

# 采后草酸处理对杏果实黑斑病的控制 及苯丙烷代谢的影响

马海娟, 张昱, 张亚琳, 石苗苗, 任玉琴, 芦玉佳, 张文娜, 朱璇\*  
(新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 为探究草酸对杏果实采后黑斑病的控制效果, 该试验以“赛买提”杏为试材, 采用 2、4、6 mmol/L 草酸对杏果实进行减压渗透处理, 晾干后, 置于温度和湿度为  $(1 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 、90%~95% 的条件下, 贮藏 48 h 后, 损伤接种交孢链格孢 (*Alternaria alternata*, *A. alternata*) 并在相同条件下贮藏。定期测定苯丙烷代谢相关指标, 孢子萌发率、菌落直径。损伤接种试验结果表明, 在第 49 天时, 与对照组相比, 4 mmol/L 草酸处理组接种发病率与病斑直径分别低了 16.94%、19.44%。4 mmol/L 草酸处理组的苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、4-香豆酸辅酶 A 连接酶 (4CL)、肉桂酸-4-羟化酶 (C4H) 活性是对照组的 1.06、1.04、1.07 倍, 有效促进了总酚、类黄酮、木质素含量的积累; 体外试验结果表明, 4 mmol/L 草酸对 *A. alternata* 孢子萌发和菌丝生长有明显抑制作用。结果表明草酸处理可通过诱导苯丙烷代谢途径来增强杏果实对黑斑病的抗性。

**关键词:** 草酸; 杏果实; 苯丙烷代谢; 采后病害

文章编号: 1673-9078(2023)06-79-85

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.0736

## Effects of Postharvest Oxalic Acid Treatments on Black Spot Disease and Phenylpropane Metabolism in Apricot Fruit

MA Haijuan, ZHANG Yu, ZHANG Yalin, SHI Miaomiao, REN Yuqin, LU Yujia, ZHANG Wenna, ZHU Xuan\*  
(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** The inhibitory effects of oxalic acid on postharvest black spot disease in apricot fruit were investigated by subjecting “Saimaiti” apricot fruit to pressure retarded osmosis using three different concentrations of oxalic acid (2, 4, and 6 mmol/L). Subsequently, the dried fruit were stored for 48 h at a temperature of  $(1 \pm 1.0)^\circ\text{C}$  and a humidity of 90%~95%. Next, damaged fruit were inoculated with *Alternaria alternata*, and were stored under the same conditions described above. Indices related to phenylpropane metabolism, including spore germination rate and colony diameter, were regularly measured. The inoculation test results demonstrated that, on the 49<sup>th</sup> day, the incidence rate and lesion diameter of the 4 mmol/L oxalic acid-treated inoculated fruit were 16.94% and 19.44% lower, respectively, than those of the control group. Meanwhile, the activities of phenylalanine ammonia-lyase, 4-coumaric acid coenzyme-A-ligase, and cinnamate-4-hydroxylase in the 4 mmol/L oxalic acid-treated inoculated fruit were 1.06, 1.04, and 1.07 times, respectively, those of the control group. These results indicate that oxalic acid can effectively enhance the accumulation of total phenols, flavonoids, and lignin. Briefly, the *in vitro* experiments demonstrate that 4 mmol/L oxalic acid has considerable inhibitory effects on spore germination and mycelial growth of *A. alternata*. Thus, the application of oxalic acid treatments can enhance the resistance of apricot fruit to black spot diseases through the phenylpropane metabolic pathway.

**Key words:** oxalic acid; apricot fruit; phenylpropane metabolism; postharvest diseases

引文格式:

马海娟,张昱,张亚琳,等.采后草酸处理对杏果实黑斑病的控制及苯丙烷代谢的影响[J].现代食品科技,2023,39(6):79-85.

MA Haijuan, ZHANG Yu, ZHANG Yalin, et al. Effects of postharvest oxalic acid treatments on black spot disease and phenylpropane metabolism in apricot fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 79-85.

