子溅射仪喷金，最后放置于样品台观察拍片。

1.2.6 芒果果实表面积测定

根据文献方法[12]，并略做修改。芒果果实表面积按下式计算：

$$A=\frac{X\times D}{Y} \quad (2)$$

式中：

A——果实表面积，cm^2；

X——果皮的总质量，g；

D——内径为 1.0 cm 的打孔器获得的小圆片的面积，cm^2；

Y——内径为 1.0 cm 的打孔器获得的所有小圆片的总质量，g。

1.2.7 果实蜡质成分提取与测定

蜡质提取：分别选取 45 个贵妃芒和 15 个金煌芒果实，分 3 次重复，每次 15 个贵妃芒果实和 5 个金煌芒果实。参考 Liu 等[13]和 Wang 等[14]分别提取外蜡和内蜡。蜡质成分测定参考 Liu 等[13]的方法。

1.2.8 果皮角质基质提取与分析

果皮角质单体的提取参考 Wang 等[15]。用内径为 1.0 cm 的打孔器在去蜡后的果实赤道部位均匀打 6 个孔，收集果皮圆片加入混合酶液（0.2 g/L 果胶酶、0.5 g/L 半纤维素酶、0.5 g/L 纤维素酶）进行酶解，隔天换酶液，酶解至圆片表面无碎片物质释出，即为角质膜层。将角质膜层 37 ℃烘干至恒重。取 10.0 mg 角质膜层浸泡在三氟化硼甲醇溶液中并于 70 ℃的烘箱中转酯解聚 16 h，然后冷却、过滤，加入 3 倍体积的饱和碳酸氢钠水溶液终止反应，再用三氯甲烷萃取 3 次。合并的萃取液用无水硫酸钠干燥，在氮气下吹干，−20 ℃保存待测。果皮角质单体成分测定参考 Wang 等[15]。

1.3 数据与分析

实验均为随机取样，所有实验重复 3 次，结果以平均值 ± 标准差（SD）表示。采用 SPSS Statistics 26 软件进行统计分析，采用 Duncan 氏新复极差法（SSR）进行多重比较，不同英文字母表示多重比较差异显著。采用 Origin 2023 软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同品种芒果抗病性比较

从图 1 可以看出，在同样贮藏条件下，不同品种芒果的抗病性存在较大差异。贮藏 3 d 时，除金煌芒外，其余芒果品种均出现病症；随着贮藏时间的延长，各组病情指数都呈现上升趋势。其中，贵妃芒的病情指数在贮藏前期就出现较大增幅；贮藏结束时，贵妃芒病情指数为 86.72%，而金煌芒病情指数仅为 37.83%，具有显著差异（$P<0.05$）。综上可以看出，在筛选的 5 个芒果品种当中，贵妃芒是抗病性最差的品种，而金煌芒是抗病性最好的品种。宁平指出金煌芒是中抗

炭疽病品种[16]；王晶等[17]、常金梅等[18]指出果皮较薄的芒果品种更易感染炭疽病。金煌芒果皮较厚，而贵妃芒果皮较薄（分别为 1.3 mm 和 0.4 mm）。

