

热激结合臭氧熏蒸对“涟红”蜜桔采后品质的影响
The effect on the postharvest qualities of ‘Lianhong’ citrus fruit by using
heat shock combined with ozone fumigation

江 靖^{1,2,3} 朱向荣^{1,2,3} 苏东林^{2,3} 付复华^{1,2,3}
JIANG Jing^{1,2,3} ZHU Xiang-rong^{1,2,3} SU Dong-lin^{2,3} FU Fu-hua^{1,2,3}
张菊华^{1,2,3} 李高阳^{1,2,3} 单 杨^{1,2,3}
ZHANG Ju-hua^{1,2,3} LI Gao-yang^{1,2,3} SHAN Yang^{1,2,3}

(1. 湖南大学研究生院隆平分院, 湖南 长沙 410125; 2. 果蔬贮藏加工与质量安全湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410125; 3. 湖南省农产品加工研究所, 湖南 长沙 410125)

(1. Longping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha, Hunan 410125, China;

2. Hunan Key Lab of Fruits & Vegetables Storage, Processing, Quality and Safety, Changsha, Hunan 410125, China;

3. Hunan Agricultural Product Processing Institute, Changsha, Hunan 410125, China)

摘要:以柑橘加工品种“涟红”蜜桔为材料,在低温(4℃)条件下,研究热激处理(Heat shock, HS)结合臭氧熏蒸(Ozone fumigation, OF)技术对其采后贮藏品质的影响。在52℃热水下,浸泡3 min;再采用臭氧气体(浓度为6 mg/m³)熏蒸15 min,进行低温贮藏。在贮藏期120 d内,每隔30 d采样并对柑橘果实的呼吸强度、失水率、可溶性固形物、可滴定酸、V_C、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等生理和品质指标进行测定。结果表明,热激结合臭氧处理作为一种绿色安全的复合保鲜技术,可显著增强柑橘果实抗氧化酶活,有效地降低腐烂率,保持柑橘果实品质,延长货架期。

关键词:柑橘;采后品质;低温;热激;臭氧熏蒸

Abstract: Effects of heat shock combined with ozone fumigation at low temperature atmosphere were investigated on the storage quality and fruit physiological index of citrus processing varieties (‘Lianhong’ citrus fruit). The fruit was stored in cold storage at 4℃ and 90% relative humidity (RH), after treated with hot water (52℃, 3 min) and 6.0 mg/m³ of ozone for 15 min. Respiratory intensity, water loss rate, total soluble solids content (SSC), titratable acid (TA), ascorbic acid (V_C), superoxide dismutase

(SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activity were determined. The result showed that the combined treatment could enhance significantly the SOD, POD and CAT activities. At the meanwhile, it is effectively maintain the qualities of citrus fruit. These results indicate that the combined preservation method as a green and safe technique for controlling rotten rates and extending shelf-life.

Keywords: Citrus; postharvest quality; cold temperature; heat shock; ozone fumigation

柑橘是全世界第一大水果,在中国南方和世界各地均有大量种植。目前,中国柑橘的栽培面积和产量均居世界前列。柑橘罐头是中国柑橘加工的主导产品和最有竞争力的产品,同类产品占国际市场的80%份额。加工型柑橘原料是柑橘工业发展的基础,原料在采后由于贮藏方式不当,易产生青霉病、绿霉病和酸腐病等病害,造成腐败变质和营养成分损失,商品价值降低^[1]。目前柑橘加工原料的腐烂率高达20%~30%,造成原料供应不足,导致后续的罐头加工能力不足,给企业带来经济损失。因此,急需采用贮藏保鲜手段延长柑橘原料供应周期,保证罐头产品品质;同时,提高设备的利用率,创造更多的经济效益。

目前,柑橘的主要贮藏方式是采用常温通风贮藏和低温贮藏^[2],单一的处理对延长柑橘货架期的作用有限。热激处理作为一种无污染、无残留、绿色环保等特点的保鲜技术,用于椪柑^[3]、龙眼^[4]、枇杷^[5]、柿果^[6]、黄瓜^[7]、鲜切莴笋^[8]和鲜切生菜^[9]等果蔬采后保鲜的研究。热激处理可明显降低果蔬病害发生率,保持果实采后品质。臭氧是一种带刺激性气味、不稳定的气体,在空气中会自行分解为氧气,无任何残留