收稿日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (31860462); 南京农业大学-新疆农业大学联合基金项目 (KYYJ201908)

作者简介: 马海娟 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: 1433735845@qq.com

通讯作者: 朱璇 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: 13999877961@126.com

杏 (*Prunus armeniaca* L.)，是新疆特色林果产业之一，其品质优，产量大，风味独特，营养丰富，深受广大消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。杏是典型的呼吸跃变型果实，在采后贮运过程中易受到病原微生物的侵染而发生果实腐烂现象，其中由 *A. alternata* 引起的黑斑病为杏果实主要病害之一，其发病率占总腐烂率的 93.2%，造成巨大经济损失<sup>[2,3]</sup>。化学杀菌剂是一种常用来控制果蔬采后病害的手段<sup>[4]</sup>，但长期使用，会引发病原菌株产生耐药性，同时果实上药物残留会对人体健康及环境造成危害<sup>[4]</sup>。因此迫切需要寻找一种安全、环保的果蔬病害控制方法<sup>[4]</sup>。近年来，一些非生物诱抗剂，如 CO、水杨酸、硝普钠、精氨酸、苯并噻重氮等的使用，为控制病原菌对果实的侵染，增强果实抗病性提供了新的思路<sup>[5-10]</sup>。

草酸是一种有机酸，其广泛分布于动植物和真菌体中<sup>[11]</sup>。许多研究表明草酸能提高石榴的抗冷性<sup>[12]</sup>，减缓荔枝褐变<sup>[13]</sup>，延缓苹果<sup>[14]</sup>的成熟进程，较好的保持芒果的贮藏品质<sup>[15]</sup>。此外也有研究表明，草酸具有直接抑制病原菌菌丝生长与孢子萌发的作用，例如芒果炭疽病菌，豆枯萎病病菌，甜瓜上的 *A. alternata*、半裸镰刀菌 (*Fusarium semitectum*, *F. semitectum*) 和粉红单端孢 (*Trichothecium roseum*, *T. roseum*)<sup>[16-18]</sup>；其还可作为一种诱发子，诱导桃<sup>[19]</sup>、梨<sup>[20]</sup>、甜瓜<sup>[16]</sup>等果实产生抗病性，从而有效的抑制果实采后病害发生。但关于采用草酸处理是否能增强杏果实对黑斑病抗性的研究尚未报道。因此，本试验采用草酸处理杏果实，从苯丙烷代谢角度出发，旨在研究草酸处理对采后杏果实黑斑病的控制效果，以期控制杏果实采后病害提供新的技术手段。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

本研究供试杏品种为“赛买提”，采收自新疆喀什英吉沙县，选取无病虫害、无机械损伤、色泽大小、成熟度 [可溶性固形物为 12%~13%、硬度为 (17.0±0.5) N] 相近的杏果实为试验果，当天运回冷库，于 4℃ 预冷 24 h。

交孢链格孢 (*A. alternata*) 由食品科学与药学院微生物实验室提供。

### 1.2 仪器与试剂

#### 1.2.1 试验试剂

马铃薯葡萄糖琼脂 (PDA) 培养基、马铃薯液体 (PDB) 培养基，天津市福晨化学试剂厂；辅酶 A

(CoA)，上海生物工程股份有限公司；三磷酸腺苷 (ATP)、对香豆酸、亮抑酶肽 (Leupeptin)、苯甲基磺酰氟 (PMSF)、L-苯丙氨酸、反式肉桂酸，北京索莱宝科技有限公司；以上试剂均为分析纯。

#### 1.2.2 试验仪器

TG16G 智能高速冷冻离心机，湖南北弘仪器有限公司；手提式压力蒸汽灭菌锅，杭州科米瑞仪器设备有限公司；752G 型紫外可见分光光度计，恒泰实验仪器有限公司；HR-C-3Y 洁净工作台，济南欧莱博技术有限公司。

### 1.3 *A. alternata* 体外抑菌试验

*A. alternata* 孢子萌发率和菌落直径的测定参照 Yao 等<sup>[21]</sup>方法略作改进，配制含草酸 0、2、4、6、8 mmol/L 的 PDA 培养基。将 6 mm *A. alternata* 菌饼置于培养基中，28℃ 培养，在第 3、5、7 天，用十字交叉方法测定菌落直径。参照王迪等<sup>[22]</sup>方法略作改进，制备含草酸 0、2、4、6、8 mmol/L 的 PDB 培养基。将配置好的孢子悬浮液 (每毫升  $1 \times 10^6$  个孢子) 置于 PDB 培养基中，于 28℃ 培养，连续数小时镜检，直至对照组完全萌发，每次镜检 100 个孢子，每个处理组重复 3 次。

