

壳聚糖复合磷酸钠处理对苹果青霉病的影响及部分机理

李伊涵, 李灿婴, 蒋超男, 李志强, 葛永红*

(渤海大学 食品科学与工程学院, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心,
辽宁 锦州 121013)

摘要:以“金冠”苹果为试材, 研究不同浓度壳聚糖复合 0.5 mg/mL 磷酸钠浸泡处理对损伤接种扩展青霉(*Penicillium expansum*)果实病斑扩展的影响, 研究最佳复合处理对果实抗氧化酶活性及苯丙烷途径关键酶活性和产物积累的影响。结果表明, 1.0% 壳聚糖复合磷酸钠处理对果实青霉病的控制效果最佳, 处理显著降低病斑直径, 激活过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性, 促进果实总酚、类黄酮及木质素的积累。此外, 复合处理可提高果实过氧化氢含量、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶活性。由此表明, 壳聚糖复合磷酸钠处理抑制苹果果实青霉病的发生与提高抗氧化能力和激活苯丙烷代谢途径密切相关。

关键词: 苹果; 壳聚糖; 磷酸钠; 活性氧; 苯丙烷途径

Effects of the Combination of Chitosan and Trisodium Phosphate on the Development of Blue Mold in Apple Fruits and the Partial Mechanism Underlying These Effects

LI Yi-han, LI Can-ying, JIANG Chao-nan, LI Zhi-qiang, GE Yong-hong*

(College of Food Science and Engineering, Bohai University, National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, Liaoning, China)

Abstract: The effects of different concentrations of chitosan combined with 0.5 mg/mL trisodium phosphate at ambient temperatures on the development of lesions in apples (cv. Golden Delicious) inoculated with *Penicillium expansum* was investigated. The effects of an optimal combination of chitosan and trisodium phosphate on the activity of antioxidant enzymes, as well as other enzymes, and on the accumulation of metabolites in the phenylpropanoid pathway were also studied. The results indicated that 1.0% chitosan combined with 0.5 mg/mL trisodium phosphate was the most effective treatment for the inhibition of the growth of blue mold in apples. Importantly, the combination of chitosan and trisodium phosphate significantly reduced the lesion diameter in the inoculated fruits and increased the contents of total phenolic compounds, flavonoids, and lignin, and the activities of peroxidase and phenylalanine ammonia-lyase in apples. Furthermore, this combination increased the H₂O₂ contents, and the catalase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase activities in apples. Collectively, these findings suggested that the combination of chitosan and trisodium phosphate inhibits the formation of blue mold in apples via the enhancement of antioxidant capacity and the activation of the phenylpropanoid pathway.

Key words: apple; chitosan; trisodium phosphate; reactive oxygen species; phenylpropanoid pathway

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801595); 辽宁省科学技术计划项目(2017205002)

作者简介: 李伊涵(1996—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 果蔬采后生物学与技术。

* 通信作者: 葛永红(1979—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 果蔬采后生物学与技术。

引文格式:

李伊涵,李灿婴,蒋超男,等.壳聚糖复合磷酸钠处理对苹果青霉病的影响及部分机理[J].食品研究与开发,2021,42(7):76-82.

LI Yihan, LI Canying, JIANG Chaonan, et al. Effects of the Combination of Chitosan and Trisodium Phosphate on the Development of Blue Mold in Apple Fruits and the Partial Mechanism Underlying These Effects[J].Food Research and Development, 2021, 42(7):76-82.

苹果(*Malus domestica* Borkh.)是蔷薇科苹果亚科苹果属植物,果实营养丰富,可为人体提供多种维生素和矿物质,是低热量食物^[1]。中国是苹果生产和消费大国,但是每年因病害而产生的损失巨大。引起苹果采后病害的病原物包括扩展青霉(*Penicillium expansum*)、灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)、互隔链格孢(*Alternaria alternata*)等^[2]。其中 *P. expansum* 引起的青霉病是最主要的病害,该菌主要通过伤口侵染,受侵染的果实不仅品质劣变,而且还会在体内产生展青霉毒素危害人体的健康^[3]。青霉病的防治最有效的还是利用化学杀菌剂如苯并噻二唑类、咪酰胺类、苯二甲腈类等^[4]。但由于对食品安全问题以及环保问题越来越多的关注,很多有效的化学杀菌剂使用逐渐受到限制。因此,研究开发绿色、环境友好的防腐保鲜技术势在必行。

