

外源水杨酸处理对采后蓝莓果实软化的调控作用

黄一峰, 王斯瑶*, 阮鹏展, 赵重阳, 李一峰

(沈阳医学院公共卫生学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:为探究外源水杨酸处理对采后蓝莓果实软化的调控作用及最适调控浓度,以‘蓝丰’蓝莓果实为试材,分别采用3种不同浓度(0.5、1.0、1.5 mmol/L)的外源水杨酸对采后蓝莓果实进行处理,测定常温货架期间果实硬度、腐烂率、失重率、可溶性固形物含量(SSC)的变化,以及果胶酯酶(PE)、多聚半乳糖醛酸酶(PG)和纤维素酶(Cx)等细胞壁水解酶活性的变化。结果表明:外源水杨酸处理能有效延缓采后蓝莓果实硬度下降,从常温货架2 d开始,1.0 mmol/L水杨酸处理组蓝莓果实硬度显著高于对照组($P<0.05$),常温货架8 d时,1.0 mmol/L水杨酸处理组果实硬度比对照组高70%。与对照组相比,1.0 mmol/L水杨酸处理可将蓝莓果实腐烂发生时间推迟2 d,且能够有效降低果实失重率,并维持果实SSC稳定。1.0 mmol/L水杨酸处理显著抑制了蓝莓果实PE和PG活性的升高,进而延缓果实软化。综上所述,外源水杨酸处理对采后蓝莓果实软化具有一定的调控作用,其中1.0 mmol/L为抑制果实软化的最适水杨酸处理浓度,其可通过抑制PE、PG活性延缓采后蓝莓果实软化。

关键词:蓝莓;采后;水杨酸;果实软化

Regulation Effect of Exogenous Salicylic Acid Treatment on the Softening of Postharvest Blueberry Fruit

HUANG Yifeng, WANG Siyao*, RUAN Pengzhan, ZHAO Chongyang, LI Yifeng

(School of Public Health, Shenyang Medical College, Shenyang 110034, China)

Abstract: To explore the regulatory effect of exogenous salicylic acid treatment on the softening of postharvest blueberry fruit and the optimal regulatory concentration, three different concentrations (0.5, 1.0, 1.5 mmol/L) of exogenous salicylic acid were used to treat the postharvest ‘Lanfeng’ blueberry fruits. The regulatory effects of exogenous salicylic acid treatment on the softening of postharvest blueberry fruits were investigated by measuring the changes of fruit firmness, decay rate, weight loss rate and soluble solid content (SSC) and the changes in cell wall hydrolase activities such as pectin esterase (PE), polygalacturonase (PG) and cellulase (Cx) during shelf life at room temperature. The results showed that exogenous salicylic acid treatment could effectively delay the decline of firmness of blueberry fruits. From the 2nd day of shelf life at room temperature, the firmness of blueberry fruits in 1.0 mmol/L concentration of salicylic acid treatment group was significantly higher than that in control group, and on the 8th day of shelf life at room temperature, the firmness of the fruits in 1.0 mmol/L concentration of salicylic acid treatment group was 70% higher than that in control group. Compared with the control group, 1.0 mmol/L sal-

基金项目:沈阳医学院大学生科研项目(20219014);辽宁省科技厅2023年联合基金项目面上资助计划项目(2023-MSLH-293)

作者简介:黄一峰(2000—),男,汉族,本科,研究方向为食品质量控制。

***通信作者:**王斯瑶,博士,讲师,研究方向为食品科学。

icylic acid treatment could delay the occurrence of fruit decay for 2 days, effectively reduce the fruit weight loss rate, and maintain stable content of SSC. The 1.0 mmol/L concentration of salicylic acid treatment significantly inhibited the increase of PE and PG activities in blueberries, thereby delay fruit softening. In conclusion, exogenous salicylic acid treatment has a certain regulatory effect on the softening of postharvest blueberry fruit, among which 1.0 mmol/L was the optimal salicylate treatment concentration for inhibiting fruit softening, which can delay the softening of postharvest blueberry fruits by inhibiting the activities of PE and PG.

