

不同贮藏温度结合热处理对黄瓜品质及生理生化指标的影响

赵昱瑄^{1,2}, 张敏^{1,2,3*}, 姜雪¹, 郝爽¹, 胡均如¹, 李佳乐¹, 盖晓阳¹

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心(上海海洋大学), 上海 201306; 3. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306)

摘要: 利用二次回归正交旋转组合设计测出的不同贮藏温度(2、4和8℃)下各自对应的最佳热处理条件, 研究不同贮藏温度(2、4和8℃)结合其对应的最佳热处理条件对贮藏期间黄瓜果实品质及生理生化指标的影响, 分别对该贮藏条件下黄瓜果实的冷害、硬度、失重率、多酚氧化酶(PPO)、可溶性蛋白、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、H₂O₂、超氧阴离子自由基 O^{2·-}、ASA 和 GSH 含量进行测定。结果表明, 热处理可以抑制冷害, 而热处理结合 4℃ 低温贮藏可以有效地抑制黄瓜果实硬度和失重率的下降, 延缓过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)活性的上升, 抑制 H₂O₂ 和超氧阴离子自由基 O^{2·-} 的上升, 对黄瓜的褐变有显著抑制作用, 延缓抗坏血酸的下降, 维持还原性谷胱甘肽(GSH)的含量, 有利于调节活性氧系统的平衡。研究表明, 在 4℃ 贮藏条件下, 黄瓜的热水处理条件为 39.4℃、24.3 min 时, 可延缓黄瓜果实的衰老, 较好地保持了果实的品质。

关键词: 黄瓜果实; 冷害; 贮藏温度; 品质; 活性氧

中图分类号: S642.209.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)06-1023-08

Effects of different storage temperature combined with heat treatment on quality and physiological-biochemical indexes of cucumbers

ZHAO Yuxuan^{1,2}, ZHANG Min^{1,2,3}, JIANG Xue¹, HAO Shuang¹, HU Junru¹, LI Jiale¹, GAI Xiaoyang¹

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306; 3. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306)

Abstract: In this article, we studied the effects of different storage temperature (2, 4 and 8 °C) combined with the corresponding optimal heat treatment conditions on the quality and physiological and biochemical indexes of cucumber fruits during storage using quadratic regression rotation-orthogonal combination design, and the physiological and biochemical indexes, such as hardness, weightlessness rate, soluble protein, polyphenol oxidase (PPO), catalase (CAT), peroxidase (POD), H₂O₂, super oxygen anion free radical (O^{2·-}), ASA and GSH of cucumber fruits under the treatments were determined. Results showed that: heat treatment could inhibit the chilling injury, and heat treatment combined with 4 °C low temperature storage could effectively inhibit the cucumber fruit hardness, lessen the weight loss rate, delayed the peroxidase (POD) and polyphenol oxidase (PPO) activities, inhibited the rise of H₂O₂ and O^{2·-}, which significantly inhibited cucumber browning; it also could delay the decline of ascorbic acid, maintained the GSH content, which was conducive to regulating the balance of active oxygen system. These results indicated that the senescence of cucumber fruits could be delayed when the heat shock temperature was 39.4 °C and the heat shock time was 24.3 min under the storage condition of 4 °C.

Key words: cucumber fruits; chilling injury; storage temperature; quality; reactive oxygen

黄瓜 (*Cucumis sativus* Linn.) 是一种常见的果蔬, 自身水分含量在 98% 以上, 含有丰富的营养成

分^[1]。黄瓜在贮藏、运输过程中, 营养物质快速流失, 容易衰老并发生腐败, 而适合的贮藏温度能够

收稿日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31371526) 资助。

作者简介: 赵昱瑄, 硕士研究生。E-mail: 2481691055@qq.com

* 通信作者: 张敏, 教授。E-mail: zhangm@shou.edu.cn

减缓果实的腐烂速度,能够防止营养物质的减少^[2]。因此,确定适合的黄瓜贮藏温度至关重要。

热处理是一种无污染、无化学残留的物理处理方法,对于延迟果蔬的成熟衰老,减少低温冷伤,抑制其相关酶活性有显著效果^[3]。Huan等^[4]研究发现热水处理桃果实后并在4℃贮藏,对减轻桃的冷害并保持其品质有显著的效果。Zhang等^[5]研究热水间歇处理后的黄瓜果实,在10℃下贮藏,40℃处理30或50 min,黄瓜果实腐烂和失重率最低,过氧化氢酶活性最高。Nasef^[6]研究发现55℃热水处理5 min的黄瓜果实,在4℃贮藏温度下,对于保持黄瓜感官品质,延长贮藏期,防止腐烂,诱导抗氧化酶提供了可能性。热处理对于梨^[7]、猕猴桃^[8]、枇杷^[9]等的研究结果同样表明其可以提高抗冷性。