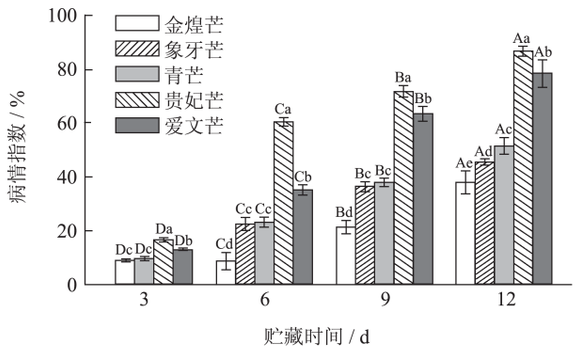

图 1 贮藏期间各品种芒果的病情指数

Fig.1 Disease index of various varieties of mangoes during storage

注：不同小写字母表示同一天不同品种间的显著性差异 $P<0.05$；同一品种大写字母不同表示显著性差异 $P<0.05$。

2.2 蜡质去除对芒果果实炭疽病发病的影响

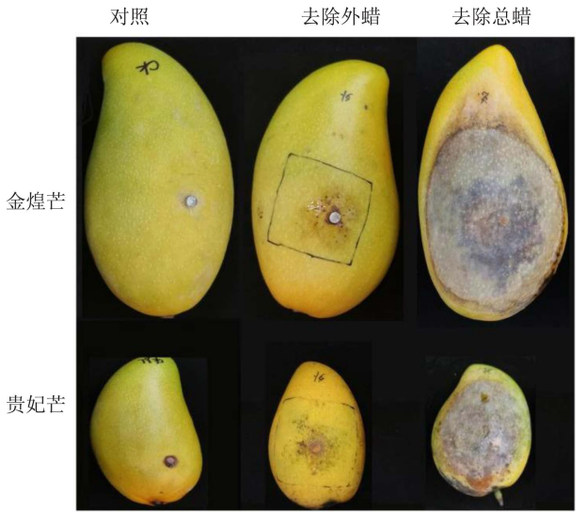

图 2 去除蜡质的芒果果实发病情况图

Fig.2 Picture of the incidence of dewaxed mango

从图 2 和表 1 可见，蜡质去除对芒果果实炭疽病发病的影响较大。当贵妃芒和金煌芒仅去除外蜡时，果实发病直径为 1.1 cm；当贵妃芒和金煌芒去除总蜡时，果实的发病程度严重，整个果实都出现感病症状（贵妃芒和金煌芒的发病直径分别为 6.88 cm 和 10.68 cm）。上述结果说明蜡质在芒果果实抵御炭疽病发病过程中扮演了重要的作用。

前人部分研究对蜡质的抑菌性能进行了一些报道。Yin 等[19]研究发现，苹果梨果表提取的不同极性蜡质呈现出一定的抑制链格孢菌丝生长的活性。李大军等[20]研究发现，杨树等树蜡对几种食源性致病细菌呈现出一定的体外抗菌活性。本文研究发现，金煌芒和贵妃芒的蜡质（包括外蜡、内蜡和总蜡）并没有呈现出体外抑制胶胞炭疽病菌菌丝生长的作用（见表 2）。因此，本文结果表明芒果果实蜡质在抵御炭疽病发病过程中的作用机理以物理屏障为主。

表 1 蜡质去除对金煌芒和贵妃芒果实发病直径的影响（cm）

Table 1 Effect of wax removal on the disease diameter of Jinhuang and Guifei mango (cm)

处理	贵妃芒	金煌芒
对照（未去除蜡质）	0^{c}	0^{c}
去除外蜡	1.1 ± 0.25^{b}	1.1 ± 0.20^{b}
去除总蜡	6.88 ± 0.33^{a}	$10.68 \pm 0.42^{a*}$

注：同一列小写字母不同表示显著性差异 $P<0.05$；* 表示同一行显著性差异 $P<0.05$。

2.3 贵妃芒和金煌芒果实表面蜡质晶体形态分析

进而我们对金煌芒和贵妃芒的表面蜡质进行了扫描电镜观察。结果如图 3 所示，贵妃芒和金煌芒果实表面都有一层不均匀覆盖且无固定形态的蜡质，但是在形貌方面存在着较大差异。贵妃芒的外蜡晶体在果实外部零星分散，呈现出不规则的血小板状和部分颗粒状，而且外蜡晶体未表现出聚集趋势；金煌芒表面蜡质由相互连接的蜡质脊组成，蜡质脊排列紧凑，空隙间散落有部分较小的颗粒状外蜡晶体，蜡层光滑呈现油膜状且基本完整覆盖整个果实表面。有研究人员[21]通过扫描电镜观察发现芒果果实表面有一层较厚的角质层覆盖，形成角质花纹，硬似革质。林河通等[22]通过扫描电镜观察龙眼果实的果皮，发现果皮的显微结构与果实耐贮性之间有紧密关系。结合本文结果，可以推测金煌芒果实表面相对致密的蜡质层对炭疽病菌有较好的屏障作用，从而使得金煌芒呈现较好的抗病性。

表 2 不同蜡质对胶胞炭疽病菌菌丝生长的体外抑制（cm）

Table 2 *In vitro* inhibition of the hyphal growth of *Colletotrichum gloeosporioides* by different waxes (cm)

对照	金煌-外蜡	金煌-内蜡	金煌-总蜡	贵妃-外蜡	贵妃-内蜡	贵妃-总蜡
4.20±0.53	4.15±0.26	3.93±0.32	4.17±0.42	4.15±0.45	4.23±0.23	4.17±0.51