Key words: blueberry; postharvest; salicylic acid; fruit softening

中图分类号:S663.2

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2024.07.004

蓝莓为杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinium* spp.)深蓝色浆果,截至2018年底,国内蓝莓种植面积达55 344 hm²,其中辽宁地区种植面积为6 134 hm²,位居全国第二^[1]。由于蓝莓果实中富含多种生物活性物质,具有抗氧化、抗菌、抗炎、保护心脏、抗癌、抗糖尿病和增强免疫力等功能特性^[2],鲜食蓝莓已经成为全球蓝莓生产的主要产品形式,辽东地区90%蓝莓都是以鲜果形式销售^[3]。蓝莓果实成熟于6—8月,采收时天气炎热,且果实自身质地柔软、含水量较高,导致蓝莓果实耐贮性较差,极易发生软化这一品质劣变现象。伴随着蓝莓果实软化,其质地、色泽、风味、营养成分、抗氧化能力等均发生了变化^[4],严重影响果实货架期,进而影响其销售时间及销售范围,软化已成为制约蓝莓产业发展的瓶颈问题。一般认为,果实贮藏过程中的软化在很大程度上取决于果实细胞壁的降解。已有研究表明,多聚半乳糖醛酸酶(PG)、果胶酯酶(PE)和纤维素酶(Cx)等细胞壁水解酶会导致果实果胶、纤维素等细胞壁多糖物质的降解,进而促进采后蓝莓果实软化^[5]。近年来,冷藏作为蓝莓采后的主要保鲜手段^[6]被广泛应用,但蓝莓果实在0℃贮藏后,会发生果蒂凹陷这一冷害现象^[7],冷藏出库后,蓝莓果实软化速度更快。因此,探究一种新的调控蓝莓果实采后软化的绿色、安全的技术对于促进蓝莓产业的发展具有重要意义。

植物激素通过一系列生理生化反应影响果实的生长、成熟和软化。乙烯、脱落酸、生长素等植物激素已经被证明在多种水果的采后果实软化过程中起到了调控的作用。因此,深入研究植物激素在果实软化中的调控作用显得特别重要。植物激素水杨酸(SA)是一种小分子酚类化合物,使用适当浓度外源水杨酸可以增加系统抗药性^[8-9],减缓果蔬的腐烂^[10],对果蔬成熟老化^[11]有一定的减缓作用,降低冷害损伤对果蔬的影响^[12-13]。水杨酸处理可有效抑制果实腐烂,同时也可以减缓果实失重率的增加,提高过氧化物酶

(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)的活性,减缓丙二醛(MDA)含量的上升,这一作用机制主要通过促进植物的抗菌活性和促进植物的二次代谢来实现^[14]。目前,关于采后水杨酸对蓝莓软化的调控鲜见报道,因此探究水杨酸对蓝莓果实软化的调控作用对于促进蓝莓产业的发展具有重要意义。

本文以‘蓝丰’蓝莓为试材,探究采后不同浓度外源水杨酸处理对蓝莓果实软化的调控,以筛选出最适处理浓度,通过分析最适浓度水杨酸处理对蓝莓果实细胞壁水解酶活性的影响,进一步探讨水杨酸对采后蓝莓果实软化的调控机理,以期为提高蓝莓果实的货架保鲜效果提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

‘蓝丰’蓝莓果实,于2021年6月采收自辽宁省时圣蓝莓基地,选取8成熟,无病虫害、无机械伤、大小均匀一致的果实。

水杨酸、羧甲基纤维素钠、溴百里香酚蓝、果胶、氢氧化钠、乙酸钠,上海麦克林生化科技股份有限公司;多聚半乳糖醛酸、3,5-二硝酸水杨酸,上海罗恩化学技术有限公司;无水乙醇、乙酸,天津市天力化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

FA-004 电子分析天平,上海恒平科学仪器有限公司;CR-400 色差仪,日本柯尼卡美能达有限公司;TD-45 手持折光仪,浙江托普仪器有限公司;UV-1810 紫外分光光度计,上海元析仪器有限公司;HWS-250 恒温恒湿贮藏箱,上海瀚雨科技有限公司;CT3 质构仪,美国 Brookfield 公司。

