



不同灰霉病抗性苹果果实中酚类物质代谢特征

唐永萍,石亚莉,贺军花,马利菁,周会玲*

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西杨陵 712100)

摘要:以‘秦冠’、‘富士’、‘金冠’苹果果实为材料,通过对损伤接种灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea* Pers)后果肉组织酚类代谢主要产物和相关酶活性变化的分析测定,揭示苹果采后酚类物质代谢与灰霉病抗性的关系,为苹果灰霉病抗性鉴定和筛选抗灰霉病苹果资源提供理论指导。结果表明:(1)接种灰葡萄孢菌后,3个苹果品种的果实灰霉病发病率和病斑直径大小均为‘秦冠’<‘富士’<‘金冠’,而且3个品种间的发病率和病斑直径均差异显著,各品种对灰霉病的抗性由强到弱依次为‘秦冠’>‘富士’>‘金冠’。(2)抗病品种‘秦冠’果肉组织中类黄酮、木质素含量及苯丙氨酸解氨酶(PAL)、过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)活性均显著高于感病品种‘富士’和‘金冠’,但总酚含量为‘秦冠’<‘金冠’<‘富士’,且3品种间总酚含量差异显著。研究表明,抗病苹果品种通过调节果肉内酚类物质代谢,增强次生代谢能力,其中类黄酮和木质素含量的增加强化了果实的抗性反应,进而提高对灰霉病的抗性,但总酚含量与植物抗病性关系不大。

关键词:苹果;品种;灰霉病;酚类代谢;抗性

中图分类号:Q945.78; S661.1; 文献标志码:A

Phenolic Metabolism of Apple Fruit with Different Grey Mold Disease Resistance

TANG Yongping, SHI Yали, HE Junhua, MA Lijing, ZHOU Huiling*

(College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Using ‘Qinguan’、‘Fuji’、‘Golden delicious’ as apple materials to analysis the changes of phenolic content and relevant enzyme activities of pulp by inoculation with *Botrytis cinerea* Pers. The results provide a physiological theoretical basis for apple gray mold resistance. The results indicated that: (1) the size of disease incidence and lesion diameter in three apple varieties after the inoculation were ‘Qinguan’ < ‘Fuji’ < ‘Golden delicious’ ($P < 0.05$), so all varieties of grey mold disease resistance were ‘Qinguan’ > ‘Fuji’ > ‘Golden delicious’. (2) The phenylalanine ammonialyase (PAL), peroxidase (POD), poly phenol oxidase (PPO) activites in the pulp of resistant variety were higher than that in susceptible variety, and the contents of flavonoids and lignin were also higher significantly ($P < 0.05$). Besides, the content of total phenolic compounds were ‘Qinguan’ < ‘Golden delicious’ < ‘Fuji’. In conclusion, resistant variety improved secondary metabolism by regulating phenolic metabolism to improve disease resistance in grey mold. The increasing content of flavonoids and lignin strengthened grey mold disease resistance of apple, but the total phenols content has little relation with the disease resistance.

Key words: apple; varieties; gray mold; phenolic metabolism; resistance

收稿日期:2016-11-28;修改稿收到日期:2017-03-15

基金项目:国家现代苹果产业技术体系建设专项(nycylx-08-05-02)

作者简介:唐永萍(1991-),女,硕士,主要从事园艺产品采后生理及贮藏保鲜研究。E-mail:1540031309@qq.com

*通信作者:周会玲,博士,副教授,主要从事园艺产品采后处理及贮藏保鲜研究。E-mail:zhouhuiling@nwsuf.edu.cn

苹果酸甜适口,营养丰富,无论是生食或加工制成的各种产品,都深受人们的喜爱^[1]。但由于果皮薄弱,其在采收、贮藏、包装以及后期加工的一系列过程中很容易受到机械损伤,为病原菌侵染创造了便利条件,最终导致腐烂变质,给生产者和消费者带来巨大损失^[2]。苹果采后腐烂多是由真菌引起^[3],病原菌可从花期潜伏到采收后发病,或直接从果实表面的伤口入侵,危害果实。灰霉病即是这些常见的真菌性病害之一^[4-5],其致病菌灰葡萄孢(*Botrytis cinerea* Pers)具有很强的耐低温能力,即使在冷藏条件下也可导致苹果腐烂,且果实一旦发病,病斑很快扩及全果,而且还会造成接触性传染,危及更多果实,造成严重损失。目前生产上多使用保鲜剂、防腐剂、植物提取物等延长苹果贮藏期。保鲜剂、防腐剂的使用大多对人体健康及环境的带来不良影响,已经不适合现代人们对食品安全和环保的要求;植物提取物虽然较为安全,但是由于受到自然资源和提取工艺的限制,成本较高^[1]。因此,增强植物自身的抗病性是防治植物病害最根本最有效的途径。