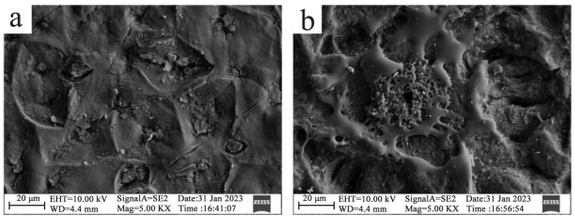

图 3 果实表面蜡质形态扫描电镜图（5 000×）

Fig.3 The SEM photos of epicuticular wax of mango (5 000×)

注：a 为贵妃芒；b 为金煌芒。

2.4 贵妃芒和金煌芒果实表面蜡质组分含量分析

我们进而对贵妃芒和金煌芒的蜡质进行了定性和定量的测定。贵妃芒和金煌芒的外蜡含量分别为 35.25 μg/cm^2 和 120.48 μg/cm^2，内蜡含量分别为 87.87 μg/cm^2 和 129.67 μg/cm^2（见图 4）。贵妃芒和金煌芒表面蜡质含量具有显著差异（$P<0.05$）。对比其他果实的蜡质含量可发现，芒果果实的蜡质含量和苹果梨[19]中的蜡质含量在同一水平。Parsons 等[12]通过对 50 种不同基因型的胡椒果实角质层的蜡质及角质单体组分分析，发现不同种胡椒果实间的蜡质含量变化较大，最高可达到 14 倍。综上可见，金煌芒中的蜡质（外蜡、内蜡和总蜡）显著高于贵妃芒，从而使得两者在抵御炭疽病发病的作用中呈现出差异。

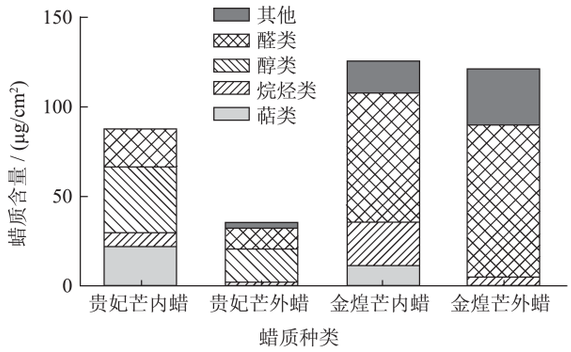

图 4 贵妃芒和金煌芒果实蜡质及其组分含量

Fig.4 The wax and its component content of Guifei mango and Jinhuang mango

贵妃芒的内蜡主要由醇类（41.72%）、萜类（25.46%）、醛类（23.42%）和烷烃类（8.51%）等组分组成，外蜡主要由醇类（53.5%）、醛类（32.34%）及烷烃类（6.07%）等组分组成；金煌芒的内蜡主要由醛类（57.33%）、烷烃类（19.04%）及萜类（9.12%）等组分组成，外蜡主要由醛类（70.4%）和烷烃类（4.09%）等组分组成。可见，贵妃芒和金煌芒蜡质的主要成分分别为醇类物质和醛类物质。番茄[23]、苹果梨[19]和苹果[24]等水果中蜡质的主要成分均为烷烃，而温州蜜柑和纽荷尔脐橙中蜡质的主要成分为醛类[14]。不同果实中蜡质主要成分不同，所以导致蜡质在抑菌性方面存在较大差异。

贵妃芒和金煌芒外蜡中脂肪族物质及含量见图 5。贵妃芒外蜡中脂肪族物质共 10 种，其中含量最高为二十八烷醇（18.10 μg/cm^2），含量最低的为正十七烷（0.13 μg/cm^2）。金煌芒外蜡中脂肪族物质只有 4 种，其中含量最高为正二十四醛（52.56 μg/cm^2），含量最低的为 5,7-二甲基十一烷（1.17 μg/cm^2）。壬烷、正十六烷、正十七烷、正十九烷、戊五醇醛、正二十六烷醛、十二醇和二十八烷醇只在贵妃芒外蜡中检测到，5,7-二甲基十一烷和正二十烷仅在金煌芒外蜡中检测到。