1.2 方法

1.2.1 试材处理

蓝莓果实随机分为4组,空白对照组果实水平采

用清水浸泡 5 min 后阴干, 另外 3 组分别用 0.5、1.0、1.5 mmol/L 浓度的水杨酸浸泡处理 5 min 后阴干。将阴干的蓝莓果实置于 (20±0.5) °C、相对湿度 90% 的恒温恒湿贮藏箱内贮藏。贮藏期间每 2 d 取样测定 4 组果实各项指标, 试验设置 3 次重复, 结果取平均值。

1.2.2 测定项目与方法

1.2.2.1 硬度

使用质构仪检测蓝莓果实的硬度, 使用直径 8.0 mm 的探针在果实赤道处刺入, 测量速度为 0.5 mm·s⁻¹, 下压深度距离为 7.0 mm, 每组随机选取 10 颗蓝莓果实进行测定。硬度单位以 N 表示。

1.2.2.2 腐烂率

采用计数法测定。肉眼可见的表面有霉菌、破裂、流水、果肉腐败等情况为腐烂果实。腐烂率计算公式为:

$$\text{腐烂率}(\%) = \frac{\text{腐烂果数}}{\text{总果数}} \times 100$$

1.2.2.3 失重率

采用称重法测定蓝莓果实的失重率。计算公式为:

$$\text{失重率}(\%) =$$

$$\frac{\text{贮藏前果实质量} - \text{贮藏后果实质量}}{\text{贮藏前果实质量}} \times 100$$

1.2.2.4 可溶性固形物含量(SSC)

采用 TD-45 手持折光仪进行测定。

1.2.2.5 果胶酯酶活性

PE 活性测定参照 Hagerman 等^[15]的方法, 并稍加修改。取 5 g 蓝莓果实, 加入 10 mL 95% 的乙醇溶液于研钵中进行冰浴研磨, 磨至匀浆状。然后在 4 °C、10 000×g 条件下离心 10 min, 之后再加入浓度为 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液将 pH 调至 7.5。取 0.5% 的果胶 2 mL、0.01% 的溴百里香酚蓝 0.15 mL 与 0.4 mL 酶液充分混合反应, 于 620 nm 处记录 1 min 内吸光度值的变化。

1.2.2.6 多聚半乳糖醛酸酶活性

PG 活性测定参照曹建康等^[16]的方法, 取 10.0 g 蓝莓果实, 加入预冷处理的 95% 乙醇, 冰浴研磨, 然后于 4 °C、转速 12 000×g 下进行离心, 移去上清液加入乙醇溶液, 振荡低温保存, 再次离心, 移去上清液, 加入预冷处理的提取缓冲液, 在同样温度下保存, 继续离心, 得到的上清液为酶提取液。取 2 支 25 mL 的试管, 加入 1 mL 50 mmol/L pH 5.5 乙酸-乙酸钠缓冲液和 0.5 mL 10 g/L 多聚半乳糖醛酸酶溶液, 将 0.5 mL 的酶提取液添加到第 1 个试管中, 将 0.5 mL 经煮沸 5 min 的酶提取液添加到第 2 个试管中作为对照, 37 °C 水浴 1 h, 加入 1.5 mL 3,5-二硝酸水杨酸溶液, 沸水

浴 5 min, 用蒸馏水稀释至 25 mL。在 540 nm 处测量吸光度值。

1.2.2.7 纤维素酶活性

Cx 提取液的制备与 PG 相同。分别取将 2 支容量为 25 mL 的试管, 加入 1.5 mL 10 g/L 羧甲基纤维素钠溶液。在其中一支试管中加入 1.0 mL 酶提取液, 在另一支试管中加入 1.0 mL 煮沸处理的酶提取液作为对照。后续操作步骤同“1.2.2.6”一致。

1.2.3 数据处理

采用 Excel 软件统计和处理数据, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 采用 SPSS 21.0 软件对试验结果进行方差分析, $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实硬度的影响

果实硬度是反映果实品质的重要指标, 直接影响果实的机械采收、运输、贮藏和加工, 也是衡量果实是否发生软化的直观指标^[17]。由图 1 可见, 常温贮藏期间, 各组蓝莓果实的硬度均呈现下降趋势, 与对照组相比, 不同浓度的水杨酸处理可抑制采后蓝莓果实硬度的下降, 0.5、1.5 mmol/L 水杨酸处理组的蓝莓果实硬度从货架期第 4 天开始显著高于对照组 ($P < 0.05$)。1.0 mmol/L 水杨酸处理对于蓝莓果实硬度的维持效果更好, 常温货架第 2 天开始就显著高于对照组 ($P < 0.05$), 该组处理在常温货架第 8 天蓝莓果实硬度比对照组高 70%。上述结果表明水杨酸处理能有效抑制蓝莓果实软化, 且 1.0 mmol/L 水杨酸处理对果实硬度的维持效果较好。