次生代谢在植物抵御病害方面发挥着重要的作用。酚类物质代谢作为一种重要的次生代谢表现形式,与植物的抗病性存在着密切的关系^[6-7]。植物受到病原物侵染时,主要通过苯丙烷类代谢途径合成酚类物质,然后转化成木质素、类黄酮、醌类、植保素等抗菌物质^[8]。过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)和苯丙氨酸解氨酶(PAL)是苯丙烷代谢途径中三种重要的酶,而PAL是苯丙烷类代谢途径的关键酶与限速酶,它催化苯丙氨酸转化为肉桂酸,产生许多次生产物,如木质素、酚类、香豆素、黄酮和花色苷;PPO和POD参与植物体内酚类物质氧化产生醌类及木质素、植保素等抗性物质的合成,以杀死和抑制病原菌的繁殖而起到抗病作用^[9]。目前,国内对苹果酚类物质研究主要集中在提取、抗氧化性测定、总酚含量的测定等方面,而对其抑菌作用的研究鲜有报道,尤其是对苹果感病部位酚类物质代谢与抗灰霉病的关系未见报道。为此,本研究通过对‘秦冠’、‘富士’、‘金冠’3个品种苹果采后灰霉病抗性进行比较,分析感病过程中酚类代谢相关产物及酶活性变化,探讨苹果灰霉病抗性与酚类物质代谢的关系,为苹果灰霉病抗性鉴定提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验用灰葡萄孢(*Botrytis cinerea* Pers)由西北

农林科技大学植物保护学院提供。将菌种在PDA培养基上进行继代培养,23℃下恒温避光培养7 d后,用体积分数为0.05%Tween80的无菌水冲洗培养皿,将菌落上的分生孢子冲洗下来,采用血球计数板制成浓度约为1×10⁶个/mL的孢子悬浮液。参试的‘秦冠’、‘富士’、‘金冠’苹果果实采自西北农林科技大学白水实验站。挑选果形端正,大小、色泽基本一致,无机械损伤、无自然病虫害的果实,采摘当天运回实验室,放置24 h散去田间热待用。

实验仪器包括BCD-236DT型冰箱(青岛海尔股份有限公司)、AUY220分析天平(日本岛津公司)、SW-CJ-LB型无菌操作台(苏净集团安泰公司)、3K15型高速冷冻离心机(美国Sigma公司)、HHS21-4电热恒温水浴锅(北京长安科学仪器厂)、UV-1800紫外-可见分光光度计(科大中佳公司)和KQ-500DB数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)。实验试剂葡萄糖、琼脂、无水乙醇、愈创木酚、十二水合磷酸氢二钠、二水合磷酸二氢钠、β-巯基乙醇、L-苯丙氨酸、葡萄糖、30%过氧化氢、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、EDTA-Na₂、邻苯二甲酸氢钾、硼砂、无水醋酸钠、TritoX-100、浓盐酸、冰醋酸、硼酸均为国产分析纯。

1.2 试验处理及取样

接种前先用70%乙醇轻轻擦拭苹果表面,对果皮进行消毒。然后在每个苹果的赤道部位阴阳两面用无菌不锈钢钉(Φ=3 mm)扎两个均匀、大小一致的伤口(3×3 mm)。待伤口处汁液晾干后,分别接种20 μL 1×10⁶个/mL灰葡萄孢子悬浮液。晾干后,放入PVC保鲜袋(用70%乙醇擦拭消毒),常温(16±1)℃下平铺在实验台上。固定50个果实,重复3次,每天统计发病率并测量病斑直径,用于研究品种间灰霉病抗性差异,其余果实于接种后0、1、2、3、4、5、6、7 d分别取病斑周围1 cm范围内健康果肉组织,用液氮研磨仪研成粉末后锡箔纸包裹,于-80℃保存,用于测定酚类代谢主要产物和相关酶活性,每次取15个果混匀备用。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 发病率和病斑直径 发病率为发病伤口数占总接种伤口数的百分比,以病斑直径>3.5 mm确定为发病。病斑直径利用游标卡尺进行十字交叉法测定,取平均值。

1.3.2 总酚和类黄酮含量 称取果肉样品1.0 g左右,加入预冷体积分数为1%盐酸-甲醇溶液5 mL,冰浴下研磨呈匀浆,在4℃条件下提取1 h后,

于4℃、12 000×g 离心30 min。取上清液分别在280 nm 和325 nm 波长下测定总酚、类黄酮的吸光度值。分别参考 Toor 等^[10] 和 González-Aguila 等^[11]方法测定,以没食子酸、芦丁制作标准曲线,分别计算总酚和类黄酮的含量。