贮藏温度是影响果蔬贮藏品质和货架期的重要因素,也是影响果实代谢过程、品质与贮藏寿命的重要因子^[10]。低温有利于抑制采后蔬菜生理生化反应,延缓果实衰老^[11],但是不适宜的低温会引发果蔬产品代谢异常。乔勇进等^[12]研究发现0℃可以有效地延缓鸡毛菜营养物质含量下降,延缓抗氧化酶活性的变化,对鸡毛菜的采后衰老起到了显著抑制作用,有效保持了鸡毛菜的最佳食用品质与商品特性。赵伟等^[13]研究0℃和5℃低温贮藏有利于保持嘎啦苹果的硬度,抑制腐烂的发生,延缓衰老,较好地保持果实的鲜食品质。

以往的研究都是针对某一特定的贮藏温度,研究热处理对黄瓜果实的生理生化特性的影响,而对于比较不同贮藏温度结合热处理研究黄瓜果实贮藏特性的文献较少。因此,本试验以黄瓜果实为试材,利用二次回归正交旋转组合设计测出的不同贮藏温度(2、4和8℃)下各自对应的最佳热处理条件对黄瓜果实进行处理,旨在探究不同贮藏温度与热处理条件相结合对黄瓜果实品质与生理生化特性的影响,为采后黄瓜在冷藏保鲜中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料及处理

试验选用的黄瓜品种为“申青”黄瓜,散去田间热,剔除机械伤和病虫害后,采收当天运回实验室。分装于带孔聚乙烯塑料袋内,选取黄瓜果实质量在(260±20)g,长度在(26±2)cm,果实表面无明显机械损伤,静置达到室温。

取36根未经过处理的黄瓜果实随机分成3组,分别置于温度为2、4和8℃,相对湿度为85%~90%的恒温恒湿箱中贮藏,分为CK 2℃组、CK 4℃组

和CK 8℃组,测定冷害指数。

根据前期通过电导率结合二次回归正交旋转组合设计,确定不同贮藏温度(2、4和8℃)对应最佳热激温度和热激时间:(1)2℃贮藏温度下,最佳热处理条件为38.7℃的热水中热激27.3 min(HWT 2℃处理组);(2)4℃贮藏温度下,最佳热处理条件为39.4℃的热水中热激24.4 min(HWT 4℃处理组);(3)8℃贮藏温度下,最佳热处理条件为40.6℃的热水中热激21.2 min(HWT 8℃处理组)。根据其结果将黄瓜果实随机分为3组进行相应的处理,通过恒温水温箱进行温度的调节,每组120根,热处理后拭干,分别装入0.07 mm聚乙烯薄膜塑料袋中,置于温度为2、4和8℃,相对湿度为85%~90%的恒温恒湿箱中贮藏,即为HWT 2℃处理组、HWT 4℃处理组和HWT 8℃处理组。每3 d进行1次冷害、失重率、硬度、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)、可溶性固形物、可溶性蛋白、H₂O₂、超氧阴离子自由基O²⁻、抗坏血酸及还原性谷胱甘肽的测定,每组每次取24根,重复测定3次。

1.2 试剂与仪器

试剂:硫代巴比妥酸、三氯乙酸、无水乙醇、磷酸氢钠、H₂O₂试剂盒、超氧阴离子自由基试剂盒、氢氧化钠溶液、标准蛋白质溶液、乙醇溶液、磷酸、次氯酸钠(NaClO)、碘化钾、抗坏血酸、硫酸、淀粉、冰醋酸、草酸、氯化钠、碳酸氢钠、硫代硫酸钠、乙二胺四乙酸二钠和过氧化氢,均为分析纯。

仪器:GY-4型数显硬度计,浙江托普云农科技股份有限公司;BPS-100CA型恒温恒湿培养箱,上海三腾仪器有限公司;H-2050R-1型高速冷冻离心机,山东博科科学仪器有限公司;紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;HSWX-600BS型电热恒温水温箱,上海沪粤明科学仪器有限公司;THZ-82A型恒温振荡箱,常州市金坛友联仪器研究所;BJ2100D型数字孔式电子天平,上海仪分科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 冷害指数的测定 参照曹建康等^[14]的方法来对黄瓜果实的冷害指数进行评定。分别随机取12根黄瓜,冷害指数共分为5个等级,即0级,无冷害;1级,冷害面积不超过25%;2级,轻度冷害,冷害面积占25%~50%;3级,中度冷害,冷害面积占50%~75%;4级,严重冷害,冷害面积超过75%。按照公式(1)计算冷害指数,重复测定3次。

$$\text{冷害指数} = \frac{\sum(\text{冷害指数} \times \text{该等级中果实个数})}{4 \times \text{测定果实总个数}} \quad (1)$$