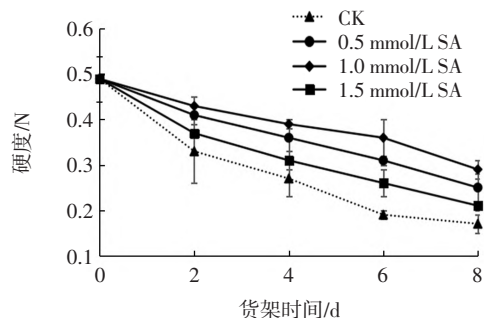


图 1 不同浓度水杨酸处理对蓝莓果实硬度的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of salicylic acid treatment on firmness of blueberry fruit

2.2 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实腐烂率的影响

果实腐烂也是造成新鲜蓝莓采后损失的主要原因之一^[18]。如图 2 所示, 对照组蓝莓果实常温货架第 4 天开始腐烂, 且随货架期的延长果实腐烂率不断增加, 而 3 组水杨酸处理的蓝莓果实在货架期第 6 天才

出现腐烂果实。在货架 6~8 d 时,1.0 mmol/L 水杨酸处理组对蓝莓果实腐烂的抑制效果显著高于其他各组 ($P<0.05$)。上述结果表明,水杨酸可有效抑制蓝莓果实货架期间腐烂率的上升,其中 1.0 mmol/L 水杨酸处理效果最好,与维持果实硬度的最适处理浓度一致。

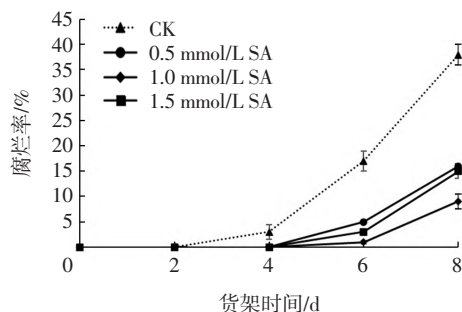


图 2 不同浓度水杨酸处理对蓝莓果实腐烂率的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of salicylic acid treatment on decay rate of blueberry fruit

2.3 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实失重率的影响

由图 3 可见,蓝莓果实失重率随着货架期延长呈现上升趋势,3 组水杨酸处理的蓝莓果实失重率从货架 2 d 开始始终低于对照组。其中 0.5 mmol/L 和 1.5 mmol/L 水杨酸处理组蓝莓果实失重率与对照组差异显著 ($P<0.05$)。货架 8 d 时,1.0 mmol/L 水杨酸处理组失重率较其他 3 组蓝莓果实更低,且显著低于对照组果实 ($P<0.05$),表明 1.0 mmol/L 水杨酸处理对抑制货架期间蓝莓果实失重率的上升效果最佳。

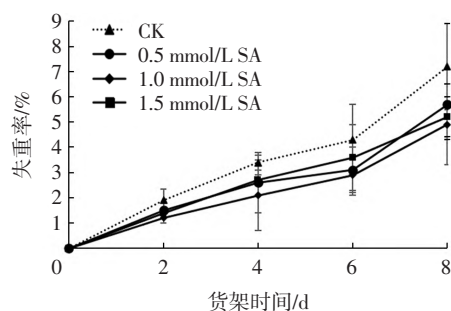


图 3 不同浓度水杨酸处理对蓝莓果实失重率的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of salicylic acid treatment on weight loss rate of blueberry fruit

2.4 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实 SSC 的影响

如图 4 所示,常温贮藏过程中,蓝莓果实 SSC 的变化趋势并不稳定,水杨酸处理组和对照组均随货架时间的延长开始上下浮动,在货架 6 d 时达到最高值。水杨酸处理组的蓝莓果实 SSC 变化幅度和速率均低于对照组。其中,1.0 mmol/L 水杨酸处理组 SSC 在货架 8 d 时显著高于对照组 ($P<0.05$),说明 1.0 mmol/L 外源水杨酸处理能较好地维持采后蓝莓