1.3.3 木质素含量 参考周会玲等^[12]方法,木质素含量以每克鲜重果肉在280 nm 处的吸光度值表示。

1.3.4 苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性 参考曹建康^[13]方法测定,略有改动。称取1.0 g 左右果肉,加入5 mL、0.1 mol/L、pH 8.8 的硼酸缓冲液(含40 g/L 聚乙烯吡咯烷酮、2 mmol/L 乙二胺四乙酸和5 mmol/L β -巯基乙醇),冰浴条件下研磨成匀浆,于4℃、12 000×g 离心30 min,取上清液作为酶提取液用于活性测定。取2支试管,分别加入3 mL 50 mmol/L、pH 8.8 的硼酸缓冲液和0.5 mL 酶提取液,一支试管加入0.5 mL 20 mmol/L L-苯丙氨酸,另一支加入0.5 mL 蒸馏水作为对照。将2支试管于37℃温水中保温60 min,使生成反式肉桂酸,反应结束时均立即加入0.1 mL 6 mol/L 盐酸以终止反应。290 nm 波长下测定反应管和对照管的吸光度值,以每小时酶促反应体系吸光度值增加1作为一个酶活性单位,结果以U/g 表示,重复3次。

1.3.5 过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性 PPO 活性测定采用邻苯二酚法,PPO 酶活力($U \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)= $\Delta OD/t$, ΔOD 代表光吸收度的变化,t 代表反应时间(min),重复3次。POD 活性

测定采用愈创木酚法,重复3次。

1.4 数据处理

数据应用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析,并采用邓肯氏多重比较法进行差异显著性检验,作图采用 Excel 软件。

2 结果与分析

2.1 3个苹果品种采后果实灰霉病抗性比较

接种灰葡萄孢子后,3个品种苹果果实灰霉病发病率和病斑直径均随着接种时间逐渐增加,但品种间存在明显差异。其中,‘秦冠’发病率显著低于‘富士’和‘金冠’($P<0.05$),如接种后第2天,‘金冠’发病率已达到100%,而‘秦冠’发病率仅为8.2%,接种第4天,‘富士’发病率也达到100%,但‘秦冠’发病率仍然不足72%(图1,A);与发病率表现相似,‘秦冠’果实感病后,病斑直径扩展较慢,显著小于同期‘富士’和‘金冠’果实($P<0.05$);而‘富士’果实病斑直径又显著低于‘金冠’($P<0.05$),接种5 d后,‘富士’果实病斑直径增加较快(图1,B)。因此认为3个苹果品种灰霉病抗病性由强到弱依次为‘秦冠’、‘富士’、‘金冠’。

2.2 苹果抗灰霉病反应过程中总酚和类黄酮含量的变化特征

酚类物质普遍存在于植物体中,是体内重要的次生代谢产物。从图2,A 可以看出,3个苹果品种果实的总酚含量差异很大,并以‘富士’总酚含量最高,‘金冠’居中,‘秦冠’的总酚含量最低。不同品种

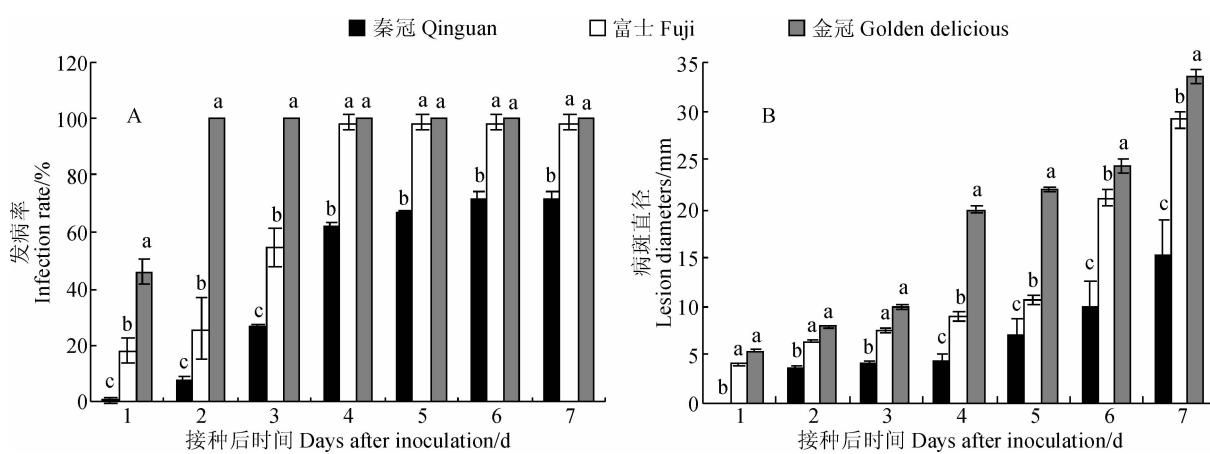


图1 不同苹果品种接种灰葡萄孢子后常温(16 ± 1)℃下发病率和病斑直径变化

Different normal letters within the same time point indicate significant difference among varieties at 0.05 level; the same as below

