

高温胁迫对枇杷果皮热伤害的抗氧化特性影响

邓朝军^{1,2}, 许奇志^{1,2}, 蒋际谋^{1,2*}, 魏秀清^{1,2}, 章希娟^{1,2}, 郑少泉^{1,2*}

(1. 福建省农业科学院果树研究所, 福州 350013; 2. 福建省龙眼枇杷育种工程技术研究中心, 福州 350013)

摘要: 为探讨枇杷 [*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.] 对高温胁迫的响应, 对‘红种’枇杷果皮热伤害的抗氧化特性进行研究。结果表明, 在自然光下, 枇杷果皮热伤害的阈值为 40℃ (1.5 h), 且果皮热伤害与温度和持续时间关系密切, 光照可促进热伤害的发生。枇杷果皮受热伤害程度与果实本身的营养状态有关, 果肉维生素 C (Vc)、钙(Ca)含量越低, 果皮热伤害级数越高。与 25℃相比, 40℃高温处理增加了果皮的超氧阴离子和丙二醛(MDA)含量, 而超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)的活性呈下降趋势。这揭示了高温胁迫下枇杷果皮对热伤害的抗氧化响应机制。

关键词: 枇杷; 果皮; 高温胁迫; 热伤害; 抗氧化特性

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.05.003

Changes in Antioxidant Properties Induced by Heat Injury in Loquat Peel under High Temperature Stress

DENG Chao-jun^{1,2}, XU Qi-zhi^{1,2}, JIANG Ji-mou^{1,2*}, WEI Xiu-qing^{1,2}, ZHANG Xi-juan^{1,2}, ZHENG Shao-quan^{1,2*}

(1. Fruit Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2. Fujian Breeding Engineering Technology Center for Longan & Loquat, Fuzhou 350013, China)

Abstract: In order to understand the adaptation of *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl. to high temperature stress, the peel antioxidant properties of loquat induced by heat injury were studied. The results showed that the threshold temperature of heat injury on loquat peel was 40℃ for 1.5 h under nature light, and the occurrence of peel heat injury related to temperature level and duration time. The light could promote the occurrence of heat injury. The heat injury degree of loquat peel was related to fruit nutrient status. The lower were Vc and Ca contents in pulp, the higher was the heat injury degree of peel. Under 40℃, superoxide anion and malondialdehyde (MDA) contents in peel increased, while activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) decreased. These revealed antioxidant response mechanism of loquat peel to heat injury under high temperature stress.

Key words: *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.; Peel; High temperature stress; Heat injury; Antioxidant property

果实日灼是一种常见的生理病害, 每年都给生产带来一定损失^[1-2]。迄今为止, 生产上已报道许多种园艺作物^[3-6]都存在不同程度的日灼现象, 随着水资源的短缺和全球气候变暖, 这种病害有逐年加重的趋势^[7]。Barber 等^[8]将果实日灼的原因归纳为

3 种类型: (1) 热伤害; (2) 紫外线辐射伤害; (3) 受热组织光动力学伤害。果皮热伤害主要由于强烈的阳光长时间直射在果实上, 使果皮温度上升, 破坏了照射部位的果皮细胞组织结构和生理生化代谢, 导致褐变, 严重的还会导致果实停止生长发育。研

收稿日期: 2012-02-28 接受日期: 2012-04-24

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003073); 农业科技成果转化基金项目(2010GB2C400213); 农业部作物种质资源保护项目(NB2011-2130135-08); 农业部热带作物种质资源保护项目(12RZZY); 福建省科技厅重点项目(2009R0031、2010Y1002、2011Y1002)资助

作者简介: 邓朝军(1979~), 男, 硕士, 助理研究员, 从事果树栽培育种、种质资源与生物技术研究。E-mail: dengchaojun2002@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mails: jjm2516@126.com; zsq333555@163.com