壳聚糖(chitosan, CTS),是乙酰氨基葡萄糖聚合物的脱乙酰产物,是一种碱性多糖^[5],具有生物相容性、生物降解性、抗菌性和易成膜的特性^[6]。壳聚糖基薄膜作为一种新型的保鲜方法被广泛应用^[7]。壳聚糖可以有效阻挡病原菌的入侵,研究表明,壳聚糖复合拮抗酵母、多聚赖氨酸处理对猕猴桃和苹果病害控制及保鲜都有一定的效果^[8-10]。磷酸钠(Na_3PO_4),是一种无机磷化合物,食品级磷酸钠可用作品质改良剂、洗涤剂^[11]。磷酸盐具有保护果蔬天然色泽的作用,可防止果蔬酶促褐变、增强抗氧化性和保水性^[12]。已有研究证明,采后磷酸钠处理能够控制苹果采后黑斑病的发生,并且能够保持果实品质及抗氧化和能量水平^[13-14]。此外,采后磷酸钠处理还能够通过调控糖代谢和细胞壁降解酶活性保持枣果实品质^[15-16]。但有关 CTS 复合磷酸钠处理在苹果病害控制中的研究鲜见报道。

本研究以“金冠”苹果果实为试材,研究采后不同浓度 CTS 复合磷酸钠处理对果实青霉病的抑制程度,同时探讨其对果实抗氧化酶活性和苯丙烷途径关键酶活性及产物含量的影响,以期为果实采后病害的绿色控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

“金冠”苹果果实采自锦州市苹果园,选取质地优良、大小均匀、无机械损伤及病虫害的果实用纸箱包装,当天运回实验室处理。供试 *P. expansum* 为渤海大海食品科学工程学院采后保鲜实验室保存菌种,使用前在马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基上 25℃活化。壳聚糖(CTS,脱乙酰度 $\geq 99\%$):合肥博美生物科技有限责任公司;磷酸钠(Na_3PO_4 ,聚合度 144-335):山东西亚化工有限公司。

UV-2550 分光光度计:岛津仪器(苏州)有限公司;5424R 小型冷冻离心机:德国 eppendorf 公司;HS-1300-U 超净工作台:苏净集团苏州安泰空气技术有限公司;MIR-254 型生化培养箱:上海一恒科学仪器有限公司;A 11 basic 研磨机:德国 IKA 集团。

1.2 方法

1.2.1 CTS 和磷酸钠处理

配制 1.0%、1.5%、2.0% 的 CTS 溶液,用 10 mL/L 醋酸溶液溶解后加入 0.5 mg/mL 磷酸钠,用 1.0 mol/L 的氢氧化钠调节 pH 值至 5.6。选择好的果实分别在壳聚糖、壳聚糖和磷酸钠复合溶液、磷酸钠溶液和清水(对照)中浸泡 10 min,取出自然晾干,贮藏于(24±1)℃,相对湿度 50%~60%环境中待用,各处理用果实 30 个。

1.2.2 孢子悬浮液的配制及损伤接种

参照 MENG 等^[17]的方法。用血球计数板将孢子悬浮液的最终浓度调为 1×10^5 个/mL。用 75%乙醇对果实表面进行消毒处理,然后在果实赤道部位均匀刺孔 4 个(3 mm×3 mm)。自然晾干后每个孔内接种 10 μL 的 *P. expansum* 孢子悬浮液,等孔内晾干后装箱置于常温贮藏[温度(24±1)℃,相对湿度 50%~60%]。于接种后第 7 天观察发病率并测定病斑直径,筛选出最佳复合处理用于后续研究。

1.2.3 取样

参照 BI 等^[18]的方法。用 1%CTS(1.2.2 筛选出的最佳浓度)结合磷酸钠和清水(对照)处理果实 105 个,分

别于贮藏第0天、第2天、第4天、第6天、第8天、第10天、第12天取皮下5 mm~10 mm处果肉组织,液氮速冻后锡箔纸包装标记,放入-80℃冰箱保存待用。每次取样各处理用果实15个。

1.2.4 测定方法

1.2.4.1 过氧化氢(H_2O_2)含量

参考GEYH等^[19]的方法并修改。取3.0 g冷冻果肉组织,加入3.0 mL预冷丙酮研磨后,在低温条件下离心20 min($10\,000\times g$)。取2.0 mL上清液,加0.05 mL浓氨水和0.04 mL 20%的四氯化钛,反应5 min后同样条件离心10 min,然后用冷丙酮洗涤3次,最后用3.0 mL 1.0 mol/L H_2SO_4 溶液将洗涤后的沉淀溶解,测定410 nm处的吸光值。用 $\mu\text{mol/g FW}$ 表示 H_2O_2 含量。