Fig. 1 The infection rate and diameter of disease spot of different apple germplasms inoculated with *B. cinerea* at normal temperature (16 ± 1)℃

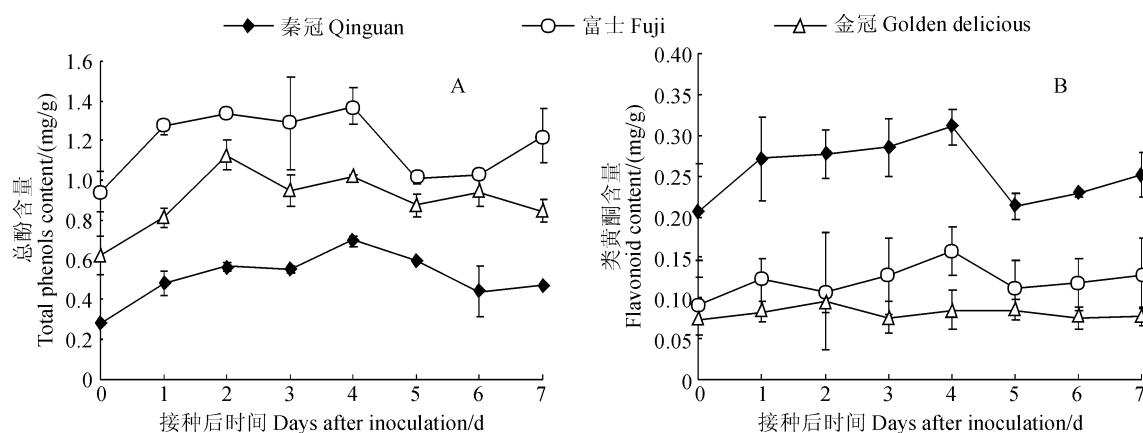


图 2 不同苹果品种果实接种灰葡萄孢后在常温(16±1) °C条件下的总酚和类黄酮含量

Fig. 2 The contents of total phenols and flavonoid of different apple germplasms inoculated with *B. cinerea* at normal temperature (16±1) °C

果实接种灰葡萄孢子后,果实总酚含量均随接种时间的延续呈现先上升后下降趋势,其中‘金冠’的总酚含量在接种 2 d 后达到最大值,而‘秦冠’和‘富士’的总酚含量均在接种 4 d 后达到最大值,且在整个过程中‘富士’的总酚含量始终显著高于‘金冠’和‘秦冠’($P<0.05$),且‘金冠’总酚含量又显著高于‘秦冠’。另外,3 个苹果品种果实类黄酮含量也明显不同(图 2,B),其中‘秦冠’的类黄酮含量最高,接种后始终显著高于‘富士’和‘金冠’($P<0.05$),‘金冠’的类黄酮含量最低,但与‘富士’差异显著;接种灰葡萄孢子后,‘秦冠’和‘富士’类黄酮含量呈现上升趋势,并均于接种 4 d 后达到最大值,而‘金冠’类黄酮含量在接种灰葡萄孢后变化不明显,始终维持在较低水平。以上结果说明类黄酮含量增加强化果实的抗性反应,而总酚含量与植物抗病性关系不大。

2.3 苹果抗灰霉病反应中木质素含量的变化特征

木质素作为植物体内一种重要的物理抗菌物质,它与 HRDP(富含羟脯氨酸糖蛋白)一起作为一道屏障,强固细胞壁、保护细胞免受病原菌侵害,增强植物对于病害的抗性。如图 3 所示,接种 *B. cinerea* 后,在整个灰霉病抗性反应中,秦冠和富士的木质素含量显著高于金冠($P<0.05$),而秦冠均显著高于富士($P<0.05$)。金冠木质素含量增加较小,且于第 3 天开始明显降低,而富士的木质素含量变化较小,于接种第 5 天达到最大值,然后缓慢降低,而秦冠的木质素含量变化较大,分别于第 2 天和第 5 天出现 2 个高峰。以上结果说明接种 *B. cinerea* 后不同苹果品种间木质素的积累量存在着差异,并与品种的抗病性呈正相关。