究表明,许多因素对果皮热伤害的发生都有直接或间接影响,如果实营养状态^[9]、温度^[10]和光照^[11-12]等。

高温是植物经常遭受的主要环境胁迫,对植物的伤害是一个复杂的生理过程。高温引起氧化胁迫,活性氧对膜系统造成损伤从而伤害植物^[13]。酶促清除系统在植物抗氧化胁迫中具有重要作用,主要有 POD、SOD 等抗氧化酶类^[14]。有研究表明,高温胁迫在短时间内能增加植物组织的 MDA 含量和提高 SOD、POD^[15-16]、PPO^[17]的活性;高温胁迫使植物组织的 MDA 含量、SOD 活性先升后降^[18]。

目前,有关枇杷果皮热伤害与高温胁迫对枇杷果皮抗氧化系统的影响鲜有报道。本文探讨了枇杷果肉的 Vc 和 Ca 含量与果皮热伤害等级的关系,以及温度和光照对果皮热伤害的影响,以揭示果皮抗氧化系统对高温胁迫的响应,为有效预防枇杷果皮热伤害提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 材料

试验于 2011 年 4-5 月在国家果树种质福州枇杷圃进行,供试品种为枇杷‘红种’[*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl. ‘Hongzhong’]。试验树为普砧嫁接的 6 年生结果树,树势中庸。资源圃土壤为沙壤土,常规管理,果实未套袋。

1.2 热伤害诱导温度和光照设计

在果实生长发育后期的转色阶段,选择树冠西南面外围充分暴露的果实,于晴天(平均光照强度 > 1100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)的 10:00-16:00 进行果实活体诱导,并统计热伤害的发生情况。光照处理分为自然光和黑布遮光;时间分别为 0.5 h、1 h、1.5 h、2 h;果实表面温度分别为 37℃、38℃、39℃、40℃、41℃、42℃。试验重复 3 次。

果皮热伤害诱导参考张建光等^[3]的方法稍加改进,特制一个有机玻璃诱导室(20 cm×18 cm×18 cm),没有顶盖;在诱导室的后端,安装一个加热元件和风扇组合体,以提高诱导室温度并保持其稳定。根据设计要求,果实表面温度控制在指定温度 ± 0.5 ℃以内。果皮热伤害等级按热伤害果面占总果面的比率分为 4 级:0 级为无病斑;1 级为病斑面积 $\leq 25\%$;2 级为病斑面积 25%~50%;3 级为病斑面积 $\geq 50\%$ 。

1.3 果肉 Vc 和 Ca 含量测定

采集不同果皮热伤害程度的枇杷果实,立即取果肉,放入 -80℃ 超低温冰箱冷冻,备用。

Vc 含量测定采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[19];Ca 含量测定采用张强等^[20]的方法。重复 3 次。

1.4 高温胁迫下的生理生化指标测定

枇杷果实发育后期的转色阶段,用枇杷果实高温诱导仪进行高温胁迫诱导(遮光处理),在 25℃ 和 40℃ 下分别诱导 0.5 h、1 h、3 h、5 h、7 h 后,测量果皮 MDA 含量、超氧阴离子含量、SOD 活性、POD 活性、PPO 活性。

高温胁迫后统计病情指数,并立即剥取果皮(包括表皮及近表皮少部分果肉组织)放入 -80℃ 超低温冰箱中冷冻备用。

$$\text{热伤害病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病果数} \times \text{各级代表值})}{\text{调查总数} \times \text{最高级代表值}} \times 100$$

MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[19],称取果皮 1.0 g,加入 2 mL 10% 三氯乙酸(TCA 研磨),4000×g 匀浆离心 10 min,取上清液 2 mL,加入 2 mL 0.6% TBA 溶液,沸水浴 15 min,迅速冷却后 4000×g 离心 10 min,取上清液在 532 nm、600 nm 和 450 nm 波长下测定消光度,计算 MDA 含量,用 $\mu\text{mol g}^{-1}$ DW 表示。