1.2.4.2 过氧化氢酶(catalase, CAT)活性

参考REN等^[20]的方法并修改。取3.0 g冷冻果肉组织,加入3.0 mL经4℃预冷的100 mmol/L pH值为7.5的磷酸缓冲液,在冰浴条件下研成匀浆,于4℃、 $10\,000\times g$ 离心25 min,上清液即为粗酶液。反应体系包括100 μL 粗酶液和3.0 mL 10 mmol/L H_2O_2 。然后测定反应体系在240 nm的吸光值,酶活性用U表示,1 U= $\Delta OD_{240}/(\text{min}\cdot\text{mg 蛋白})$ 。

1.2.4.3 抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性

参照REN等^[20]的方法并修改。反应体系包括200 μL 粗酶液、0.8 mL 3.0 mmol/L抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)、2.0 mL 100 mmol/L磷酸缓冲液和0.5 mL 0.5 mmol/L H_2O_2 ,加入 H_2O_2 15 s后开始测其在290 nm的吸光值,酶活性用U表示,1 U= $0.01\Delta OD/(\text{min}\cdot\text{mg 蛋白})$ 。

1.2.4.4 谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)活性

参照REN等^[20]的方法。反应体系包含0.2 mL粗酶液、0.1 mL 5.0 mmol/L氧化型谷胱甘肽(oxidized glutathione, GSSG)、3.0 mL 100 mmol/L磷酸缓冲液和30 μL 3.0 mmol/L还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH),加入NADPH 15 s后开始测其在340 nm处的吸光值,酶活性用U表示,1 U= $0.01\Delta OD/(\text{min}\cdot\text{mg 蛋白})$ 。

1.2.4.5 过氧化物酶(peroxidase, POD)活性

参照LIU等^[21]的方法。反应体系包含200 μL 粗酶液、2.5 mL 0.025 mol/L愈创木酚和0.2 mL 0.25 mol/L H_2O_2 ,测定反应混合液在470 nm处的吸光度值,酶活性用U表示,1 U= $0.01\Delta OD/(\text{min}\cdot\text{mg 蛋白})$ 。

1.2.4.6 苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)活性

参照LIU等^[21]的方法并修改。反应体系为200 μL

粗酶液、0.5 mL 0.02 mol/L苯丙氨酸和3.0 mL蒸馏水,于290 nm处测吸光度,然后于30℃水浴30 min,加入200 μL 6.0 mol/L HCl终止反应,再次于290 nm处测定其吸光度值。酶活性用U表示,1 U= $0.01\Delta OD/(\text{min}\cdot\text{mg 蛋白})$ 。

1.2.4.7 蛋白含量

参照曹建康等^[22]的方法用考马斯亮蓝方法测定蛋白含量。

1.2.4.8 总酚、类黄酮和木质素含量

参照LIU等^[21]的方法并修改。取3.0 g冷冻果肉组织,液氮研磨后加如1%预冷HCl-甲醇溶液5.0 mL继续研成匀浆,然后将匀浆移入离心管中,于 $10\,000\times g$ 条件下低温离心15 min。取上清液分别于280 nm和325 nm处测定吸光度值。用 $OD_{280}/\text{g FW}$ 表示总酚含量;用 $OD_{325}/\text{g FW}$ 表示类黄酮含量。

参照Liu等^[21]方法并修改。取CTS复合磷酸钠处理和对照苹果3.0 g冷冻果肉组织,液氮研磨后加入3.0 mL 95%乙醇溶液,研成匀浆,然后转入离心管,于 $10\,000\times g$ 条件下低温离心10 min,弃上清液,沉淀物用95%乙醇冲洗3次,再用正己烷混合溶液冲洗3次,干燥后加25%溴化乙酰冰醋酸溶液1.0 mL,于70℃恒温水浴30 min,加1.0 mL 2.0 mol/L NaOH终止反应,加2.0 mL冰醋酸和0.1 mL 7.5 mol/L盐酸羟胺,再次离心,取上清液0.5 mL加4.0 mL冰醋酸,于280 nm处测定吸光度值,用 $OD_{280}/\text{g FW}$ 表示木质素含量。

1.2.5 数据分析

3次重复的试验数据,用Microsoft Excel 2007计算平均值并作图,用SPSS16.0统计软件进行最小显著性差异法(least significant difference, LSD)分析。