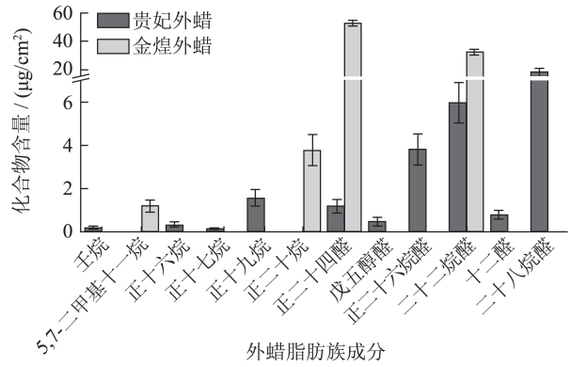

图 5 贵妃芒和金煌芒果实外蜡中脂肪族成分及含量

Fig.5 Contents of aliphatic substances in the epicuticular wax of Guifei mango and Jinhuang mango

贵妃芒和金煌芒内蜡中脂肪族物质及含量见图 6。贵妃芒内蜡中脂肪族物质共 8 种，其中含量最高为二十八烷醇（33.56 μg/cm^2），含量最低的为正十九烷（0.43 μg/cm^2）。金煌芒内蜡中脂肪族物质只有 6 种，其中含量最高为正二十醛（59.86 μg/cm^2），含量最低的为 2,4,6-三甲基癸烷（0.60 μg/cm^2）。正十六烷、正十九烷、正二十六烷、十八醇、二十八烷醇、十五醛、二十烷醛和三十烷醛只在贵妃芒内蜡中检测到，2,4,6-三甲基癸烷、2,8-二甲基十一烷、二十醛和二十四醛仅在金煌芒内蜡中检测到。冰糖橙和温州蜜柑的外蜡、内蜡特长链脂肪酸化合物主要由烷烃、游离脂肪酸等组成[25]。

除脂肪族化合物外，在贵妃芒和金煌芒内蜡中还检测到了部分萜类物质（异松油烯和 β-瑟林烯），而外蜡中未检测到。贵妃芒中的异松油烯和 β-瑟林烯含量分别为 21.54 μg/cm^2 和 0.83 μg/cm^2，而金煌芒中的含量分别为 10.11 μg/cm^2 和 1.34 μg/cm^2。两种芒果内蜡中检出萜类化合物的种类一致，但含量具有显著差异（$P<0.05$）。同样的，除了脂肪族化合物，在温州蜜柑和冰糖橙的内蜡中还检测到了大量的萜类物质[25]。Liu 等[26]发现法尼醇能够抑制柑橘病原菌的

生长。张静等[25]基于仅在冰糖橙中检测到法尼醇，推测法尼醇是冰糖橙比温州蜜柑有更好耐贮性的重要原因。

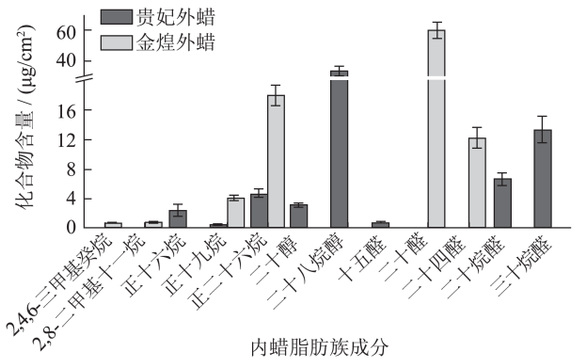

图 6 贵妃芒和金煌芒果实内蜡中脂肪族成分及含量

Fig.6 Contents of aliphatic substances in the intraepidermal wax in Guifei mango and Jinhuang mango

表 3 贵妃芒和金煌芒果实内蜡中萜类化合物含量

Table 3 Contents of terpenoids in intraepidermal waxes of Guifei mango and Jinhuang mango

成分/(μg/cm²)	贵妃芒	金煌芒
异松油烯	21.54 ± 1.63	10.11 ± 1.44*
β-瑟林烯	0.83 ± 0.21	1.34 ± 0.14*