超氧阴离子含量测定参照王爱国等^[14]的方法。称取果皮 3.0 g,用 10 mL 65 mmol L⁻¹ 磷酸缓冲液(pH 7.8)研磨。在 4℃ 下 4000×g 离心 10 min。取上清液 2 mL,加入磷酸缓冲液 1.5 mL 和盐酸羟胺 0.5 mL,25℃ 恒温水浴培养 20 min。取培养液 2.0 mL,依次加入 2.0 mL 17 mmol L⁻¹ 对氨基苯磺酸和 2.0 mL 7 mmol L⁻¹ α -萘胺,在 30℃ 恒温水浴中反应 30 min,然后测定显色液在 530 nm 波长处吸光度值,计算超氧阴离子含量,用 $\mu\text{g g}^{-1}$ DW 表示。

PPO 活性测定采用邻苯二酚法^[21]。以每分钟 OD_{398 nm} 变化 0.01 为 1 个酶活性单位,用 U g⁻¹ DW min⁻¹ 表示。SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[19],以抑制 NBT 光化还原的 50% 为 1 个酶活性单位,用 U g⁻¹ DW 表示。POD 活性测定采用愈创木酚法^[19],以每分钟 OD_{470 nm} 变化 0.01 为 1 个酶活性单位,用 U g⁻¹ DW min⁻¹ 表示。

2 结果和分析

2.1 温度和光照对果皮热伤害的影响

枇杷果实发育后期的转色阶段,在自然光和 $\leq 39^\circ\text{C}$ 下持续热处理‘红种’枇杷果实 2 h,未见热伤害症状发生。当诱导温度提高至 40°C ,诱导 1.5 h 开始出现热伤害症状;处理温度为 41°C 时,诱导 1 h 就出现热伤害症状; 42°C 诱导 0.5 h 就发生热伤害症状。在遮光和 $\leq 40^\circ\text{C}$ 下持续热处理 2 h,均未见热伤害症状; 41°C 、 42°C 诱导 1.5 h 发生热伤害。说明在自然光照下‘红种’枇杷果实发生热伤害的温度阈值是 40°C (1.5 h),在遮光条件下是 41°C (1.5 h);而且,果皮热伤害的发生与温度高低和持续时间关系密切。光照在一定程度上可促进热伤害的发生,这与 Felicetti 等^[22-23] 研究结果一致。