2 结果与分析

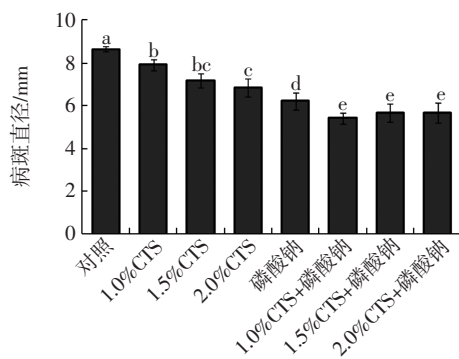
2.1 CTS复合磷酸钠处理对损伤接种*P. expansum*果实病斑直径的影响

CTS复合磷酸钠处理对损伤接种*P. expansum*果实病斑直径的影响见图1。

壳聚糖、磷酸钠单独处理和复合处理均显著降低了苹果果实的病斑直径,而且CTS复合磷酸钠处理的病斑直径均显著小于CTS和磷酸钠单独处理,其中以1.0% CTS复合磷酸钠处理的病斑直径最小(图1)。因此,选择1.0% CTS复合磷酸钠处理进行下一步研究。

2.2 CTS复合磷酸钠处理对苹果果实 H_2O_2 含量和CAT活性的影响

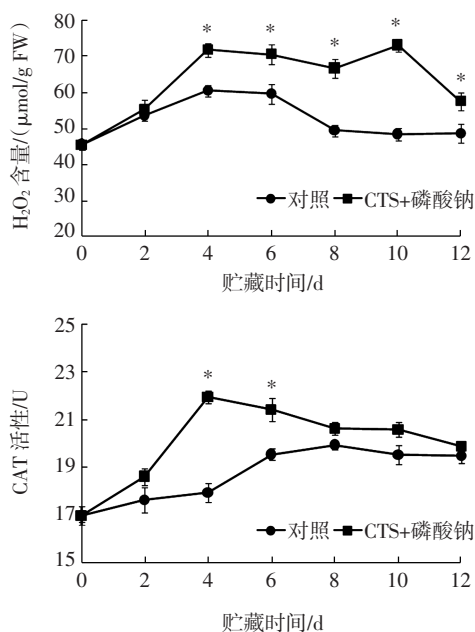
CTS复合磷酸钠处理对苹果果实 H_2O_2 含量和CAT活性的影响见图2。



不同字母表示显著性差异($p < 0.05$),小垂线表示标准误差。

图1 不同浓度 CTS 复合磷酸钠处理对损伤接种 *P. expansum* 苹果果实病斑直径的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of chitosan combined with trisodium phosphate treatment on lesion diameter of apple fruit inoculated with *P. expansum*



* 表示显著性差异($p < 0.05$),小垂线表示标准误差。

图2 采后 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实 H_2O_2 含量和 CAT 活性的影响

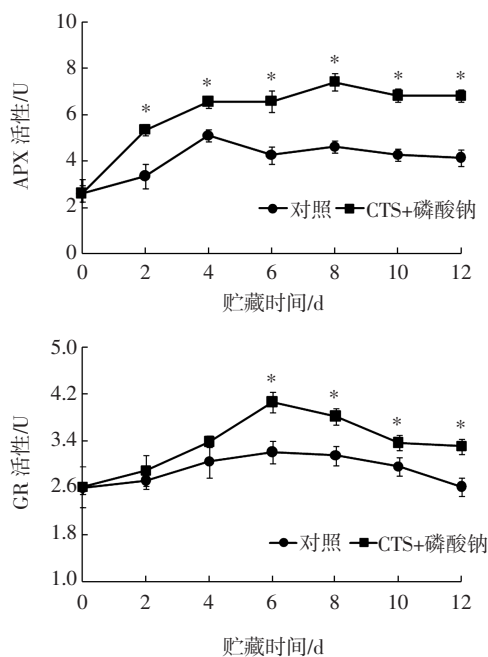
Fig.2 Effects of postharvest chitosan combined with trisodium phosphate on the H_2O_2 content and CAT activity in apple fruit

H_2O_2 含量的升高有利于细胞壁蛋白氧化交联使细胞壁加厚,还可作为信号分子诱导植物体内防御反应。CTS 复合磷酸钠处理果实 H_2O_2 含量在整个贮藏期间均高于对照果实,并且在贮藏第4天到第12天显著高于对照(图2)。在复合处理果实中 H_2O_2 含量分别在贮藏第4天和第10天出现两个高峰,分别是对照果实的1.19倍和1.51倍,而对照果实仅在贮藏第4天出现峰值。然而, H_2O_2 的过量积累会损伤细胞,而CAT可以清除果实体内过多的 H_2O_2 ,使其转化成水和氧气。CTS