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(编号:2017YFD0401303);湖南省长株潭国家自主创新示范区专项(编号:2018XK2006);湖南省知识产权战略化项目(编号:2018Z066M);湖南省农业科学院科技创新项目(编号:2017JC67,2017GC03,2018ZD04-1)

作者简介:江靖,女,湖南大学研究生院隆平分院在读硕士研究生。
通信作者:朱向荣(1978—),男,湖南省农业科学院副研究员,博士。
E-mail:xiangrongchu@163.com

收稿日期:2018-07-09

物,且具有强氧化性和强杀菌能力。臭氧能在一定程度抑制呼吸,保持硬度,降低腐烂率,降解果皮表面的微生物农药残留^[10],臭氧用于柑橘^[11]、梨^[12]、桑葚^[13]、蓝莓^[14]和甜瓜^[15]的采后处理。但热激与臭氧协同处理方法用于果蔬采后贮藏保鲜研究尚未见报道。本研究拟采用热激处理结合臭氧熏蒸用于加工型柑橘品种“涟红”蜜桔贮藏保鲜处理,为柑橘原料贮藏保鲜提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

温州蜜桔:“涟红”品种,采自湖南永州果秀食品有限公司果园;

草酸、氢氧化钠、三氯乙酸、磷酸、双氧水、愈创木酚、甲硫氨酸、EDTA、氮蓝四唑、核黄素:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

V_c标准品:含量 99.7%,中国药品生物制品检定所;
甲醇:色谱纯:美国 Honeywell 公司;
超纯水:实验室自制。

1.2 主要仪器设备

手持式糖酸度测定仪:PAL-ACID1 型,日本 Atago 公司;

呼吸速率测定仪:LI-6262 型,美国 LI COR 公司;
紫外分光光度计:UV-1800 型,岛津(苏州)仪器有限公司;

臭氧发生器装置:L-1000 型,天津绿达保鲜工程技术研究中心;

液相色谱仪:LC-20A 型,配自动进样器、紫外检测器和 Shim-pack VP-ODS C₁₈ 色谱柱(150 mm×4.6 mm×5 μm),日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 保鲜处理

(1) 产地处理:挑选大小和形状一致、颜色均匀、无瑕疵及机械损伤的果实,进行产地预冷,温度设置为(13±1)℃,时间为 12 h;预冷完毕,运回实验室进行处理。

(2) 热激处理:处理组为 3 个平行,每平行 30 个果,浸于 52℃热水中 10 min,自然风干后,用打孔保鲜袋装好,置于 4℃冷库中贮藏。

(3) 臭氧处理:将经热激处理和未经热激处理的柑橘果实,装入塑料框,每框 30 个,分为 6 框,放入臭氧气体浓度为 6 mg/m³ 的熏蒸装置中,熏蒸 15 min(4℃,相对湿度为 90%),熏蒸完,置于 4℃冷藏。

(4) 复合处理:按照 1.3.1(2)热激处理后,再按 1.3.1(3)进行臭氧处理。处理完毕,置于 4℃冷藏。

(5) 对照组:不采取任何处理,直接置于 4℃冷库中贮藏。

1.3.2 可溶性固形物和可滴定酸度测定 柑橘原料去皮榨汁后,用手持糖酸度仪首先测定可溶性固形物含量,果汁稀释 50 倍后,再测定可滴定酸度。

1.3.3 V_c含量测定 将柑橘去皮榨汁过滤,称取 5 g 果肉滤

液于 25 mL 的容量瓶中,用 0.1% 的草酸溶液定容,用 0.45 μm 滤膜过滤。流动相为 0.1% 的草酸溶液,流速设为 1 mL/min,检测波长设为 254 nm,进样量为 5 μL,柱温 35℃。

1.3.4 呼吸强度测定 称取 4 个柑橘果实质量,置于密封塑料盒,连接呼吸测定仪,1 min 后,待仪器稳定后开始读数,分别读取 1,3,5 min 的 CO₂ 浓度。呼吸强度以单位质量的果实单位时间内释放 CO₂ 的量表示[mg/(kg·h·FW)]。