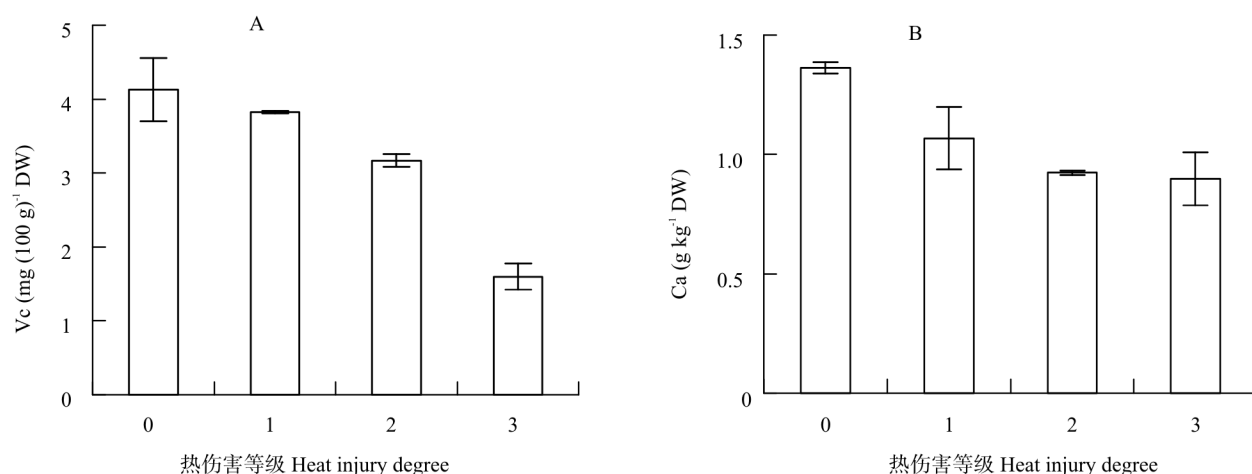


图1 枇杷果皮热伤害等级与果肉Vc、Ca含量的关系

Fig. 1 Relationship of heat injury degree of loquat peel with Vc and Ca contents

2.4 高温胁迫下MDA含量的变化

MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物,是反映细胞膜系统受害程度的重要指标之一。由图 2: A 可知, 25°C 处理的枇杷果皮 MDA 含量变化不大,仅下降了 $1.9 \times 10^{-3} \mu\text{mol g}^{-1} \text{DW}$;而 40°C 高温胁迫处理,果皮 MDA 含量呈先上升后下降的趋势。 40°C 处理 1 h,果皮 MDA 含量达最大,为 $10.46 \times 10^{-3} \mu\text{mol g}^{-1} \text{DW}$,此后快速下降,处理 3 h 含量仅为 $8.37 \times 10^{-3} \mu\text{mol g}^{-1} \text{DW}$,处理 5 h 的 MDA 含量最低,为 $8.07 \times 10^{-3} \mu\text{mol g}^{-1} \text{DW}$ 。

2.5 高温胁迫下超氧阴离子含量的变化

从图 2: B 可见, 25°C 处理的枇杷果皮超氧阴离子含量变化不大,仅上升了 $0.86 \mu\text{g g}^{-1} \text{DW}$ 。

2.2 果肉Vc含量与果皮热伤害的关系

由图 1: A 可见,在发生果皮热伤害的果实中,果肉 Vc 含量随着热伤害等级的提高而下降,热伤害 0 级的果肉 Vc 含量最高,为 $4.13 \text{ mg (100 g)}^{-1} \text{DW}$,热伤害 3 级的果最低,为 $1.60 \text{ mg (100 g)}^{-1} \text{DW}$ 。可见,枇杷果肉 Vc 含量越低果皮热伤害越严重。

2.3 果肉Ca含量与果皮热伤害等级的关系

Ca 能维持细胞膜结构的稳定性^[13]。从图 1: B 可见,果皮热伤害严重(3级)的病果,其果肉的 Ca 含量较低,仅 $0.90 \text{ g kg}^{-1} \text{DW}$;果皮没有发生热伤害(0级)的果实,其果肉 Ca 含量为 $1.36 \text{ g kg}^{-1} \text{DW}$ 。可见,果肉 Ca 含量越低,枇杷果皮热伤害越严重。

40°C 处理的果皮超氧阴离子含量呈现先上升后下降的变化趋势,处理 1 h 时的超氧阴离子含量升高到 $6.49 \mu\text{g g}^{-1} \text{DW}$,处理 3 h 后迅速下降,为 $5.23 \mu\text{g g}^{-1} \text{DW}$,此后持续下降。因此,高温胁迫能快速诱导枇杷果皮超氧阴离子产生。

2.6 高温胁迫下SOD活性的变化

SOD 是一种典型的诱导酶,能反映植株受胁迫的程度。从图 2: C 可知, 25°C 处理的枇杷果皮 SOD 活性升高 $10.74 \text{ U g}^{-1} \text{DW}$ 。 40°C 处理 0.5 h 的 SOD 活性为 $60.93 \text{ U g}^{-1} \text{DW}$,处理 3 h 为 $91.97 \text{ U g}^{-1} \text{DW}$,此后迅速下降,且低于 25°C 处理。这说明,果皮经 40°C 高温胁迫 3 h 以内能够诱导 SOD 活性迅速上升,但随着时间延长 SOD 活性下降,果皮的抗性也下降。