### 1.4 处理方法

#### 1.4.1 原料处理与分组

杏果实置于 2、4、6 mmol/L 草酸溶液中，0.05 MPa 减压渗透处理 2 min，然后在常压下浸泡 6 min 作为处理组，以蒸馏水处理的杏果实作为对照组。每一组都进行 3 次，每一次 3 kg 果实。晾干后放入冷库中贮藏 48 h 后损伤接菌，温度为 (1±1.0)℃，相对湿度为 90%~95%。

#### 1.4.2 损伤接种

参照石玲等<sup>[23]</sup>的方法并稍作修改。

### 1.5 指标测定

#### 1.5.1 接种发病率及病斑直径的测定

贮藏期间定期计数各个组发生病害的杏果实发病孔数 (病斑直径大于 2.5 mm 记为发病孔数)，计算发病率公式如下：

$$A = \frac{n}{n_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

A——发病率，%；

n——发病孔数；

$n_0$ ——总孔数。

病斑直径的测定:用十字交叉法,每7 d测一次杏果实病斑直径,每组20个杏果实,重复3次,取其平均值,以mm为单位。

### 1.5.2 PAL、C4H、4CL活性的测定

PAL活性的测定:按照曹建康等<sup>[24]</sup>方法略加更改,OD值以每小时变动0.01为1个酶活力单位(U),以U/g为单位。

C4H活性的测定:按照范存斐等<sup>[25]</sup>方法略加更改,OD值以每分钟变化0.01为1个酶活力单位(U),以U/g为单位。

4CL活性的测定:按照范存斐等<sup>[25]</sup>方法略加更改,OD值以每分钟变化0.1为1个酶活力单位(U),以U/g为单位。

### 1.5.3 总酚和类黄酮的测定

参照曹建康等<sup>[24]</sup>的方法,以OD<sub>280</sub>/g来表示总酚含量;以OD<sub>325</sub>/g来表示类黄酮物质含量。

### 1.5.4 木质素的测定

按照范存斐等<sup>[25]</sup>的方法略加更改,在波长280 nm处测定样品OD值,用OD<sub>280</sub>/g来表示木质素的含量。

## 1.6 数据分析

使用SPSS 22.0软件对数据进行方差分析,采用

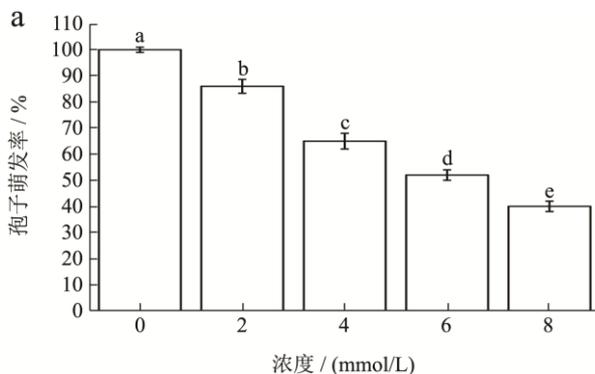


图1 草酸对 *A. alternata* 孢子萌发 (a) 及菌落直径 (b) 的影响

Fig.1 Effect of oxalic acid on spore germination (a) and colony diameter (b) of *A. alternata*

注:不同小写字母表示显著性差异, ( $P < 0.05$ ); 下同。

## 2.2 草酸处理对杏果实损伤接种 *A. alternata*

### 发病率及病斑直径的影响

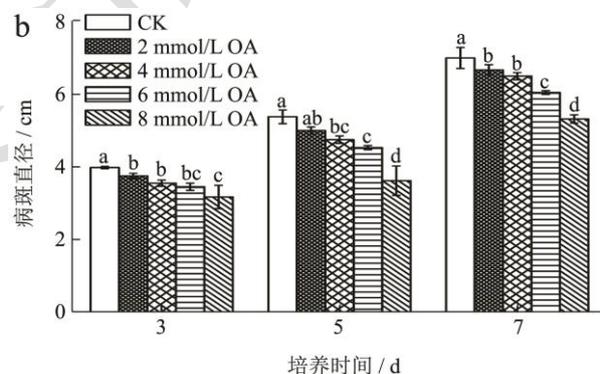
杏果实采后易受 *A. alternata* 侵染,使其发病率增加<sup>[3]</sup>。草酸作为一种诱抗剂能显著抑制果实病害的发生,保持其贮藏品质<sup>[11]</sup>。在贮藏期间,杏果实接种发病率(图2a)呈递增趋势。在贮藏第28天时,4 mmol/L草酸处理组杏果实接种发病率最低,分别比对照组、2 mmol/L草酸处理组、6 mmol/L草酸处理组低37.50%、30.55%、16.66% ( $P < 0.05$ )。贮藏结束时,4、6 mmol/L