注：* 表示显著性差异 $P<0.05$。

2.5 贵妃芒和金煌芒果实角质单体成分分析

表 4 贵妃芒和金煌芒果实角质层基质单体含量

Table 4 The contents of cutin monomers in the Guifei mango and Jinhuang mango

单体/(μg/cm²)	贵妃芒	金煌芒
十一烷酸	0.80 ± 0.19	0.00 ± 0.00*
十六烷酸	0.00 ± 0.00	0.53 ± 0.06*
硬脂酸	0.00 ± 0.00	0.75 ± 0.11*
棕榈酸	6.88 ± 0.52	5.25 ± 0.34*
亚油酸	5.35 ± 0.20	2.45 ± 0.28*
亚麻酸	2.75 ± 0.24	3.21 ± 0.11*
对苯二甲酸	1.61 ± 0.05	37.05 ± 1.58*
芥油酸	25.69 ± 0.94	17.47 ± 1.06*
总量	43.08 ± 1.15	66.73 ± 3.53*

注：* 表示显著性差异 $P<0.05$。

贵妃芒和金煌芒果实角质单体组成及含量见表 4。贵妃芒和金煌芒的角质含量分别为 43.08 μg/cm² 和 66.73 μg/cm²，两者呈现显著性差异（$P<0.05$）。贵妃芒角质基质单体主要有 6 种：芥油酸（25.69 μg/cm²）、硬脂酸（6.88 μg/cm²）、棕榈酸（5.35 μg/cm²）、亚油酸（2.75 μg/cm²）、亚麻酸（1.62 μg/cm²）和十一烷酸（0.80 μg/cm²）。金煌芒角质基质单体主要有 7 种：十六烷酸（0.53 μg/cm²）、硬脂酸（0.75 μg/cm²）、棕榈酸（5.25 μg/cm²）、亚油酸（2.45 μg/cm²）、亚麻酸（3.21 μg/cm²）、对苯二甲酸（37.05 μg/cm²）和芥油酸（17.47 μg/cm²）。Parsons 等[12]通过对 50 种胡椒进行角质层组分含量分析，发现不同基因型胡椒之间角质单体含量最高相差倍数能达到 16 倍。根据 Isaacson 等[27]的报道，番茄的角质基质在帮助机体抵御病原微生物的侵染方面有着重要作用。因此，本文推测金煌芒显著高于贵妃芒的角质基质含量在两者呈现的抗病性差异中也起到了重要作用。

3 结论

金煌芒和贵妃芒具有不同的抗病性，常温贮藏下金煌芒的病情指数显著低于贵妃芒。芒果蜡质在果实抵御炭疽病菌侵染过程中起到了非常重要的作用；体外实验显示蜡质在抑制炭疽病菌丝生长的作用有限，因此蜡质更多的起到物理屏障的作用。相比贵妃芒，SEM 显示金煌芒表层的蜡质更致密，因此能更好的起到屏障作用。金煌芒的外蜡和内蜡含量显著高于贵妃芒（其中前者的外蜡含量是后者的 3.42 倍），且金煌芒和贵妃芒蜡质的主要成分分别为醛类物质和醇类物质。金煌芒和贵妃芒内蜡中检测出萜类物质异松油烯和 *β*-瑟林烯。前人已验证角质层基质在果实抵抗病原微生物侵染方面具有重要作用[27]，本文发现金煌芒的角质层基质单体含量是贵妃芒的 1.55 倍。

参考文献

[1] 牛俊乐,麦馨允,黄斌,等.植物源保鲜剂在芒果采后抑菌保鲜上的研究进展[J].保鲜与加工,2024,24(5):112-117.

[2] 宋璐瑶,刘东红.芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析[J].现代食品科技,2021,37(11):231-238,230.

[3] 曾琼,刘德春,刘勇.植物角质层蜡质的化学组成研究综述[J].生态学报,2013,33(17):5133-5140.

[4] LARA I, BELGE B, GOULAO L F. A focus on the biosynthesis and composition of cuticle in fruits [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2015, 63(16): 4005-4009.

[5] VERAVERBEKE E A, LAMMERTYN J, SAEVELS S, et al. Changes in chemical wax composition of three different apple (*Malus domestica* Borkh.) cultivars during storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 23(3): 197-208.

[6] TSUBAKI S, OZAKI Y, YONEMORI K, AZUMA J. Mechanical properties of fruit-cuticular membranes isolated from 27 cultivars of *Diospyros kaki* Thunb [J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 2135-2139.

[7] 杨绿竹,王馨雨,王蓉蓉,等.柑橘果皮角质层及其对采后贮藏保鲜影响的研究进展[J].食品科学,2020,41(7):234-244.