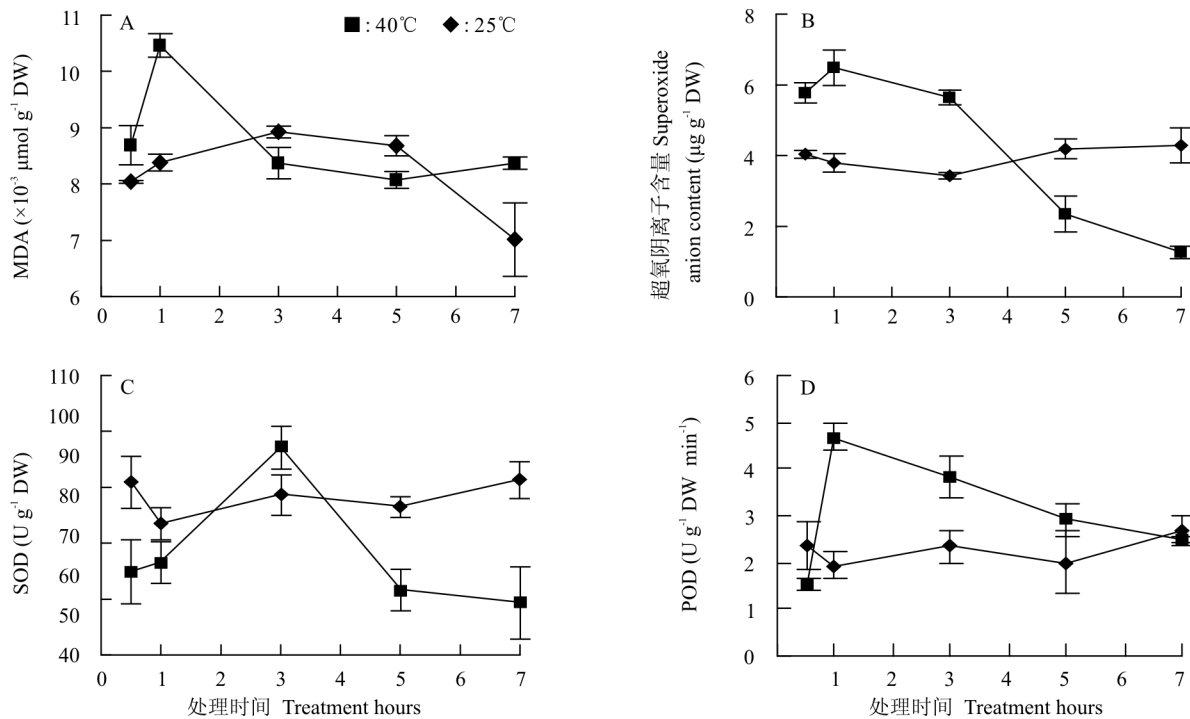


图2 高温胁迫下枇杷果皮的MDA、超氧阴离子含量和SOD、POD活性的变化

Fig. 2 Changes in MDA, superoxide anion content, SOD and POD activities in loquat peel under high temperature stress

2.7 高温胁迫下POD活性的变化

POD活性是反映植株受胁迫程度的指标之一。从图2:D可见, 25°C处理的枇杷果皮POD活性变化不大, 而40°C处理1h, POD活性急剧升高至最大, 为 $4.68 \text{ U g}^{-1} \text{ DW min}^{-1}$, 之后POD活性迅速下降, 5h后缓慢下降。

2.8 高温胁迫下PPO活性的变化

PPO是广泛存在于植物体内的多功能酶, 它能催化多酚类化合物氧化成醌类化合物, 引起果皮褐变, 出现热伤害症状。温度对果实表皮PPO活性的变化有很大影响(图3)。25°C下, 果皮PPO活性变化