果实 SSC 的稳定。

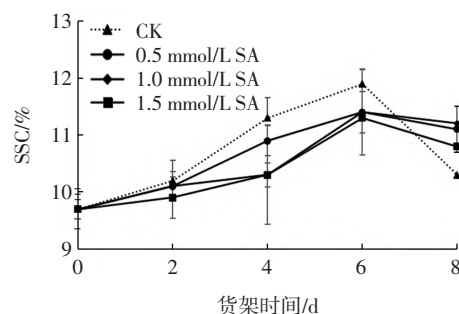


图 4 不同浓度水杨酸处理对蓝莓果实可溶性固形物含量的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of salicylic acid treatment on SSC of blueberry fruit

2.5 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实细胞壁水解酶活性的影响

根据前面试验结果显示,3 组处理中,1.0 mmol/L 水杨酸对蓝莓果实硬度、腐烂率、失重率和 SSC 的维持效果均为最佳,在实际生产过程中,1.0 mmol/L 可能为调控采后蓝莓果实软化的最适水杨酸处理浓度。因此本部分拟通过对比常温货架期间 1.0 mmol/L 水杨酸处理组和对照组的蓝莓果实 3 种细胞壁水解酶活性的变化,探讨外源水杨酸处理对蓝莓果实细胞壁降解的影响,探究 1.0 mmol/L 水杨酸对采后蓝莓果实软化的调控作用机制。

2.5.1 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实 PE 活性的影响

由图 5 可见,常温货架前期,对照组果实 PE 活性升高较快,此时对照组蓝莓果实硬度下降较快。货架 2~6 d,1.0 mmol/L 水杨酸处理组蓝莓果实 PE 活性均显著低于对照组 ($P<0.05$),与果实硬度变化呈显著负相关。由此可见,水杨酸可能通过调控蓝莓果实 PE 活性延缓果实细胞壁中果胶的分解,进一步延缓蓝莓果实软化的发生。此外,在货架 8 d 时,对照组果实 PE 活性下降,可能是由于果实过度衰老所致。

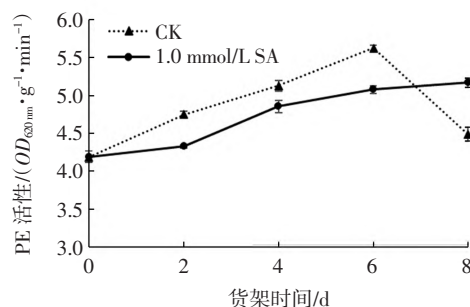


图 5 1.0 mmol/L 水杨酸处理对蓝莓果实 PE 活性的影响

Fig.5 Effect of 1.0 mmol/L concentration of salicylic acid treatment on the PE activity of blueberry fruit

2.5.2 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实 PG 活性的影响

PG 位于聚半乳糖醛酸主链,可水解果胶酸,导致果胶降解、细胞壁溶解,进而导致果实软化^[19]。如图 6 所示,采后蓝莓果实 PG 活性随着货架期的延长而不断升高。1.0 mmol/L 水杨酸处理在货架前期能有效抑制 PG 活性的上升,并于常温货架 2~8 d 显著低于对照组($P<0.05$)。由此推测,水杨酸处理可通过抑制 PG 活性,延缓蓝莓果实软化。

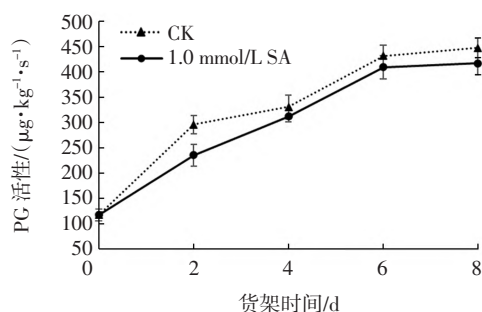


图 6 1.0 mmol/L 水杨酸处理对蓝莓果实 PG 活性的影响

Fig.6 Effect of 1.0 mmol/L concentration of salicylic acid treatment on the PG activity of blueberry fruit