复合磷酸钠处理和对照果实 CAT 活性均呈先上升后下降的趋势,但二者的出峰时间不同,复合处理的高峰出现在贮藏第4天,而对照果实高峰在贮藏第8天(图2)。CTS 复合磷酸钠处理果实中 CAT 活性在贮藏第4天和第6天显著高于对照果实,分别是对照的1.22倍和1.10倍。

2.3 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实 APX 和 GR 活性的影响

CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实 APX 和 GR 活性的影响见图3。



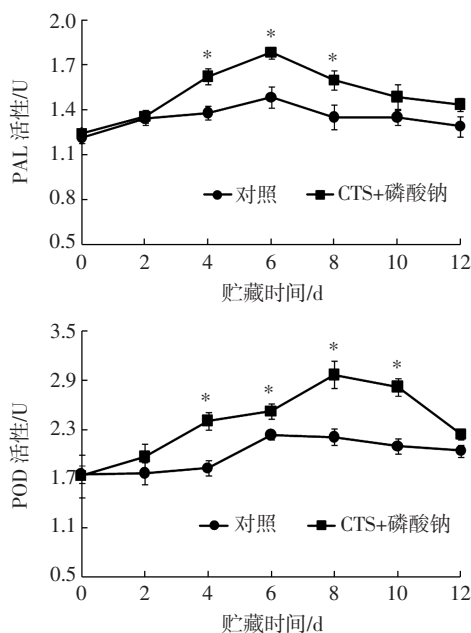
* 表示显著性差异($p < 0.05$),小垂线表示标准误差。

图3 采后 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实 APX 和 GR 活性的影响
Fig.3 Effects of postharvest chitosan combined with trisodium phosphate on the APX and GR activities in apple fruit

APX 和 GR 是抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环的两个关键酶,可以直接清除果实体内 H_2O_2 ,维持果实体内抗氧化剂 AsA 和 GSH 的平衡。在贮藏第2天到第12天,CTS 复合磷酸钠处理果实 APX 活性均显著高于对照组,在第8天差异最大,是对照果实的1.61倍。CTS 复合磷酸钠处理果实的 GR 活性在整个贮藏期间均高于对照果实(图3),在贮藏第6天到第12天均显著高于对照,且在第6天出现峰值,处理果实 GR 活性是对照的1.27倍。

2.4 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实 PAL 和 POD 活性的影响

CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实 PAL 和 POD 活性的影响见图4。



*表示显著性差异($p < 0.05$),小垂线表示标准误差。

图4 采后 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实 PAL 和 POD 活性的影响

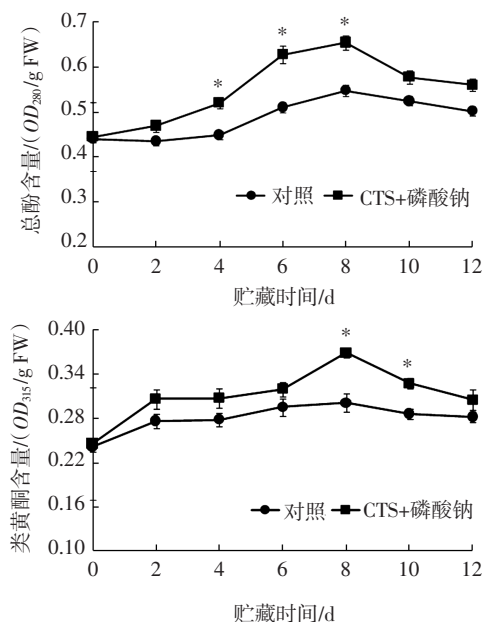
Fig.4 Effects of postharvest chitosan combined with trisodium phosphate on the PAL and POD activities in apple fruit

PAL 是控制苯丙烷代谢途径速度的酶,通过调节下游产物的积累,提高植物对病原物侵染的抵抗力。在贮藏第 0 天到第 12 天,CTS 复合磷酸钠处理的 PAL 活性均高于对照果实,两个处理都在第 6 天升到高峰,处理果实 PAL 活性是对照的 1.20 倍(图 4)。果实体内 POD 参与酚的氧化反应并生成对病原菌毒性较高的醌类物质,并参与木质素的合成。在贮藏第 0 天到第 12 天,处理和对照果实 POD 活性整体都呈先上升后下降趋势,CTS 复合磷酸钠处理果实 POD 活性在贮藏第 4 天到第 10 天显著高于对照组,其中在第 8 天活性最高,是对照果实的 1.34 倍(图 4)。