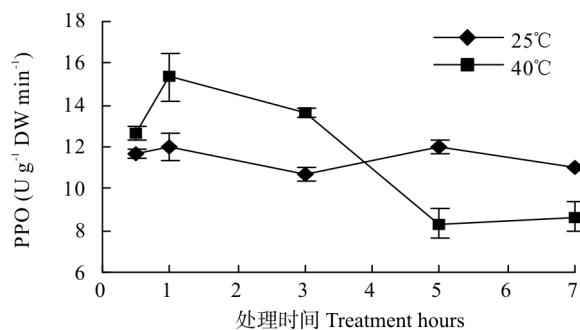


图3 不同温度胁迫下枇杷果皮PPO活性变化

Fig. 3 Changes in PPO activity in loquat peel under different temperature stress

不大, 变化幅度为 $10.67\sim 12.00 \text{ U g}^{-1} \text{ DW min}^{-1}$ 。40°C处理1h果皮PPO活性升高, 为 $15.33 \text{ U g}^{-1} \text{ DW min}^{-1}$, 热伤害症状开始出现, 随后PPO活性迅速下降, 5h降到最低, 为 $8.33 \text{ U g}^{-1} \text{ DW min}^{-1}$, 说明果皮热伤害与高温胁迫下PPO活性有密切关系。

2.9 高温胁迫下果皮热伤害病情指数的变化

由表1可见, 不同处理温度和时间对枇杷果皮热伤害病情指数影响不同。25°C处理7h的果皮均无热伤害发生。40°C高温胁迫1h, 果皮开始出现热伤害症状, 病情指数为22.2%, 热伤害等级为0~1级; 随着胁迫时间的延长, 热伤害症状越来越明显, 发病等级越来越高, 7h后发病等级均为3级, 病情指数为100。因此, 枇杷果皮热伤害与MDA含量、超氧阴离子含量及SOD活性、POD活性、PPO活性存在密切关系。

表1 不同处理温度和时间对枇杷果皮热伤害病情指数的影响

Table 1 Effect of treatment temperature and time on heat injury disease index of loquat peel

温度 (°C)	时间 Hours				
Temperature	0.5	1	3	5	7
25	0	0	0	0	0
40	0	22.2	55.5	77.8	100

3 讨论

枇杷果皮热伤害给果品生产造成了很大损失。Felicetti等^[22-23]报道果实表面的高温是造成果皮热伤害的主要原因,认为果实表面温度比气温高,增加的温度是由光照引起的。我们的调查也表明,在枇杷果实发育后期(5月初)有阳光的天气中,枇杷果实表面温度比气温高 1.2℃~6.1℃(另文发表)。枇杷果实活体诱导试验表明,在遮光情况下,果皮在相同温度下不会出现热伤害症状,果皮热伤害只有在果面临界温度出现时才会发生。由此可以认为,高温和光照均是引起果皮热伤害发生的主要因子,二者共同作用使果皮温度达到热伤害所需的阈值温度,从而发生热伤害。

果皮热伤害的发生与果实营养状态有很大关系^[9]。本研究结果表明,果皮发生热伤害的果肉 Vc 含量、Ca 含量越低,果皮受伤害程度级数越高。Vc 在植物抵抗氧化胁迫中具有重要作用, Ca 能维持细胞膜结构的稳定性,枇杷果实的 Vc 含量和 Ca 含量越高,对枇杷果皮热伤害的抗性就越强。

植物对高温逆境的适应主要反映在细胞膜上^[13]。高温胁迫下,膜脂损伤主要是超氧阴离子自由基的大量产生,保护酶活性下降,膜脂过氧化过程加剧,最终使生物膜选择性透性丧失,同时产生的过氧化物 MDA 等有毒物质,进一步破坏生物大分子的结构和功能^[24]。孙山^[11]报道苹果(*Malus domestica*)在高温胁迫下,果皮的 SOD、POD 活性在最初阶段呈上升趋势,但随着处理时间的延长,活性下降。本研究结果表明,在处理的前期随着高温胁迫时间的延长,超氧阴离子含量和 MDA 含量呈增加趋势,其含量在 1 h 达到最大值,随后下降; SOD 和 POD 在处理 3 h 和 1 h 的活性最高,然后迅速下降并低于对照;这可能是植物在逆境中,体内活性氧积累,从而诱发体内活性氧清除酶 SOD 和 POD 活性的增加,以清除过多的活性氧对细胞的伤害作用,同时 MDA 含量增加,果实受高温伤害的程度加大。因此可以认为,枇杷果皮热伤害的原因之一是由于高温胁迫下,超氧阴离子含量增加,保护酶 SOD 和 POD 活性下降及 MDA 含量增加,细胞的膜脂过氧化程度加重,导致果皮的热伤害程度增加。