Duncan 式进行差异显著性分析,  $P < 0.05$  表示差异显著,使用Origin 8.5软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 草酸对 *A. alternata* 孢子萌发及菌落直径的影响

在本试验浓度范围内,随着草酸浓度的增加,其对 *A. alternata* 的抑菌效果越明显。由图1a可知,待对照组孢子萌发率达100%时,2、4、6、8 mmol/L草酸处理组孢子萌发率分别比对照组低了9.47%、31.57%、45.26%、57.89% ( $P < 0.05$ )。由此可知草酸可有效抑制 *A. alternata* 孢子的萌发。朱玉燕等<sup>[26]</sup>在研究中发现草酸处理可显著抑制扩展青 (*Penicillium expansum*, *P. expansum*) 孢子萌发率,这与本试验的结果相似。如图1b所示,培养到第7天时,2、4、6、8 mmol/L草酸处理组菌落直径分别比对照组低4.71%、7.14%、13.57%、24.00% ( $P < 0.05$ )。邓建军<sup>[16]</sup>也在研究中发现草酸处理对甜瓜上的 *A. alternata* 菌丝生长有明显的抑制作用,这与本试验的结果一致。



草酸处理组杏果实接种发病率分别比对照降低了16.94%、10.17% ( $P < 0.05$ ),说明草酸处理可有效降低杏果实贮藏期间接种发病率的上升。

结果显示杏果实的病斑直径(图2b)随着贮藏时间的延长而扩大。贮藏第28天时,对照组病斑直径已高达6.33 mm,与对照组相比,2、4、6 mmol/L草酸处理组分别降低了7.90%、25.75%、22.59% ( $P < 0.05$ )。在贮藏第49天时,4、6 mmol/L草酸处理组杏果实病斑直径分别比对照降低了19.44%、10.60% ( $P < 0.05$ ),说明草酸处理可有效延缓杏果实贮藏期间病斑直径的扩大。对甜瓜<sup>[16]</sup>、梨<sup>[20]</sup>的研究也表明适宜浓度的草酸

处理可抑制 *A. alternata* 的发病率, 增强果实的抗病性, 这与本研究结果一致。

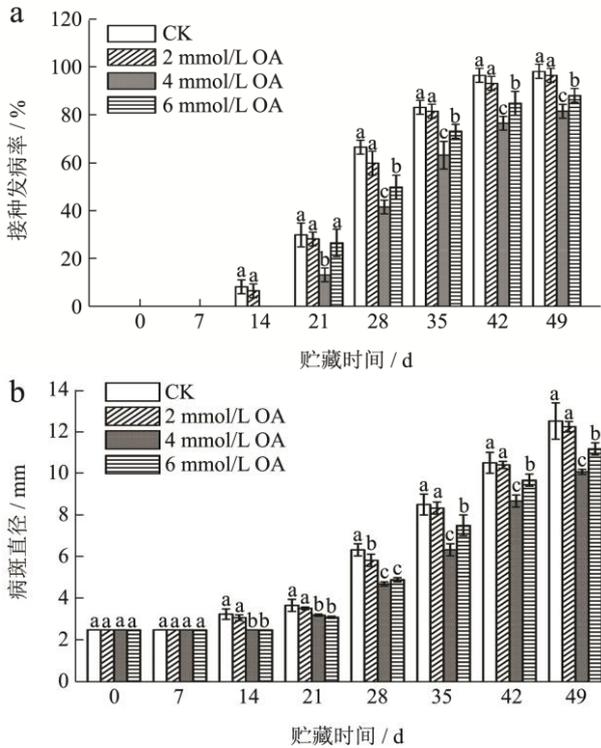


图2 草酸处理对杏果实损伤接种 *A. alternata* 发病率 (a) 及病斑直径 (b) 的影响

Fig.2 Effect of oxalic acid treatment on incidence rate (a) and lesion diameter (b) of apricot fruit injury inoculated with *A. alternata*

由以上试验结果表明, 2、4、6 mmol/L 草酸处理组相较于对照组, 均可有效抑制贮藏期间杏果实接种发病率的上升与病斑直径的扩大。但 4 mmol/L 草酸处理效果最佳。因此本试验选用 4 mmol/L 草酸作为最适浓度, 用于后续试验分析。