2.5.3 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实 Cx 活性的影响

纤维素酶可降解植物细胞壁组分纤维素。如图 7 所示,采后蓝莓果实 Cx 活性随常温货架期延长而不断上升,货架 2~4 d,1.0 mmol/L 水杨酸处理组果实 Cx 活性始终低于对照组,但二者差异不显著。可见对蓝莓果实的软化调控可能并非由于 Cx 的变化。有研究表明,纤维素酶可能与‘京白梨’果实软化关系不大,但相关分析发现,纤维素含量与 PE 和 PG 活性呈显著负相关^[20],其确切机制尚需探讨。

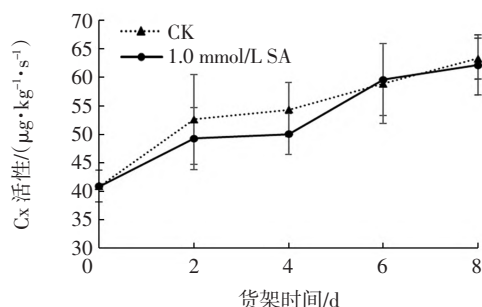


图 7 1.0 mmol/L 水杨酸处理对蓝莓果实 Cx 活性的影响

Fig.7 Effect of 1.0 mmol/L concentration of salicylic acid treatment on the Cx activity of blueberry fruit

3 讨论

水杨酸作为一种小分子植物激素,在果蔬的成熟

衰老进程中具有重要调控作用^[21],其具有安全无毒、使用方便等特点,近年来水杨酸类物质被广泛应用于农业生产中^[22]。本试验采用外源水杨酸处理采后蓝莓果实,研究其对常温货架期间果实软化的调控作用。硬度是反映果实软化程度的重要指标,从常温货架 2 d 开始,1.0 mmol/L 水杨酸处理组蓝莓果实硬度始终显著高于对照组($P<0.05$),常温货架 8 d 时果实硬度比对照组高 70%。曹森等^[23]研究表明,采前用 2.0 mmol/L 水杨酸处理‘粉蓝’蓝莓,采后于 0.5 °C 冷藏,可更好地维持蓝莓果实的贮藏品质。这表明,采前和采后水杨酸处理蓝莓果实的最适浓度不同,水杨酸处理的最适浓度也可能与贮藏温度和品种相关,这值得后续进行深入研究。腐烂率是反映果实品质的主要指标之一,水杨酸可以有效抑制果实的腐烂,与对照组相比,1.0 mmol/L 水杨酸处理可将蓝莓果实腐烂发生时间推迟 2 d,说明水杨酸处理能有效维持采后蓝莓果实品质。与对照组相比,1.0 mmol/L 水杨酸处理显著抑制了蓝莓果实 PE 和 PG 活性的升高,但对 Cx 活性的调控作用不显著,水杨酸对果实软化的调控可能是由于其调控果胶水解进而延缓了果实软化,更深层次的调控机理仍需进一步研究。未来将针对果实其他特征指标进行测定,以进一步探讨水杨酸对于蓝莓果实采后生理的调控作用,并进行多品种试验,以完善水杨酸对于蓝莓果实采后品质调控的数据基础。

4 结论

本试验结果表明,1.0 mmol/L 外源水杨酸处理能有效延缓蓝莓果实硬度降低,有效抑制蓝莓果实腐烂;与对照组相比,1.0 mmol/L 水杨酸处理可将蓝莓果实腐烂发生时间推迟 2 d,同时能有效降低果实失重率并维持蓝莓果实 SSC 稳定;1.0 mmol/L 水杨酸处理可通过抑制果实 PE 活性和 PG 活性延缓采后蓝莓果实软化。

参考文献:

- [1] 王兴东,孙斌,魏鑫,等. 辽宁省温室蓝莓病虫害发生现状与防治[J]. 北方果树, 2020(2): 47-50. DOI:10.16376/j.cnki.bfgs.2020.02.020.
- [2] GE Y H, LI X, LI C Y, et al. Effect of sodium nitroprusside on antioxidative enzymes and the phenylpropanoid pathway in blueberry fruit[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 607-612. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.05.160.
- [3] 刘绍金,卢炜乐. 我国蓝莓产业现状和发展趋势[J]. 现代园艺, 2018(22): 18. DOI:10.3969/j.issn.1006-4958.2018.22.009.
- [4] 纪淑娟,马超,周倩,等. 蓝莓果实贮藏期间软化及相关指