1.3.5 失水率测定 采用称量法,测出贮藏前后单个柑橘果实的质量,按式(1)计算失水率。

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1}, \tag{1}$$

式中:
W——失水率,%;
m₁——贮藏前单果质量,g;
m₂——贮藏后单果质量,g。

1.3.6 好果率计算

$$G = \frac{n_1}{n_2} \times 100\%, \tag{2}$$

式中:
G——好果率,%;
n₁——好果数;
n₂——总果数。

1.3.7 酶活测定 根据文献[16]的方法分别对超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化酶(peroxidase, POD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)的活性进行测定。

1.3.8 数据处理 采用 Origin 7.5 软件制图和分析数据,利用 Duncan’S Multiple Range Test 对差异显著性进行分析。

2 结果与分析

2.1 对柑橘呼吸强度的影响

呼吸强度是果实采后生理中最重要的指标之一,从图 1 中可以看出,贮藏初期,各组呼吸强度较低,从第 30 天开始,呈明显上升趋势,CK 在第 60 天达到呼吸高峰,热激处理的果实呼吸高峰比 CK 下降 8.1%,臭氧熏蒸的果实呼吸高峰比 CK 下降 10.3%。通过热激与臭氧熏蒸复合处理的果实

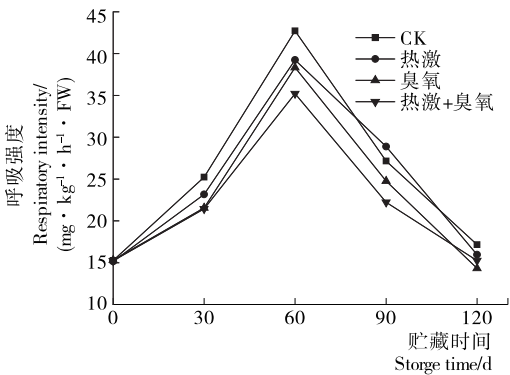


图 1 处理方法对呼吸强度的影响

Figure 1 The effects on respiratory intensity using different treatment methods

呼吸峰值比 CK 下降 17.6%；且复合处理在整个贮藏期 (120 d) 内,呼吸强度均低于 CK。

2.2 对柑橘好果率的影响

热激和臭氧熏蒸以及复合处理均能够提高采后柑橘果实抗病性,保持较好的品质 and 好果率。从图 2 可以看到,贮藏期内对照组柑橘的好果率不断下降。热激和臭氧组柑橘在 30 d 后好果率开始下降,而热激加臭氧复合处理组柑橘在第 30 天后才开始缓慢下降,且复合处理组比单一处理技术的好果率要高。在整个贮藏期,对照组柑橘的好果率显著低于复合处理组 ($P<0.05$)。可见,热激协同臭氧处理有助于提高柑橘贮藏期的好果率。

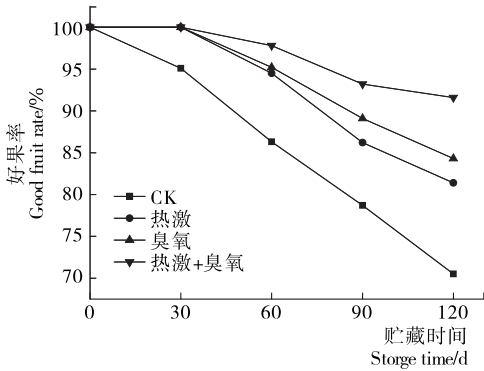


图 2 采用不同处理方法对好果率的影响

Figure 2 The effects on good fruit rate using different treatment methods

2.3 对柑橘失水率的影响

由图 3 可见,贮藏期间果实的失水率逐渐增加。贮藏 30 d 时,与 CK 相比,3 个处理组失水率相差不大;贮藏 60 d 时,CK 组失水率较贮藏 30 d 时增加 0.76%,但各组差异不显著,说明此时柑橘表皮蜡质结构相对完整,能够保持水分少散失;贮藏 120 d 时,对照组果实的失水率严重,较贮藏 30 d 时增加 4.86%,显著高于热激+臭氧处理组 ($P<0.05$)。贮藏 120 d 时,CK、热激、臭氧和热激+臭氧的失水率分别为 5.71%,3.43%,2.52%,1.73%,复合处理组失水率最低。这表明就长期贮藏而言,热激协同臭氧处理可更好地防止果实低温冷藏过程中的失水萎缩,臭氧和热激单一处理效果次