### 2.3 草酸处理对杏果实 PAL、C4H、4CL 活性的影响

PAL 位于细胞质和一些细胞器中, 是苯丙烷代谢途径第一步骤的限速酶, 可将 L-苯丙氨酸催化成反式肉桂酸, 为合成抗毒素、总酚、类黄酮和木质素等代谢产物提供前体物质<sup>[27]</sup>。PAL 活性的升高, 有助于植物抗菌化合物的合成<sup>[27]</sup>。杏果实在贮藏过程中, PAL (3a) 活性先逐渐升高后降低, 且草酸处理组下降速率小于对照组。在贮藏 28 d 后, 草酸处理组杏果实 PAL 活性最高, 其值为 548.44 U/g, 相比于同期对照组提高了 18.88% ( $P < 0.05$ )。对照组杏果实 PAL 活性比处理组提前 7 d 出现, 其 PAL 活性峰值为 481.56 U/g, 较处理组 PAL 活性峰值降低了 12.19% ( $P < 0.05$ )。说明草

酸处理可提高贮藏期间杏果实 PAL 的活性。这与邓建军<sup>[16]</sup>、Tian 等<sup>[20]</sup>研究结果一致, 适宜浓度的草酸处理能提高甜瓜和梨 PAL 活性, 从而增强了果实的抗病性。

C4H 可将反式肉桂酸催化成羟基肉桂酸, 进而合成香豆酸、阿魏酸、咖啡酸和芥子酸, 这些酚酸具有直接杀菌作用<sup>[28]</sup>。由图 3b 可知, 贮藏第 28 天时, 经草酸处理的杏果实 C4H 活性达到高峰, 峰值为 6.08 U/g, 相比于同期对照组提高了 7.20% ( $P < 0.05$ )。在杏果实贮藏期结束时, 草酸处理组杏果实 C4H 活性是对照组的 1.05 倍 ( $P < 0.05$ )。说明草酸处理可增强贮藏期间杏果实 C4H 的活性。Ge 等<sup>[29]</sup>研究发现  $\gamma$ -氨基丁酸处理蓝莓后, 果实 C4H 活性上升, 激活了苯丙烷代谢途径, 从而增强果实抗病性, 延长其货架期。同样的结果在硝普钠处理甜瓜上出现<sup>[30]</sup>。

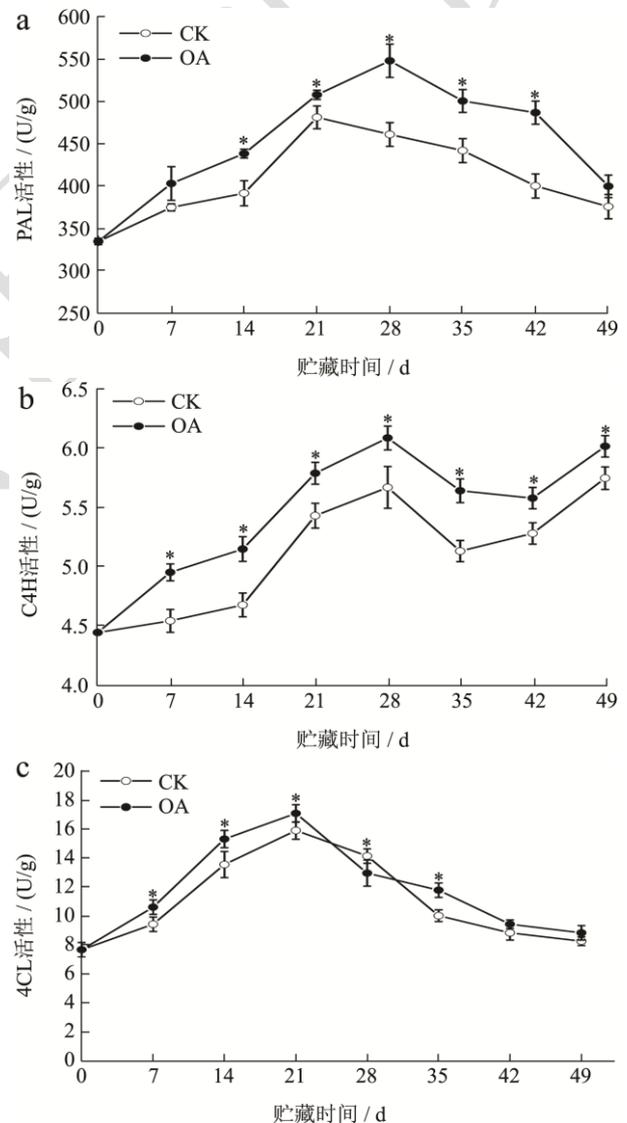


图3 草酸处理对杏果实 PAL (a)、C4H (b)、4CL (c) 活性的影响

Fig.3 Effect of oxalic acid treatment on PAL (a), C4H (b) and 4CL (c) activities of apricot fruit