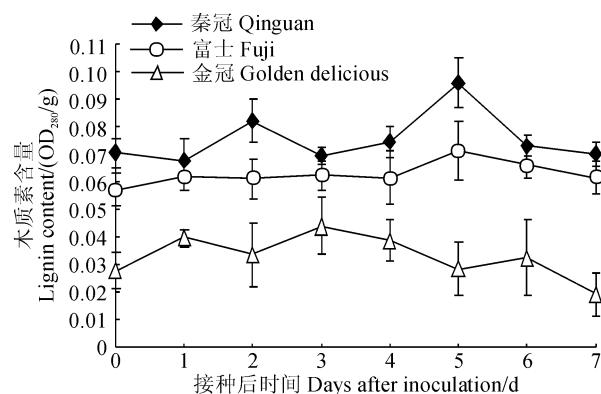


图 3 不同苹果品种接种灰葡萄孢后在常温(16±1) °C条件下果实木质素的含量

Fig. 3 The content of lignin of different apple germplasms inoculated with *B. cinerea* at normal temperature (16±1) °C

2.4 苹果抗灰霉病反应中苯丙烷代谢途径关键酶活性变化的特征

苯丙氨酸解氨酶(PAL)是植物在抗病反应时酚类代谢中莽草酸途径的关键酶和限速酶,其对于木质素、植保素和酚类物质的合成积累都起着至关重要的作用。过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)是酚类物质氧化的主要酶,参与植物体内酚类物质氧化产生醌类和参与木质素、植保素等抗性物质的合成,以杀死和抑制病原菌的繁殖而起到抗病作用。

首先,不同苹果品种果实 PAL 活性在接菌后表现不尽相同(图 4,A)。其中,‘秦冠’果实 PAL 活性在各品种中最高,且接菌后迅速升高,并于 3 d 后达到高峰,之后快速下降,但始终显著高于‘富士’和‘金冠’($P<0.05$)。‘富士’和‘金冠’果实 PAL 活性初始值相同,但接菌后‘富士’果实 PAL 活性有所

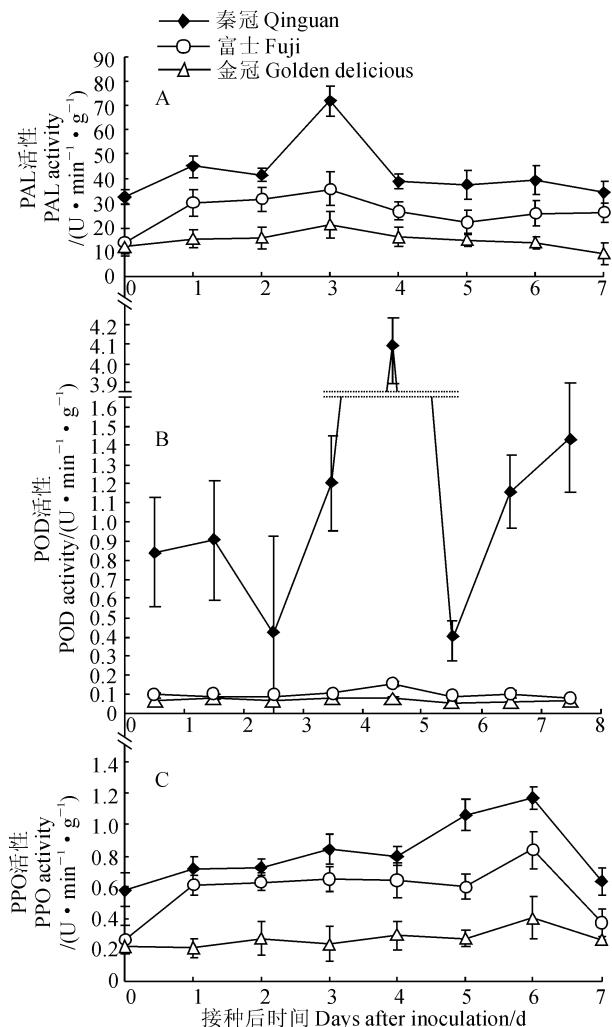


图4 不同品种接种灰葡萄孢后在常温(16 ± 1)℃条件下苹果果实PAL、POD和PPO活性

Fig. 4 The activities of PAL, POD and PPO of different apple germplasms inoculated with *B. cinerea* at normal temperature (16 ± 1) °C