果皮热伤害的症状有多种,最常见的就是在果实表面发生褐变,极大地影响果实的商品价值。

PPO 为广泛存在于植物体内的多功能酶类,它能催化多酚类化合物氧化成醌类化合物,引起果实褐变。高温胁迫 1 h 的枇杷果皮 PPO 活性明显增强,果皮的热伤害症状出现,此后 PPO 活性逐渐下降,这可能是在高温胁迫前期果皮膜脂过氧化速度加快,细胞膜受损严重,膜透性增大,酶促反应活性增大,后期 PPO 酶和酚类底物含量下降,酶促反应活性变小。可见,果皮热伤害产生的褐变与高温胁迫下 PPO 活性有密切联系。本研究结果为今后制定适宜的枇杷果皮抗热害预防措施提供了理论依据。

致谢 本文得到福建农林大学生命科学学院陈伟老师悉心指导和盖永红研究生的无私帮助,在此表示感谢!

参考文献

- [1] Van de Ende B. Sunburn management [J]. *Compact Fruit Tree*, 1999, 32(1): 13-14.
- [2] Schrader L E, Kahn C, Elfving D C. Sunburn browning decreases at-harvest internal fruit quality of apples (*Malus domestica* Borkh.) [J]. *Inter J Fruit Sci*, 2009, 9(4): 425-437.
- [3] Zhang J G, Liu Y F, Sun J S, et al. Studies on artificial induction and threshold temperatures of apple fruit sunburn [J]. *Acta Hort Sin*, 2003, 30(4): 446-448.
张建光, 刘玉芳, 孙建设, 等. 苹果果实日灼人工诱导技术及阈值温度研究 [J]. *园艺学报*, 2003, 30(4): 446-448.
- [4] Zhang J G, Li Y L, Liu Y F, et al. Effects of high temperature and strong light on oxidative stress of apple fruit peel on different exposures of tree crown [J]. *Sci Agri Sin*, 2004, 37(12): 1976-1980.
张建光, 李英丽, 刘玉芳, 等. 高温、强光对苹果树冠不同方位果皮的氧化胁迫研究 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1976-1980.
- [5] Zhang H Y, Wang S G, Mu Q Y, et al. Effect of bagging on the peel structure and PPO, POD activity of *Pyrus bretschneideri* [J]. *Acta Hort Sin*, 1996, 23(1): 23-26.
张华云, 王善光, 牟其芸, 等. 套袋对莱阳茌梨果皮结构和 PPO、POD 活性的影响 [J]. *园艺学报*, 1996, 23(1): 23-26.
- [6] Ma K Y, Cheng F H, Fu Y H, et al. The development of fruit dot and russetting in 'Yali' pear [J]. *Acta Hort Sin*, 1995, 22(3): 295-296.
马克元, 程福厚, 傅玉瑚, 等. 鸭梨果实果点和锈斑的发育 [J]. *园艺学报*, 1995, 22(3): 295-296.
- [7] Wang J P. Effect of high-temperature and excessive-light stresses on antioxidant capacity in apple fruits [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010: 1-39.
王静璞. 高温、强光胁迫对苹果果实抗氧化能力的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2010: 1-39.
- [8] Barber H N, Sharpe P J H. Genetics and physiology of sunscald