2.5 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实总酚和类黄酮含量的影响

CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实总酚和类黄酮含量的影响见图 5。

酚类和类黄酮是苯丙烷代谢的主要产物,本身具有直接的抑菌作用。在贮藏第 0 天到第 12 天,CTS 复合磷酸钠处理果实总酚含量均高于对照组,且在第 4 天到第 8 天处理果实总酚含量显著高于对照,分别是对照果实的 1.16 倍、1.23 倍和 1.19 倍(图 5)。CTS 复合磷酸钠处理果实类黄酮含量在整个贮藏期间均高于对照组,整体呈先上升后下降趋势,其中在第 8 天和第 10 天显著高于对照,分别是对照的 1.23 倍和 1.14



*表示显著性差异($p < 0.05$),小垂线表示标准误差。

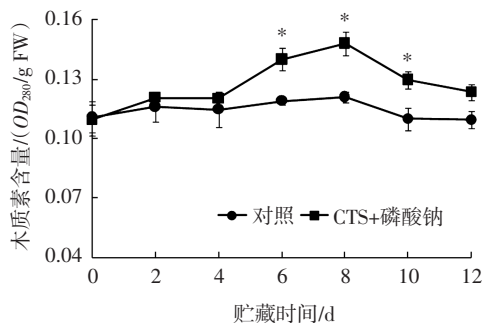
图5 采后 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实总酚和类黄酮含量的影响

Fig.5 Effects of postharvest chitosan combined with trisodium phosphate on the total phenolic compounds and flavonoids contents in apple fruit

倍(图 5)。

2.6 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实木质素含量的影响

CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实木质素含量的影响见图 6。



*表示显著性差异($p < 0.05$),小垂线表示标准误差。

图6 采后 CTS 复合磷酸钠处理对苹果果实木质素含量的影响

Fig.6 Effects of postharvest chitosan combined with trisodium phosphate on the lignin content in apple fruit

木质素是重要的次生代谢产物,其合成能使细胞壁增厚以抵御病原菌的侵入和扩展。在贮藏第 6 天到第 10 天显著高于对照,二者均在第 8 天出现峰值,CTS 复合磷酸钠处理果实木质素含量是对照的 1.22 倍(图 6)。

3 讨论

CTS和磷酸钠都有抗氧化和抑菌能力,并且都可以应用于食品保鲜和加工中^[23]。已有研究证明,采后壳聚糖复合拮抗酵母、1-甲基环丙烯、水杨酸等可以有效控制水果采后病害^[24-26]。本研究表明,CTS和磷酸钠单独处理对病斑直径均有抑制作用,并且CTS复合磷酸钠处理对苹果青霉病的抑制具有协同作用,其中以1.0% CTS复合0.5 mg/mL磷酸钠处理对苹果果实损伤接种扩展青霉的病斑抑制效果最佳。

活性氧爆发是植物的抗病初期的重要反应之一,其中 H_2O_2 性质相对稳定是研究活性氧代谢的首选^[27]。 H_2O_2 的积累不仅有利于细胞壁蛋白氧化交联使细胞壁加厚,还能作为信号分子激活植物体内防卫反应^[28]。但过高浓度的 H_2O_2 会破坏细胞的结构进而影响其功能,具有毒性作用^[29]。CAT是果实体内清除 H_2O_2 的关键酶,使其转化为 H_2O 和 O_2 。本试验发现,CTS复合磷酸钠处理在贮藏前期提高了 H_2O_2 含量,有利于启动果实体内的防御反应,而后期随着CAT活性的诱导分解过多的 H_2O_2 ,从而降低对果实的伤害。芒果果实上的研究证明,采后壳聚糖处理促进了果实的 H_2O_2 积累,并且诱导了CAT活性的升高^[30]。此外,采后磷酸钠处理也能够诱导苹果果实 H_2O_2 的积累,提高其对黑斑病的抗性^[13]。APX是AsA-GSH循环中的关键酶,以抗坏血酸为底物,可以将 H_2O_2 转变成 H_2O ^[31]。GR以氧化型谷胱甘肽为底物将 H_2O_2 转变成 H_2O ^[32],还能再生重要的抗氧化剂AsA^[33]。杨梅上的研究证明壳聚糖处理提高了APX和GR的含量,进而增强果实活性氧的清除能力^[34],通过增强APX和GR的活性来清除过量的 H_2O_2 ,并促进AsA生成,来维持果实体内抗氧化剂AsA和GSH的平衡,在果实细胞活性氧的清除抗氧化方面发挥着重要作用。