升高,又在3 d后开始缓慢降低,而‘金冠’果实PAL活性接菌后变化不大,且于接种3 d后快速降低。在整个试验过程中,苹果果实PAL活性始终表现为‘秦冠’>‘富士’>‘金冠’,且同期三者之间差异显著($P<0.05$)。其次,3个苹果品种果实POD活性随接种时间的延续均呈现先升后降趋势,但‘秦冠’的POD活性在整个时期均显著高于‘富士’和‘金冠’($P<0.05$)。其中,‘秦冠’苹果POD活性在接种前3 d变化较小,但3 d后迅速升高,并于第4天达到最大值,而后快速下降,但其始终高于同期‘富士’和‘金冠’;接种后‘富士’果实的POD活性也显著高于同期‘金冠’($P<0.05$),且于接种4 d时达到最大值,然后迅速下降;‘金冠’果实POD活性在接种后变化不大,始终表现最低(图4,B)。另外,3

个苹果品种果实的PPO活性在整个过程中始终表现为‘秦冠’PPO活性最高,且与‘富士’和‘金冠’差异显著($P<0.05$);随着接种时间延长,3个品种果实PPO活性均呈现上升趋势,均于第6天达到高峰,并以‘秦冠’的增加幅度最大,‘富士’次之,而‘金冠’接菌后PPO活性增加较慢,且与‘秦冠’和‘富士’差异显著(图4,C)。以上结果说明抗病苹果品种果实的PAL、POD、PPO活性在受到 *B. cinerea* 后显著高于感病品种,且POD活性差异最大。

3 讨论

发病率和病斑直径的大小是抗病性评价的重要指标,抗病性材料表现为发病率低、病斑小^[14]。在本试验中,3个苹果品种果实接种灰葡萄孢后常温(16 ± 1)℃下的发病率和病斑直径均以秦冠最小,并显著小于‘富士’和‘金冠’($P<0.05$),而‘富士’的发病率和病斑直径又始终小于‘金冠’的,因此认为3个品种对灰霉病抗性由强到弱依次为‘秦冠’、‘富士’、‘金冠’。

在植物防御反应的次生代谢中,酚类物质代谢是重要的代谢途径之一,它可形成包括植保素、木质素和酚类化合物等在内的次生抗病物质,参与果实的防御反应。Cao等^[15]研究发现,采后杏果实中总酚、类黄酮含量的增加减轻了杏的腐烂率。Matern和Kneusal^[16]研究认为,植物防御病原物侵染的第一步反应就是诱导产生酚类化合物。Dicko等^[17]在研究高粱抗性时指出,在抗病和感病品种间总酚含量并没有显著的差别,认为总酚含量并不能作为判定植物抗病性的生理指标,而与诱导生成的酚含量具有相关性。本试验结果表明,受到灰霉病菌侵染后,‘秦冠’、‘富士’、‘金冠’果实的总酚含量较接菌前都有所增加,且‘富士’接菌后诱导生成的总酚含量高于‘金冠’,但‘秦冠’经接菌诱导生成的总酚含量却低于‘富士’和‘金冠’,可能是不同品种苹果果肉酚类物质组成和含量存在基因型差异^[18],而不同的酚类组分的抗病性又存在一定差异所致。李丽梅等^[19]研究认为,绿原酸和表儿茶素对DPPH自由基、羟自由基清除能力较熊果苷强,且王思新等^[20]研究指出‘秦冠’苹果果肉的绿原酸含量高于‘富士’和‘金冠’,因此,含绿原酸丰富的‘秦冠’具有较强的抗性。本实验同时发现,3个苹果品种果实类黄酮、木质素含量明显不同,其中‘秦冠’的黄酮和木质素含量显著高于‘富士’和‘金冠’,而‘富士’又显著高于‘金冠’($P<0.05$),且‘秦冠’、‘富士’和‘金冠’果

实类黄酮和木质素含量与它们的抗病性呈正相关,这与乔宝营等^[21]对葡萄霜霉病抗性和檀根甲等^[22]对苹果采后炭疽病抗性的研究结果一致。另外,本研究发现不同苹果品种果实木素的含量增加时间较总酚和类黄酮晚1 d,这与酚类物质是木质素合成的前体物质密切相关,贮藏果实中酚类物质在PPO、POD的作用下向木质素转化。在苹果灰霉病抗性反应中,次生代谢物质水平升高后增强了果实的防御体系,从而提高了果实的抗病性。

植物体内绝大多数酚类物质合成是通过苯丙烷类代谢途径完成,PAL、POD和PPO是苯丙烷类代谢途径的3种重要的酶^[23]。PAL是苯丙烷类代谢途径的关键酶与限速酶,参与酚类、类黄酮类、植保素、木质素以及其他抵抗病原菌入侵有关的抑菌生物合成,对致病菌进行直接毒杀。PPO和POD是此代谢途径的末端酶,参与植物体内酚类物质氧化成醌类和木质素的合成,以杀死和抑制病原菌的繁殖而起到抗病作用。本实验研究发现,接种灰葡萄孢子后,抗病苹果品种果实的PAL、POD、PPO活性显著高于感病品种,这与陈年来等^[24]在甜瓜上的研究结果相一致;而且,接种后PAL活性峰值出现早于PPO、POD,这说明PAL是苯丙烷类代谢途径的先端酶,参与酚类、类黄酮类、植保素以及其他抵抗