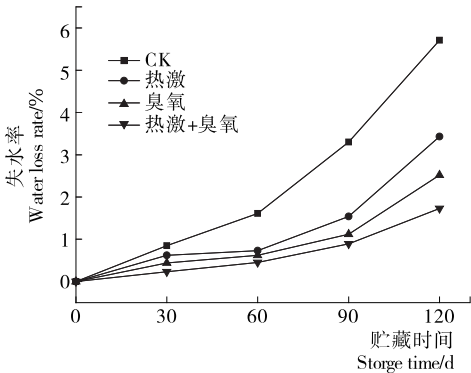


图 3 处理方法对失水率的影响

Figure 3 The effects on water loss rate using different treatment methods

之,但比 CK 效果要好。

2.4 对柑橘可溶性固形物(SSC)含量的影响

柑橘的贮藏保鲜过程分为三个阶段即成熟期、过熟期以及腐烂期^[17]。由图 4 可知,贮藏过程中,所有处理柑橘果实的 SSC 含量呈先升后降的变化趋势,贮藏前 60 d,所有处理组的 SSC 含量均升高;贮藏 90 d 时,果实的 SSC 含量均降低,但热激+臭氧处理组 SSC 下降趋势明显缓于其他 3 组,含量仅下降了 2.9%。贮藏 120 d 时,CK、热激、臭氧和热激+臭氧处理组 SSC 分别为 9.8%,10.5%,10.2%,12.5%。综上所述,热激协同臭氧处理可显著延缓贮藏期间柑橘果实 SSC 含量的下降,保持柑橘风味,可能是热激结合臭氧处理进一步抑制果实的呼吸作用,减少糖类及其他物质的消耗,延长果实的贮藏时间^[12, 18]。

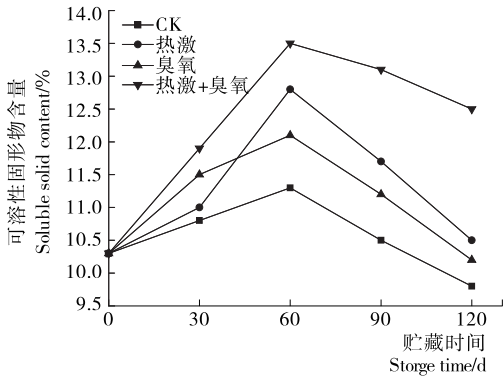


图 4 处理方法对可溶性固形物的影响

Figure 4 The effects on soluble solid content using different treatment methods

2.5 对柑橘可滴定酸(TA)含量的影响

TA 是果实的呼吸底物,TA 可以维持能量代谢以保持柑橘的特殊风味^[19]。由图 5 可知,在贮藏期间,4 组中的 TA 含量均逐渐下降,CK 组的 TA 下降趋势较其他 3 组更明显。贮藏 60 d 时,CK、热激、臭氧和热激+臭氧的 TA 含量较贮藏 30 d 时分别下降 20.7%,13.8%,10.3%,9.5%,其中 CK 中 TA 含量变化显著高于热激+臭氧组 ($P<0.05$)。贮藏 120 d 时,4 组中 TA 含量分别为 0.38%,0.46%,0.48%,0.51%,热激+臭氧组和 CK 组二者差异显著 ($P<0.05$),TA