果实采后通过激活一系列的代谢可以提高伤口的愈伤能力,减少病原菌的入侵^[35],其中苯丙烷代谢在愈伤过程中发挥重要作用^[36-37]。苯丙氨酸解氨酶(PAL)是苯丙烷类代谢中的催化苯丙烷类代谢途径的关键酶^[38],并且可以对一些抗菌物质的合成和木质化反应进行调控^[39]。木质素是构成植物细胞壁的主要成分之一。CTS和磷酸钠复合处理后,果实木质素含量升高,有助于细胞形成交织网来强化细胞壁,增强植物的抗病能力和硬度,抵御病原菌的侵入和扩展,进而抑制青霉病的发生。这与处理后山药和草莓的木质素含量升高,增强果实的抗病能力的结论一致^[40-41]。酚类物质是典型的活性氧自由基清除剂,已有壳聚糖和寡聚糖处理樱桃和草莓提高了总酚、类黄酮的含量,使果实

增强抗氧化、抗衰老能力的结论与本试验CTS显著提高了采后果实中总酚含量,有效防治果实采后青霉病的发生的结论一致^[42]。

4 结论

采后CTS复合磷酸钠处理对苹果果实青霉有显著抑制效果,复合处理提高了果实贮藏过程中PAL和POD的活性并增加了总酚、类黄酮和木质素的含量,此外复合处理还提高了果实 H_2O_2 含量、CAT、APX和GR活性。由此表明,CTS复合磷酸钠处理对青霉病的控制与提高苹果果实的抗氧化能力并且激活体内苯丙烷代谢相关。

参考文献:

- [1] 聂继云. 苹果的营养与功能[J]. 保鲜与加工, 2013, 13(6): 56-59.
- [2] BURON MOLES G, TORRES R, AMOAKO ANDOH F, et al. Analysis of changes in protein abundance after wounding in "Golden Delicious" apples [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 87: 51-60.
- [3] 孙卉. 枯草芽孢杆菌对扩展青霉的抑菌特性及其活性物质研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.
- [4] 张艳. 苹果主要病虫害防治技术 [J]. 农业科技与信息, 2017(23): 99-101.
- [5] 夏小双. 壳聚糖对扩展青霉的抑制作用及其机理的初步研究[D]. 镇江:江苏大学, 2018.
- [6] WU T T, HUANG J Q, JIANG Y Y, et al. Formation of hydrogels based on chitosan/alginate for the delivery of lysozyme and their antibacterial activity[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 361-369.
- [7] WANG H X, QIAN J, DING F Y. Emerging chitosan-based films for food packaging applications [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(2): 395-413.
- [8] 潘思明. 壳聚糖及拮抗酵母菌对猕猴桃采后病害的防治机制研究[D]. 沈阳:辽宁大学, 2018.
- [9] 唐琦, 葛永红, 董雪, 等. 壳聚糖复合多聚赖氨酸处理对苹果果实贮藏品质的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 184-187.
- [10] 葛永红, 董雪, 魏美林, 等. 壳聚糖复合多聚赖氨酸对苹果果实青霉病及抗氧化酶和苯丙烷代谢的影响 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 281-286.
- [11] 李维, 范佳利, 张亚娟, 等. 食品级磷酸盐的应用研究进展及趋势[J]. 安徽农业科学, 2015, 53(34): 95-96.
- [12] 闫家荫, 刘瑞英, 康明丽. 复合磷酸盐在肉制品中的应用及研究进展[J]. 农产品加工, 2020(2): 82-84.
- [13] GE Y H, CHEN Y R, LI C Y, et al. Effect of trisodium phosphate treatment on black spot of apple fruit and the roles of anti-oxidative enzymes[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2019, 106: 226-231.
- [14] GE Y H, CHEN Y R, LI C Y, et al. Effect of trisodium phosphate dipping treatment on the quality and energy metabolism of apples[J].