病原菌入侵有关的抑菌生物合成。但3个品种果肉中的POD活性差异最大,‘秦冠’的POD活性变化平均值约是‘富士’和‘金冠’的50倍。由于POD活性增加加强了植物体内的醌类和木质素、植保素等抗性物质的合成和积累;且POD还是寄主植物细胞内抵御活性氧伤害的一种主要保护酶类,在清除活性氧、阻止活性氧的形成等方面起着重要作用^[25]。同时,‘秦冠’的POD活性在接种后第4天出现大幅度的上升,从发病情况来看,‘秦冠’苹果在接种第4天时发病最为严重,发病率达到71.9%,而其在接种第3天时发病率仅为26.8%。因此认为苹果果肉中POD活性越高,对灰霉病抗性越强,这与于茂兰^[26]等在带叶荔枝褐变上的研究结果相一致。

综上所述,本试验中3个苹果品种对灰霉病抗性由强到弱依次为‘秦冠’、‘富士’和‘金冠’,而‘秦冠’果肉中PAL、POD、PPO活性以及类黄酮、木质素含量均高于‘富士’和‘金冠’,说明抗病品种在感染灰霉病后,通过调节苹果果肉组织中PAL、POD和PPO3种防御酶活性,以提高果肉中类黄酮、木质素含量,从而提高苹果抗灰霉病的能力。但是,‘秦冠’果实的总酚含量却低于‘富士’和‘金冠’,因此酚类物质组分及含量与灰霉病抗性关系有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 田 蓉,周会玲,张晓晓,等.不同体积分数CO₂充气包装对冷藏红富士苹果保鲜效果的影响[J].食品科学,2015,36(2):232-237.
- [2] TIAN R, ZHOU H L, ZHANG X X, et al. Effect of inflatable packaging at different CO₂ concentrations on the postharvest quality of red fuji apple[J]. *Food Science*, 2015, 36(2): 232-237.
- [3] RAMOS B, MILER F A, BRANDAO T R S, et al. Fresh fruits and vegetables—an overview on applied methodologies to improve its quality and safety[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20(1): 1-15.
- [4] XU L F, DU Y M. Effects of yeast antagonist in combination with UV-C treatment on postharvest disease of pear fruit[J]. *BioControl*, 2012, 57(3): 451-461.
- [5] 袁仲玉,周会玲,田 蓉,等.芦荟粗提物对苹果采后灰霉病的防治效果与机理[J].农业工程学报,2014,4(30):255-163.
- [6] YUAN Z Y, ZHOU H L, TIAN R, et al. Effects and mechanism of aloe vera extracts on control of *botrytis* in postharvest apples[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 255-263.
- [7] TANG W, DING Z, ZHOU Z Q, et al. Phylogenetic and pathogenic analyses show that the causal agent of apple ring rot is *botryosphaeria dothidea* [J]. *Plant Disease*, 2012, 96: 486-496.
- [8] VALENTINES M C, VILAPIANA R, TORRES R, et al. Specific roles of enzymatic browning and lignification in apple disease resistance[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 36(3): 227-234.
- [9] 陈年来,胡 敏,乔昌萍,等.BTH、SA和SiO₂处理对甜瓜幼苗白粉病抗性及叶片HRGP和木质素含量的影响[J].中国农业科学,2010,43(3): 535-541.
- [10] CHEN N L, HU M, QIAO C P, et al. Effects of BTH, SA, and SiO₂ treatment on disease resistance and leaf HRGP and lignin contents of melon seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 535-541.
- [11] GOGOI R, SINGH D V, SRIVASTAVA K D. Phenols as a biochemical basis of resistance in wheat against Karnal bunt [J]. *Plant Pathology*, 2001, 50(4): 470-476.
- [12] 周晓婉,唐永萍,石亚莉,等.1-MCP对低温贮藏苹果灰霉病