注: \*表示显著性差异, ( $P < 0.05$ ); 下同。

4CL 是苯丙烷代谢中各个分支途径的纽带,其在抗菌物质的合成过程中有着至关重要的作用<sup>[28]</sup>。羟基肉桂酸和反式肉桂酸在 4CL 的催化下合成相应的硫酯,如对香豆酰 CoA、咖啡酰 CoA、阿魏酰 CoA、芥子酰 CoA,这些硫酯经进一步转化可合成木质素、总酚、类黄酮等次级代谢产物,其可直接或间接的抵御病原菌的入侵<sup>[31]</sup>。如图 3c 所示,在贮藏期间对照组和草酸处理组杏果实 4CL 活性总体变化趋势是先上升后下降。在贮藏(0~14 d)期间草酸处理组与对照组 4CL 活性呈上升趋势,在贮藏第 14 天时,草酸处理组杏果实 4CL 活性为 15.29 U/g,比对照组提高了 13.00% ( $P<0.05$ )。在贮藏第 21 d 时,草酸处理组杏果实 4CL 活性达到峰值,其值为 17.06 U/g,是同期对照组的 1.07 倍 ( $P<0.05$ )。说明草酸处理可有效增强杏果实 4CL 活性,这与朱玉燕<sup>[32]</sup>对猕猴桃的研究结果一致。

## 2.4 草酸处理对杏果实总酚、类黄酮、木质素

### 含量的影响

总酚和类黄酮能抑制病原微生物的生长繁殖,其含量的升高可增强果实的抗病能力<sup>[27,33]</sup>。杏果实在整个贮藏过程中其总酚(图 4a)含量变化规律是慢慢升高的,经草酸处理的杏果实中总酚含量则明显高于对照组 ( $P<0.05$ )。贮藏第 21 天时,与对照相比,草酸处理组杏果实总酚含量提高了 11.76% ( $P<0.05$ )。在贮藏末期时,草酸处理组总酚含量比对照组高 11.11% ( $P<0.05$ )。杏果实贮藏期间类黄酮含量变化规律如图(4b)所示,其含量随贮藏时间的增加而增加,且对照组和草酸处理组表现出较大的差异。贮藏 49 d 后,草酸处理组杏果实类黄酮含量是同期对照组的 1.07 倍 ( $P<0.05$ )。由此可见草酸处理可促进杏果实贮藏期间总酚与类黄酮的积累。郭波龙<sup>[17]</sup>研究发现草酸处理促进了猕猴桃果实抗病相关物质总酚、类黄酮含量的积累,从而减少果实采后病害的发生,这与本试验结果相似。

木质素作为一种有效的物理屏障,可增强细胞壁结构,增加果实组织木质化程度,从而防止病原菌的入侵及扩散,提高果实抗病性<sup>[27]</sup>。如图 4c 所示,杏果实贮藏(0~21 d)期间,草酸处理组和对照组杏果实木质素含量在不断提高,且在第 21 天时达到峰值,经草酸处理的杏果实木质素含量显著高出对照组 23.83% ( $P<0.05$ )。贮藏(28~49 d)期间,杏果实木质素含量逐渐下降,在 49 d 时,草酸处理组杏果实木质素的含量比对照组高 28.73% ( $P<0.05$ ),这与邓建军<sup>[16]</sup>对甜瓜的研究结果一致。