- Food Chemistry, 2019, 274: 324–329.
- [15] ZHANG J H, LI C Y, WEI M L, et al. Effects of trisodium phosphate treatment after harvest on storage quality and sucrose metabolism in jujube fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(12): 5526–5532.
- [16] GE Y H, ZHANG J H, LI C Y, et al. Trisodium phosphate delays softening of jujube fruit by inhibiting cell wall-degrading enzyme activities during ambient storage [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 262: 109059.
- [17] MENG X H, LI B Q, LIU J, et al. Physiological responses and quality attributes of table grape fruit to chitosan preharvest spray and postharvest coating during storage[J]. Food Chemistry, 2008, 106(2): 501–508.
- [18] BI Y, TIAN S P, ZHAO J, et al. Harpin induces local and systemic resistance against *Trichothecium roseum* in harvested Hami melons [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 38(2): 183–187.
- [19] GE Y H, DENG H W, BI Y, et al. Postharvest ASM dipping and DPI pre-treatment regulated reactive oxygen species metabolism in muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 160–167.
- [20] REN Y L, WANG Y F, BI Y, et al. Postharvest BTH treatment induced disease resistance and enhanced reactive oxygen species metabolism in muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruit [J]. European Food Research and Technology, 2012, 234(6): 963–971.
- [21] LIU Y Y, GE Y H, BI Y, et al. Effect of postharvest acibenzolar-S-methyl dipping on phenylpropanoid pathway metabolism in muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruits [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 168: 113–119.
- [22] 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.
- [23] 李喜宏, 郭训练, 李文秀, 等. 壳聚糖果蔬保鲜复合涂膜的制备与保鲜效果研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 1–10.
- [24] 陈国刚, 郭璟瑜, 于译, 等. 1-MCP 和壳聚糖处理保持红枣贮藏品质及其机理研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 338–344.
- [25] 郭衍银, 姜颜, 彭楠, 等. 1-甲基环丙烯和壳聚糖对鲜切西兰花活性氧代谢及保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 270–274.
- [26] 邓雨艳, 明建, 张昭其, 等. 壳聚糖诱导脐橙果实抗病性、水杨酸及活性氧代谢变化[J]. 中国农业科学, 2010, 43(4): 812–820.
- [27] 黄艳, 明建, 邓雨艳, 等. 壳寡糖诱导柑橘果实抗病作用中的活性氧变化[J]. 食品科学, 2009, 30(22): 344–349.
- [28] 敬媛媛, 吴斌, 李艳娇, 等. 一氧化氮处理对甜瓜果实采后病害的控制及活性氧代谢的作用 [J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 186–190, 119.
- [29] BHATTACHARJEE S. ROS and oxidative stress: origin and implication [M]//Reactive Oxygen Species in Plant Biology. New Delhi: Springer India, 2019: 1–31.
- [30] SHAH S, HASHMI M S. Chitosan-*Aloe vera* gel coating delays postharvest decay of mango fruit [J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2020, 61(2): 279–289.
- [31] 韩瑞丽. 番茄抗坏血酸过氧化物酶研究进展 [J]. 山西农业科学, 2013, 41(6): 650–652.
- [32] 常雪花, 王振菊, 陈振涛. 外源 NO 处理对新疆红提葡萄抗氧化酶活性的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 9–12.
- [33] 王斌, 白小东, 张静荣, 等. 乙酰水杨酸采前处理诱导哈密瓜果实的采后抗病性[J]. 果树学报, 2018, 35(2): 222–230.
- [34] 王益光, 罗自生, 席芳, 等. 壳聚糖涂膜处理对杨梅活性氧代谢的影响[J]. 果树学报, 2001, 18(6): 349–351.
- [35] 张静荣, 王斌, 姜红, 等. 采后苯丙噻重氮处理促进梨果实的愈伤[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 190–195.
- [36] BERNARDS M A, SUSAG L M, BEDGAR D L, et al. Induced phenylpropanoid metabolism during suberization and lignification: a comparative analysis [J]. Journal of Plant Physiology, 2000, 157(6): 601–607.
- [37] VOGT T. Phenylpropanoid biosynthesis[J]. Molecular Plant, 2010, 3(1): 2–20.
- [38] 葛永红, 王毅, 毕阳. 柠檬酸处理对厚皮甜瓜黑斑病的抑制及苯丙烷代谢的作用[J]. 食品工业科技, 2013, 34(19): 308–312.
- [39] 冯立娟, 王传增, 杨雪梅, 等. 石榴籽粒发育期木质素含量及其代谢相关酶活性的变化[C]//郑州: 中国园艺学会 2019 年学术年会暨成立 90 周年纪念大会论文集, 2019: 70.
- [40] 杨书珍, 刘灿, 苏小军, 等. 高温处理对采后山药块茎愈伤和抗病性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(4): 113–119.
- [41] SAAVEDRA G M, FIGUEROA N E, POBLETE L A, et al. Effects of preharvest applications of methyl jasmonate and chitosan on postharvest decay, quality and chemical attributes of *Fragaria chiloensis* fruit[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 448–453.
- [42] KERCH G, SABOVICS M, KRUMA Z, et al. Effect of chitosan and chitooligosaccharide on vitamin C and polyphenols contents in cherries and strawberries during refrigerated storage [J]. European Food Research and Technology, 2011, 233(2): 351–358.

加工编辑:冯娜

收稿日期:2020-07-01