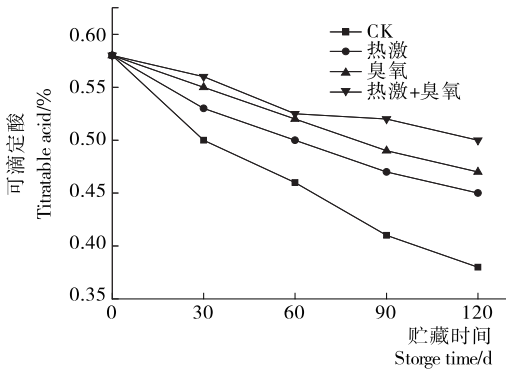


图 5 处理方法对可滴定酸的影响

Figure 5 The effects on titratable acid using different treatment methods

含量较贮藏 0 d 时分别下降 13.8%和 34.5%。表明热激协同臭氧处理可减少有机酸向糖类物质转化,减缓柑橘果实 TA 含量的下降。

2.6 对柑橘 Vc 含量的影响

由图 6 可见,在 120 d 贮藏期间,CK 和处理组中果实的 V_C 含量均呈下降趋势,原因可能是随着贮藏时间延长,柑橘中抗坏血酸氧化酶(AAO)活性增强,导致 V_C 含量逐渐降低^[20]。在贮藏前 60 d,V_C 含量下降较快,在后 60 d,V_C 含量下降较缓慢。热激协同臭氧处理的柑橘果实贮藏 60 d 时,果实的 V_C 含量下降最慢,较 0 d 时降低了 12.9%,CK、热激、臭氧熏蒸 V_C 含量分别下降了 23.9%,21.7%,16.2%。贮藏 120 d 时,4 组中 V_C 含量最高和最低的分别为热激+臭氧处理和 CK 组,分别为 19.32,16.88 mg/100 g,二者差异显著(P<0.05)。

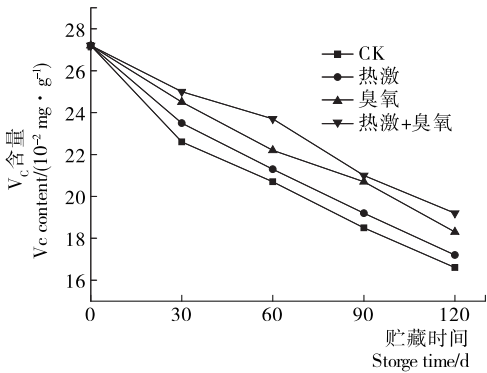


图 6 处理方法对 V_C 含量的影响

Figure 6 The effects on V_C content using different treatment methods

表 1 处理方法对抗氧化酶活性的影响[†]

Table 1 The effects on activities of antioxidant enzymes using different treatment methods

处理方法	SOD 活性/(U · g ⁻¹ · FW)		POD 活性/(△OD · g ⁻¹ · FW · min ⁻¹)		CAT 活性/(mg H ₂ O ₂ · g ⁻¹ · FW · min ⁻¹)	
	60 d	120 d	60 d	120 d	60 d	120 d
CK	10.43±0.82 ^a	6.15±1.08 ^a	5.83±0.41 ^a	1.25±0.36 ^a	125.71±4.68 ^a	60.15±3.91 ^a
热激	11.27±1.13 ^a	7.63±0.84 ^b	3.61±0.65 ^b	2.74±0.42 ^b	138.23±2.53 ^b	90.22±5.13 ^b
臭氧	13.16±0.98 ^b	8.78±1.42 ^c	3.12±0.23 ^{bc}	2.96±0.74 ^{bc}	156.47±5.62 ^c	109.43±2.80 ^c
热激+臭氧	16.42±1.44 ^c	9.46±1.37 ^c	2.67±0.62 ^{cd}	2.18±0.55 ^d	160.73±4.37 ^c	117.80±3.75 ^d

[†] 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

3 结论

在本研究设定的贮藏条件下,热激结合臭氧熏蒸复合处理与 CK 对照和单纯热激及单纯臭氧熏蒸比较,复合处理能更好地抑制柑橘呼吸强度的上升,减少贮藏后期可溶性固形物、V_C、可滴定酸、糖含量的下降;同时降低果实失重;控制过氧化物酶、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性的降低,从而较好地保持了柑橘的采后品质,因此,具有明显的保鲜效果。具体机制可能是热激和臭氧在抗病性的诱导方面具有协同作用,增强抗氧化酶的活性,提高活性氧自由基(ROS)的清除能力和对微生物的抵御能力。后续研究将进一步考察热

2.7 对柑橘抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性的影响

由于果蔬在采后光照、紫外照射、病原菌入侵等因素的环境胁迫下,抗氧化酶系统(SOD、POD、CAT)的活性也会发生变化^[21]。因此,本研究测定了热激、臭氧处理以及复合处理后 SOD、POD 以及 CAT 活性在整个贮藏期的变化。SOD 酶能清除体内产生的自由基,它的活性随果实衰老而下降。如表 1 所示,通过热激和臭氧处理的果实 SOD 活性始终高于 CK 组。对照组和复合处理柑橘 SOD 活性先升后降。贮藏期内,CK 组的 SOD 活性显著小于复合处理组(P<0.05)。可见,复合处理可以使柑橘贮藏后期超氧化物歧化酶活性提高,起到保护的作用。