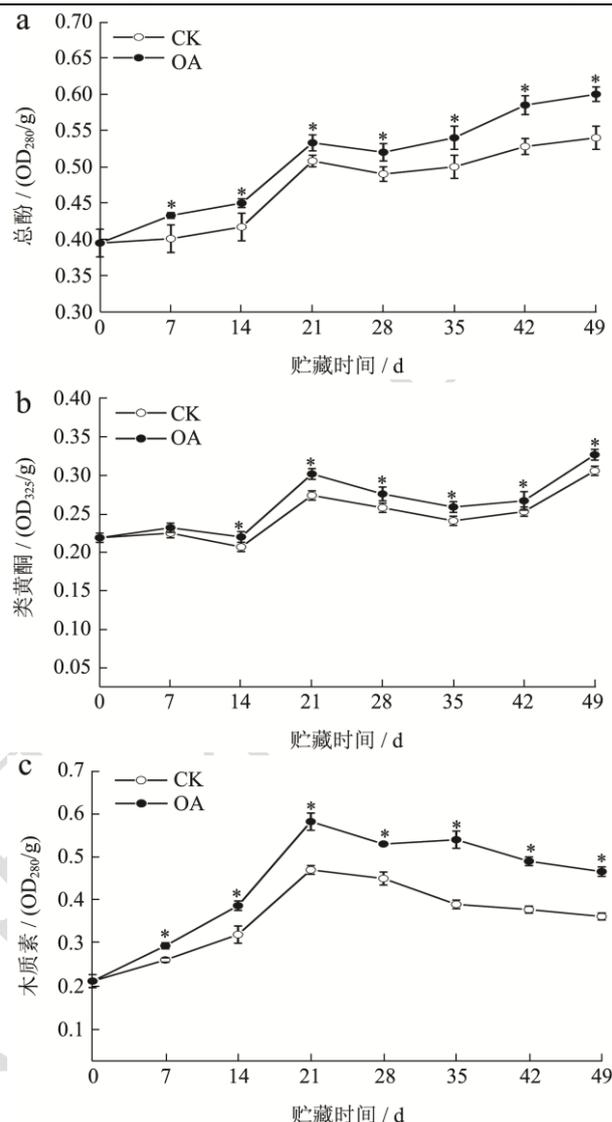


图4 草酸处理对杏果实总酚(a)、类黄酮(b)、木质素(c)含量的影响

Fig.4 Effect of oxalic acid treatment on total phenolics (a), flavonoids (b) and lignin (c) content of apricot fruit

## 4 结论

体外试验结果表明,4 mmol/L 的草酸对 *A. alternata* 菌丝的生长及孢子萌发有显著的抑制作用;损伤接种试验结果表明,4 mmol/L 草酸处理显著抑制杏果实接种发病率的上升和病斑直径的扩大,这可能是因为草酸作为激发子,诱导增强了杏果实苯丙烷代谢关键酶 PAL、C4H 和 4CL 活性,促进总酚、类黄酮和木质素等抗性物质的积累,从而起到抑制 *A. alternata* 进一步侵染,增强杏果实对黑斑病的抗性。

综上所述,在本研究中,草酸对杏果实黑斑病的控制可能存在两方面的作用,草酸一方面可直接抑制 *A. alternata* 的生长和繁殖,从而有效抑制病原菌进一

步扩散;另外一方面草酸也可通过激发果实苯丙烷代谢途径来增强果实对病原菌的抗性。因此,草酸处理在控制果实采后病害方面具有一定的应用价值,为延长果实贮藏期提供技术手段与理论依据。