[8] 刘港帅,李泓利,田慧琴,等.果实角质层研究进展[J].中国食品学报,2021,21(9):374-385.

[9] 杨利艳,郭晓娣,张玉荣,等.外源乙烯利对禾谷炭疽菌生物学特性的影响及转BtACO基因植物的抗病性评价[J].中国农业大学学报,2022,27(3):33-40.

[10] 郑小林,田世平,李博强,等.草酸对冷藏期间桃果实抗氧化系统和PPO活性的影响[J].园艺学报,2005,5:23-27.

[11] RUSSIN J S, GUO B Z, TUBAJIKA K M, et al. Comparison of kernel wax from corn genotypes resistant or susceptible to *Aspergillus flavus*. Biochem [J]. Cell Biology, 1997, 87: 529-553.

[12] PARSONS E P, POPOPVSKY S, LOHREY G T, et al. Fruit cuticle lipid composition and water loss in a diverse collection of pepper (*Capsicum*) [J]. Physiologia Plantarum, 2013, 149(2): 160-174.

[13] LIU D, YANG L, ZHENG Q, et al. Analysis of cuticular wax constituents and genes that contribute to the formation of 'glossy Newhall', a spontaneous bud mutant from the wild-type 'Newhall' navel orange [J]. Plant Molecular Biology, 2015, 88: 573-590.

[14] WANG J, HAO H, LIU R, et al. Comparative analysis of surface wax in mature fruits between Satsuma mandarin (*Citrus unshiu*) and 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis*) from the perspective of crystal morphology, chemical composition and key gene expression [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 177-185.

[15] WANG J, SUN L, XIE L, et al. Regulation of cuticle formation during fruit development and ripening in'Newhall'navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck) revealed by transcriptomic and metabolomic profiling [J]. Plant Science, 2016, 243: 131-144.

[16] 宁平,郭堂勋,李其利,等.广西芒果品种抗炭疽病评价及采后药剂防治研究[J].广西植保,2022,35(3):1-4.

[17] 王晶,潘翠萍,袁怀瑜,等.芒果采后主要真菌性病害及防治方法研究进展[J].保鲜与加工,2024,24(5):124-130.

[18] 常金梅,张鲁斌,柳凤,等.芒果果实抗病性差异及其与果皮结构相关性初探[J].热带作物学报, 2012,33(11):2040-2043.

[19] YIN Y, BI Y, CHEN S, et al. Chemical composition and antifungal activity of cuticular wax isolated from Asian pear fruit (cv. Pingguoli) [J]. Scientia Horticulture, 2011, 129(4): 577-582.

[20] 李大军,张旭.树蜡对鸡蛋抑菌保鲜作用研究[J].食品研究与开发,2015,36(9):119-122.

[21] 高德禄.杧果果实的扫描电镜观察[J].西北植物学报,1994,14(4): 263-266.

[22] 林河通,陈绍军,席玙芳,等.龙眼果皮微细结构的扫描电镜观察及其与果实耐贮性的关系[J].农业工程学报,2002,18(3):95-99.

[23] LEIDE J, HILDEBRANDT U, REUSSING K, et al. The developmental pattern of tomato fruit wax accumulation and its impact on cuticular transpiration barrier properties: effects of a deficiency in a β-ketoacyl-coenzyme A synthase (LeCER6) [J]. Plant Physiology, 2007, 144(3): 1667-1679.

[24] BELDING R D, SUTTON T B, BLANKENSHIP S M, et al. Relationship between apple fruit epicuticular wax and growth of Peltaster fructicola and Leptodontidium elatius, two fungi that cause sooty blotch disease [J]. Plant Disease, 2000, 84(7): 767-772.

[25] 张静,丁胜华,谢秋涛,等.温州蜜柑和冰糖橙果实表面角质层组分及微观结构差异分析[J].食品科学,2018,39(7):131-138.

[26] LIU P, LUO L, GUO J H, et al. Farnesol induces apoptosis and oxidative stress in the fungal pathogen *Penicillium expansum* [J]. Mycologia, 2010, 102(2): 311-318.

[27] ISAACSON T, KOSMA D K, MATAS A J, et al. Cutin deficiency in the tomato fruit cuticle consistently affects resistance to microbial infection and biomechanical properties, but not transpirational water loss [J]. Plant Journal, 2009, 60(2): 363-377.