对照组和热激、臭氧及热激+臭氧组柑橘 POD 酶活性先上升再下降。第 60 天时,对照组过氧化物酶活性一直显著高于复合处理组(P<0.05);但到第 120 天时,热激+臭氧复合处理柑橘过氧化物酶活性显著高于对照组(P<0.05)。可见,复合处理能使柑橘的过氧化物酶活性增大。

随贮藏时间延长,各组柑橘的 CAT 活性逐渐降低。CK 和热激处理柑橘的 CAT 活性下降较快,而臭氧和热激+臭氧处理柑橘的 CAT 活性下降较缓,其中 CK 组 CAT 活性显著低于其他组(P<0.05)。可见,3 种处理有效控制柑橘 CAT 酶活性降低。

通过上述抗氧化酶活分析,可能是热激与臭氧结合能够进一步增强上述 3 种酶的活性,刺激宿主的防御反应,释放植保素,直接水解植物病原真菌的细胞壁,降低腐烂率^[22]。同时,复合处理一方面通过温度提升改变柑橘果实表面的角质层组成和晶体结构,另一方面臭氧介导刺激表皮毛孔关闭,双重作用导致柑橘失水率降低,呼吸强度减弱,保持较高的糖酸比和品质。

激结合臭氧处理对柑橘果实的相关防御蛋白基因和抗氧化酶基因表达的影响,不同处理对果皮微观结构和微生物的变化,探索热激和臭氧协同低温贮藏对柑橘采后贮藏品质保持的贡献度。

参考文献

[1] DUAN Xiao-fang, JING Guo-xing, FAN Feng, et al. Control of postharvest green and blue molds of citrus fruit by application of sodium dehydroacetate[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 113: 17-19.

(下转第 171 页)

its action on adenosine triphosphate-sensitive K⁺ channels in mouse B cells[J]. Journal of Clinical Investigation, 1993, 91(3): 871-880.

[38] SUN Xiao-fei, DU Min, NAVARRE D A, et al. Purple Potato Extract Promotes Intestinal Epithelial Differentiation and Barrier Function by Activating AMP-activated Protein Kinase[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2017, 62(4): 1700536.

[39] JOHNSON M H, MEJIA E G D. Phenolic compounds from fermented berry beverages modulated gene and protein expression to increase insulin secretion from pancreatic β -cells in vitro[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(12): 2 569-2 581.

[40] KATO M, TANI T, TERAHARA N, et al. The anthocyanin delphinidin 3-rutinoside stimulates glucagon-like peptide-1 secretion in murine GLUTag cell line via the Ca²⁺/calmodulin-dependent kinase II pathway [J]. Plos One, 2015, 10(5): e0126157.

[41] JAYAPRAKASAM B, VAREED S K, OLSON L K, et al. Insulin secretion by bioactive anthocyanins and anthocyanidins present in fruits [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2005, 53(1): 28-31.

[42] DONATH M Y, STØRLING J, MAEDLER K, et al. Inflammatory mediators and islet beta-cell failure: a link between type 1 and type 2 diabetes[J]. Journal of Molecular Medicine, 2003, 81(8): 455-470.

[43] HUI Hong-xiang, DOTTA F, MARIO U D, et al. Role of caspases in the regulation of apoptotic pancreatic islet beta-cells death[J]. Journal of Cellular Physiology, 2004, 200(2): 177-200.

[44] CNOP M, WELSH N, JONAS J C, et al. Mechanisms of pancreatic β -cell death in type 1 and type 2 diabetes many differences, few similarities[J]. Diabetes, 2005, 54(Suppl): S97.

[45] LEE J S, KIM Y R, SONG I G, et al. Cyanidin-3-glucoside isolated from mulberry fruit protects pancreatic β -cells against oxidative stress-induced apoptosis[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2015, 35(2): 405-412.