- 标的变化[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 341–345. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201312071.
- [5] GUO S L, SONG J, ZHANG B B, et al. Genome-wide identification and expression analysis of beta-galactosidase family members during fruit softening of peach [*Prunus persica* (L.) Batsch][J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 136: 111–123. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2017.10.005.
- [6] CHEA S, YU D J, PARK J, et al. Preharvest β -aminobutyric acid treatment alleviates postharvest deterioration of ‘Bluecrop’ highbush blueberry fruit during refrigerated[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 95–103. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.10.036.
- [7] ZHOU Q, MA C, CHENG S C, et al. Changes in antioxidative metabolism accompanying pitting development in stored blueberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88: 88–95. DOI:10.1016/j.postharvbio.2013.10.003.
- [8] YAO H J, TIAN S P. Effects of pre- and post-harvest application of salicylic acid or methyl jasmonate on inducing disease resistance of sweet cherry fruit in storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 35(3): 253–262. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2004.09.001.
- [9] ZHAN S D, DING S P, ZHANG X L, et al. Responses of reactive oxygen metabolism and quality in mango fruit to exogenous oxalic acid or salicylic acid under chilling temperature stress[J]. Physiologia Plantarum, 2007, 130(1): 112–121. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2007.00893.x.
- [10] TAREEN M J, ABBASI N A, HAFIZ I A. Postharvest application of salicylic acid enhanced antioxidant enzyme activity and maintained quality of peach cv. ‘Flordaking’ fruit during storage[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142: 221–228. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.04.027.
- [11] LU X H, SUN D Q, LI Y H, et al. Pre-and post-harvest salicylic acid treatments alleviate internal browning and maintain quality of winter pineapple fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1): 97–101. DOI:10.1016/j.scienta.2011.06.017.
- [12] LUO Z S, WU X, CHEN C. Alleviation of chilling injury and browning of postharvest bamboo shoot by salicylic acid treatment[J]. Food Chemistry, 2012, 131(2): 456–461. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.09.007.
- [13] SAYYARI M, BABALAR M, KALANTARI S, et al. Effect of salicylic acid treatment on reducing chilling injury in stored pomegranates[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 53(3): 152–154. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2009.03.005.
- [14] DONG J A, WANG G W, LIANG Z S. Accumulation of salicylic acid-induced phenolic compounds and raised activities of secondary metabolic and antioxidative enzymes in *Salvia miltiorrhiza* cell cultures[J]. Journal of Biotechnology, 2010, 148: 99–104. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2010.05.009.
- [15] HAGERMAN A E, AUSTIN P J. Continuous spectrophotometric assay for plant pectin methyl esterase[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1986, 34(3): 440–444. DOI: 10.1021/jf00069a015.
- [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: 84–90.
- [17] 张群, 舒楠, 宁密密, 等. 不同施肥处理对“东红”猕猴桃贮藏期间果实硬度及细胞壁降解的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(9): 28–37. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2022.09.005.
- [18] YANG G Y, YUE J, GONG X C, et al. Blueberry leaf extracts incorporated chitosan coatings for preserving postharvest quality of fresh blueberries[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 92: 46–53. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2014.01.018.
- [19] WEI J M, MA F W, SHI S G, et al. Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(2): 147–154. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2009.12.003.
- [20] 魏建梅, 马锋旺, 关军锋, 等. 京白梨果实后熟软化过程中细胞壁代谢及其调控[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2987–2996. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2009.08.044.
- [21] 黄铭慧, 冯舒涵, 罗姗姗, 等. 外源植物激素对园艺产品品质形成的调控作用[J]. 北方园艺, 2015(12): 178–182. DOI: 10.11937/bfy.201512047.
- [22] 任俊洁, 赵喜亭. 水杨酸类物质在果实贮藏保鲜上的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(1): 125–128, 133. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2018.01.021.
- [23] 曹森, 巴良杰, 张鹏, 等. 水杨酸对蓝莓贮藏品质及果实软化的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 337–344. DOI:10.16429/j.1009-7848.2023.07.034.

收稿日期:2023-12-25