## 参考文献

- [1] Cui K B, Zhao H D, Sun L N, et al. Impact of near freezing temperature storage on postharvest quality and antioxidant capacity of two apricot (*Prunus armeniaca* L.) cultivars [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(7): e12857.
- [2] Liu B D, Jiao W X, Li B, et al. Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 100-109.
- [3] 曹建康.杏采后黑斑病潜伏感染时期、机制及控制[D].兰州:甘肃农业大学,2002.
- [4] Huang X Q, Ren J, Li P H, et al. Potential of microbial endophytes to enhance the resistance to postharvest diseases of fruit and vegetables [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(5): 1744-1757.
- [5] Zhang S, Wang Q, Guo Y, et al. Carbon monoxide enhances the resistance of jujube fruit against postharvest *Alternaria* rot [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 168: 111268.
- [6] 董柏余,汤洪敏,姚秋萍,等.采后水杨酸处理对金刺梨果实活性氧和苯丙烷代谢的影响[J].*食品工业科技*,2021,42(17): 308-315.
- [7] 何俊瑜,顾津羽,胡春梅,等.水杨酸与硝普钠对采后芒果果实炭疽病抗性和苯丙烷代谢的协同诱导效应[J].*食品科学*, 2022,43(3):178-186.
- [8] Chang L L, Yu Y W, Zhang L L, et al. Arginine induces the resistance of postharvest jujube fruit against *Alternaria* rot [J]. *Food Quality and Safety*, 2022, 6: 8.
- [9] Du H, Sun Y, Yang R, et al. Benzothiazole (BTH) induced resistance of navel orange fruit and maintained fruit quality during storage [J]. *Journal of Food Quality*, 2021, 8(10): 1-8.
- [10] 刘晓佳,薛耀碧,周雅涵,等.苯并噻二唑处理对柑橘果实采后病害控制效果及机制分析[J].*食品科学*,2018,39(9):215-223.
- [11] 郑小林.外源草酸对水果的保鲜效应及其机制研究进展[J].*果树学报*,2010,27(4):605-610.
- [12] Ehteshami S, Abdollahi F, Ramezani A, et al. Enhanced chilling tolerance of pomegranate fruit by edible coatings combined with malic and oxalic acid treatments [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 25(10): 388-398.
- [13] Ali S, Khan A S, Malik A U, et al. Combined application of ascorbic and oxalic acids delays postharvest browning of litchi fruits under controlled atmosphere conditions [J]. *Food Chemistry*, 2021, 16(3): 85-89.
- [14] Dong X Q, Rao J P, Tian G N, et al. Effects of oxalic acid compound cleaning agent on storage quality of fruits of apple red Fuji [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36(4): 577-582.
- [15] 黄玉咪,徐超,杨文慧,等.草酸-壳聚糖复合处理对采后芒果果实品质及保鲜效果的影响[J].*南方农业学报*,2021,52(7): 1790-1797.
- [16] 邓建军.采后草酸处理对厚皮甜瓜果实抗病性的诱导及其贮藏品质的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2007.
- [17] 邬波龙.草酸(钾)处理对采后猕猴桃果实青霉病控制及部分机制研究[D].杭州:浙江工商大学,2014.
- [18] Zheng X L, Tian S P, Gidley M J, et al. Slowing the deterioration of mango fruit during cold storage by pre-storage application of oxalic acid [J]. *Journal of Pomology and Horticultural Science*, 2007, 82(5): 707-714.
- [19] 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*,2005,21(5):23-27.
- [20] Tian S P, Wan Y K, Qin G Z, et al. Induction of defense responses against *Alternaria* rot by different elicitors in harvested pear fruit [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 70(6): 729-734.
- [21] Yao H J, Tian S P. Effects of a biocontrol agent and methyl jasmonate on postharvest diseases of peach fruit and the possible mechanisms involved [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(4): 941-950.
- [22] Qin G Z, Zong Y, Hua D, et al. Inhibitory effect of boron against *Botrytis cinerea* on table grapes and its possible mechanisms of action [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 138(2): 145-150.
- [23] 石玲,李丽花,张瑞杰,等.24-表油菜素内酯调控活性氧代谢增强杏果实采后抗病性[J].*食品科学*,2020,41(9):126-132.
- [24] 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.
- [25] 范存斐,毕阳,王云飞,等.水杨酸对厚皮甜瓜采后病害及苯丙烷代谢的影响[J].*中国农业科学*,2012,45(3):584-589.
- [26] 朱玉燕,邬波龙,郑小林,等.外源草酸对猕猴桃采后果实扩展青霉生长及展青霉素积累的影响[J].*果树学报*,2015,32(2): 298-303.
- [27] 黄小贞,赵德刚.植物苯丙氨酸解氨酶表达调控机理的研究进展[J].*贵州农业科学*,2017,45(4):16-20.
- [28] 李伊涵.采后褪黑素处理对“金冠”苹果贮藏品质和苯丙烷代谢的影响[D].锦州:渤海大学,2021.
- [29] Ge Y H, Duan B, Li C, et al.  $\gamma$ -Aminobutyric acid delays

- senescence of blueberry fruit by regulation of reactive oxygen species metabolism and phenylpropanoid pathway [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 240(68): 303-309.
- [30] Wang B, He X, Bi Y, et al. Preharvest sprays with sodium nitroprusside induce resistance in harvested muskmelon against the pink rot disease [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 101(55): 122-126.
- [31] Liu H, Guo Z, Gu F, et al. 4-Coumarate-CoA ligase-like gene OsAAE3 negatively mediates the rice blast resistance, floret development and lignin biosynthesis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 68(7): 9-12.
- [32] 朱玉燕. 采前喷施草酸、水杨酸对美味猕猴桃果实采后品质及抗病性的影响[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2015.
- [33] Romanazzi G, Sanzani S M, Bi Y, et al. Induced resistance to control postharvest decay of fruit and vegetables [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 108(36): 82-94.

现代食品科技