[46] ZHANG Bo, KANG Mu-xing, XIE Qiu-ping, et al. Anthocyanins from Chinese bayberry extract protect β cells from oxidative stress-mediated injury via HO-1 upregulation [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(2): 537-545.

[47] MARTINEAU L C, COUTURE A, SPOOR D, et al. Anti-diabetic properties of the Canadian lowbush blueberry Vaccinium angustifolium Ait[J]. Phytomedicine, 2006, 13(9): 612-623.

[48] NIZAMUTDINOVA I T, JIN Y C, CHUNG J I, et al. The anti-diabetic effect of anthocyanins in streptozotocin-induced diabetic rats through glucose transporter 4 regulation and prevention of insulin resistance and pancreatic apoptosis[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2009, 53(11): 1 419-1 429.

[49] 赖灯妮, 覃思, 赵玲艳, 等. 果蔬中多酚类化合物双向调控 Nrf2/Keap1 信号通路的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 311-320.

(上接第 123 页)

[2] 周亮, 杨文侠, 邓利珍, 等. 纽荷尔脐橙冷藏的最适采收期[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 255-259.

[3] 王登亮, 王呈阳, 孙崇德, 等. 热激对椪柑果实采后贮藏性的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(S): 2 629-2 629.

[4] 赵云峰, 林河通, 王静. 热处理抑制采后龙眼果肉自溶及细胞壁物质降解[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 268-275.

[5] 孙思胜, 詹静, 李光辉, 等. 不同处理方法对枇杷贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(4): 12-17.

[6] 罗自生. 热激处理对柿果实软化和细胞壁物质代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2006, 6(3): 84-88.

[7] 沈丽雯, 刘娟, 董红敏, 等. 热激处理减轻黄瓜冷害与细胞壁代谢的关系[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 329-338.

[8] 李泽珍, 狄建兵, 郝利平. 热激处理对鲜切莴笋色泽和质地的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(10): 1 955-1 962.

[9] PAILLART M J M, OTMA E, WOLTERING E J. Effect of mild heat-shock treatments on pink discoloration and physiological parameters in fresh-cut iceberg lettuce[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 85: 456-459.

[10] 朱玲凤, 李高阳, 张菊花, 等. 高浓度臭氧水对柑橘多菌灵的降解及其精油品质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 49-53.

[11] GARCÍA-MARTÍN J F, OLMO M, GARCÍA J M. Effect of ozone treatment on postharvest disease and quality of different citrus varieties at laboratory and at industrial facility[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 137: 77-85.

[12] ZHAO Zheng, XU Gang-ming, HAN Zhi-nan, et al. Effect of ozone on the antioxidant capacity of “Qiushui” pear (Pyrus pyrifolia Nakai cv. Qiushui) during postharvest storage [J]. Journal of Food Quality, 2013, 36(3): 190-197.

[13] 韩强, 郅海燕, 陈杭君, 等. 臭氧处理对桑葚采后生理品质的影响及机理[J]. 中国食品学报, 2016, 16(10): 147-153.

[14] 章宇璇, 郅海燕, 陈杭君. 臭氧处理对蓝莓贮藏品质及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(8): 170-176.

[15] 陈存坤, 高芙蓉, 薛文通, 等. 臭氧处理对新疆厚皮甜瓜贮藏品质和生理特性的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 215-220.

[16] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 121-134.

[17] 王娜, 林向阳, 阮榕生, 等. 核磁共振技术(NMR)研究脐橙的储藏过程[J]. 食品科学, 2007, 28(7): 215-220.

[18] 朱赛赛, 张敏. 温度激化处理对采后果蔬贮藏品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 230-238.

[19] 盛玲. GABA 支路调控柑橘果实柠檬酸代谢的机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 12-17.

[20] 王海宏, 周慧娟, 陈召亮, 等. 25%咪鲜胺水乳剂对宫川柑橘贮藏期品质及病害的影响[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 44-46, 104.

[21] 朱翠英, 付喜玲, 孙明岳, 等. 桃自然休眠期间抗氧化系统酶(CAT、POD、SOD)活性变化[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2015, 46(6): 808-811.

[22] SACHADYN-KRÓL M, MATERSKA M, CHILCZUK B, et al. Ozone-induced changes in the content of bioactive compounds and enzyme activity during storage of pepper fruits[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 59-67.