- 抗性的诱导作用[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 254-260.
- ZHOU X W, TANG Y P, SHI Y L, et al. Mechanism of 1-MCP treatment in induced resistance to Gray Mold of apples during low-temperature storage[J]. *Food Science*, 2016, 37(12): 254-260.
- [10] TOOR R K, SAVAGE G P. Antioxidant activity in different fractions of tomatoes [J]. *Food Research International*, 2005, 38(5): 487-494.
- [11] GONZALEZ-AGUILAR G A, VILLEGAS-OCHOA M A, MARTINEZ-TELLEZ M A, et al. Improving antioxidant capacity of fresh-cut mangoes treated with UV-C[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(3): S197-S202.
- [12] 周会玲, 袁仲玉, 吴主莲, 等. 壳聚糖涂膜对机械伤苹果抗性生理特征的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(7): 1415-1420.
- ZHUO H L, YUAN Z Y, WU Z L, et al. Effects of chitosan coating on resistance physiology of mechanical injuring apple fruit[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2013, 33(7): 1415-1420.
- [13] 姜微波, 曹健康, 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.
- [14] 张玉经, 王昆, 王忆, 等. 苹果种质资源果实轮纹病抗性的评价[J]. 园艺学报, 2010, 37(4): 539-546.
- ZHANG Y J, WANG K, WANG Y, et al. Evaluation of resistance to fruit ring rot for apple germplasms[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(4): 539-546.
- [15] CAO J K, ZHAO Y M, WANG M, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on apricot fruit quality, decay, and on physiological and biochemical metabolism during shelf-life following long-term cold storage[J]. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2009, 84(6): 672-676.
- [16] MATEM, KNEUSEL. Phenolic compounds in plant disease resistance[J]. *Phyto Parasitica*, 1988, 16(2): 153-170.
- [17] DICKO M H, GRUPPEN H, BARRO C, et al. Impact of phenolic compounds and related enzymes in sorghum varieties for resistance and susceptibility to biotic and abiotic stresses [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, 31(11): 2671-2688.
- [18] 乜兰春, 孙建设. 不同品种苹果果实主要酚类物质含量的研究[J]. 中国食品学报, 2005, 5(3): 118-121.
- NIE L C, SHUN J S. Study on the phenolic compound contents in apple of different cultivars[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2005, 5(3): 118-121.
- [19] 李丽梅, 赵哲, 何近刚, 等. 不同品种梨果实酚类物质和抗氧化性能分析[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 83-88.
- LI L M, ZHAO Z, HE J G, et al. Analysis of phenolic compounds and their antioxidant activity in fruits from different pear cultivars[J]. *Food Science*, 2014, 35(17): 83-88.
- [20] 王思新, 刘杰超, 焦中高, 等. 苹果中多酚物质及其在果实发育过程中的变化[J]. 果树学报, 2003, 20(6): 427-431.
- WANG S X, LIU J C, JIAO Z G, et al. Changes of polyphenols during fruit development in apple[J]. *Journal of Fruit Science*, 2003, 20(6): 427-431.
- [21] 乔宝营, 黄海帆, 刘崇怀, 等. 几种理化因素与葡萄霜霉病抗性的关系[J]. 果树学报, 2014, 31(5): 901-905.
- QIAO B Y, HUANG H F, LIU C H, et al. Research on the factors influencing grape resistance to downy mildew [J]. *Journal of Fruit Science*, 2014, 31(5): 901-905.
- [22] 檀根甲, 李增智, 薛莲. 苹果果实中几种生化物质的含量与抗采后炭疽病的关系[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(5): 857-860.
- TAN G J, LI Z Z, XUE L. Relationship between contents of some biochemical substance in apple (*Malus domestica* Borkh) fruits and their resistance to apple anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. et Sacc [J]. *Plant Physiology Communications*, 2007, 43(5): 857-860.
- [23] 葛永红, 李灿婴, 王毅, 等. 硅酸钠处理对杏果实活性氧和苯丙烷代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(13): 317-320, 326.
- GE Y H, LI C Y, WANG Y, et al. Effects of sodium silicate dipping on reactive oxygen species metabolism and phenylpropanoid pathway in apricot fruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(13): 317-320, 326.
- [24] 陈年来, 胡敏, 代春艳, 等. 诱抗处理对甜瓜叶片酚类物质代谢的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(11): 1759-1766.
- CHEN N L, HU M, DAIC C Y, et al. The effects of inducing treatments on phenolic metabolism of melon leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(11): 1759-1766.
- [25] MEHDY MC, SHARMA Y K, SATHASVAN K, et al. The role of activated oxygen species in plant disease resistance[J]. *Physiologia Plantarum*, 1996, 98(2): 365-374.
- [26] 于茂兰, 陈于陇, 徐玉娟, 等. 气调包装对带叶荔枝褐变及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 108-114.
- YU M L, CHEN Y L, XU Y J, et al. Effect of high oxygen atmospheric packaging on the browning and quality of litchi fruits with leaves[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(1): 108-114.

(编辑:裴阿卫)