- of fruits [J]. *Agri Meteorol*, 1971(8): 175–191.
- [9] Kuai C H, Yang C X, Liu S J, et al. Advances in research on fruit sunburn of deciduous fruit crops [J]. *J Fruit Sci*, 2008, 25(6): 901–907.
蒯传化, 杨朝选, 刘三军, 等. 落叶果树果实日灼病研究进展 [J]. *果树学报*, 2008, 25(6): 901–907.
- [10] Schupp J R, Fallahi E, Chun I J. Effect of particle film on fruit sunburn, maturity and quality of ‘Fuji’ and ‘Honeycrisp’ apples [J]. *Hort Techn*, 2002, 12(1): 87–90.
- [11] Sun S. Study on photosynthetic characteristics and mechanism of sunburn in green peel of apple fruit [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2009: 1–4.
孙山. 苹果绿色果皮光合生理特性及果皮灼伤机制的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2009: 1–4.
- [12] Gindaba J, Wand S J E. Comparative effects of evaporative cooling, Kaolin particle film, and shade net on sunburn and fruit quality in apples [J]. *HortScience*, 2005, 40(3): 592–596.
- [13] Yu S W, Tang Z C. *Plant Physiology and Molecular Biology* [M]. Beijing: Science Press, 2001: 721–730.
余叔文, 汤章城. *植物生理与分子生物学* [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 721–730.
- [14] Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants [J]. *Plant Physiol Commun*, 1990(6): 55–57.
王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系 [J]. *植物生理学通讯*, 1990(6): 55–57.
- [15] Tian Z G, Wang F, Zhang W E, et al. Effects of heat stress on growth and physiology of marigold cultivars [J]. *Acta Hort Sin*, 2011, 38(10): 1947–1954.
田治国, 王飞, 张文娥, 等. 高温胁迫对孔雀草和万寿菊不同品种生长和生理的影响 [J]. *园艺学报*, 2011, 38(10): 1947–1954.
- [16] Yin H, Chen Q M, He X L, et al. Effects of high temperature on the activities of antioxidant enzymes in lily plants [J]. *Acta Hort Sin*, 2007, 34(2): 509–512.
尹慧, 陈秋明, 何秀丽, 等. 短暂高温对百合植株抗氧化酶系统的影响 [J]. *园艺学报*, 2007, 34(2): 509–512.
- [17] Shao L, Liu G L, Li Y Y, et al. Comparison of physiological characteristics in leaves of *Amaranthus tricolor* L. ‘Red flower’ and ‘Green leaf’ under high temperature [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2009, 17(4): 378–382.
邵玲, 刘光玲, 李芸瑛, 等. 高温下花红苋和绿叶苋叶片生理特性变化的比较 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2009, 17(4): 378–382.
- [18] Huang W W, Zhang N N, Hu T X, et al. Effects of high-temperature stress on physiological characteristics of leaves of *Simmondsia chinensis* seedlings from different provenances [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(23): 7047–7055.
黄巍巍, 张念念, 胡庭兴, 等. 高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7047–7055.
- [19] Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164–169, 260, 246–248.
李合生. *植物生理生化实验原理和技术* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164–169, 260, 246–248.
- [20] Zhang Q, Wei Q P, Jiang R S, et al. Correlation analysis of fruit mineral nutrition contents with several key quality indicators in ‘Fuji’ apple [J]. *Acta Hort Sin*, 2011, 38(10): 1963–1968.
张强, 魏钦平, 蒋瑞山, 等. 富士苹果矿质营养含量与几个主要品质指标的相关性分析 [J]. *园艺学报*, 2011, 38(10): 1963–1968.
- [21] Wang X K. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 169–173.
王学奎. *植物生理生化实验原理和技术* [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 169–173.
- [22] Felicetti D A, Schrader L E. Changes in pigment concentrations associated with the degree of sunburn browning of ‘Fuji’ apple [J]. *J Amer Soc Hort Sci*, 2008, 133(1): 27–34.
- [23] Felicetti D A, Schrader L E. Changes in pigment concentrations associated with sunburn browning of five apple cultivars: II. Phenolics [J]. *Plant Sci*, 2009, 176(1): 84–89.
- [24] Su W A. *Adaptation to Temperature Adversity of Plants* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 731–732.
苏维埃. *植物对温度逆境的适应* [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 731–732.