分别在第 3、第 6、第 9、第 12 和第 15 天取出, 室温下放置 3 d, 观察各组果实冷害情况。

1.3.2 失重率、硬度的测定 失重率采用称量法^[15], 每个处理重复测定 3 次。

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 为黄瓜果实的原始质量, g; m_1 为贮藏后黄瓜果实的质量, g。

硬度使用 GY-4 型数显硬度计进行测定。在黄瓜果实赤道部位, 取 1 cm 厚果肉, 用硬度计垂直打入黄瓜果肉处测定, 结果以 N 表示, 重复 3 次。

1.3.3 可溶性固形物和可溶性蛋白的测定 可溶性固形物含量参考李新等^[16]的方法, 采用阿贝折光仪进行测定, 每个处理组重复测定 3 次。可溶性蛋白采用曹建康等的紫外吸收法^[14]测定, 称取 1 g 样品至 3 mL 蒸馏水中, 测定波长为 280 nm 处的吸光度。

1.3.4 过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)及多酚氧化酶(PPO)活性的测定 POD 含量参考李合生^[17]的方法, 采用愈创木酚法进行测定, 分别加入 3.0 mL 25 mmol·L⁻¹ 愈创木酚和 0.5 mL 酶提取液, 再加入 0.25 mL H₂O₂ 溶液, 迅速开启反应, 测定波长 470 nm 的吸光度值。多酚氧化酶活性的测定参考 Jayachandran 等^[18]的方法: PPO 催化后形成产物在 420 nm 处有最大光吸收峰, 可利用比色法测定, 以 U·g⁻¹ 来表示, 重复测定 3 次。CAT 的测定是根据 Chen 等^[19]的方法稍作修改, 可根据反应过程中 H₂O₂ 的含量变化来测定该酶的活性, 利用紫外分光光度计可以检测 H₂O₂ 含量的变化, 以每克果肉 1 min 内 OD₂₄₀ 值变化 0.01 为 1 个酶活单位。

1.3.5 过氧化氢 (H₂O₂) 含量和超氧阴离子自由基 (O₂^{·-}) 的测定 H₂O₂ 的含量采用 H₂O₂ 试剂盒进行测定^[20]。根据试剂盒, 进行试验前测定, 确定取样量制备成组织匀浆; 按照试剂盒方法进行测定, 其含量用 μmol·g⁻¹ 表示, 重复测定 3 次。O₂^{·-} 产生速率, 采用超氧阴离子自由基试剂盒进行测定: 确定取样量, 取 1 g 黄瓜果肉加入 4 mL pH 值为 7.2 的磷酸缓冲液, 冰浴研磨, 在 4℃、8 000 r·min⁻¹ 下离心 20 min, 按照试剂盒方法进行测定, 单位为 U·g⁻¹, 重复测定 3 次。

1.3.6 抗坏血酸 (ASA) 含量和还原性谷胱甘肽 (GSH) 的测定 ASA 含量的测定参考王慧等^[21]的方法, 采用 2, 6-二氯靛酚法进行测定。取(5±0.1) g 黄瓜果实样品, 加 0.2 mol·L⁻¹ 草酸均质后定容, 取滤液 20 mL 滴定, 至 2, 6-二氯靛酚溶液的深蓝色还原为无色为止。每个处理重复测定 3 次。

GSH 的测定参照曹建康等^[14]的方法。该物质在波长 412 nm 处具有最大光吸收, 因此利用分光光度计法可测定果实中 GSH 的含量。取 3.0 g 黄瓜组织样品, 加入 5 mL 50 g·L⁻¹ 三氯乙酸溶液冰浴研磨, 于 4℃ 下 8 000 r·min⁻¹ 离心 20 min 后, 测定其在 412 nm 处的吸光值, 结果以 μmol·g⁻¹ 表示, 每个处理重复测定 3 次。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2010 软件处理, 采用 SPSS21.0 软件进行显著性分析, 采用 Duncan 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实冷害指数的影响

冷害指数是反映黄瓜果实品质的重要指标之一。如图 1 所示, 不同贮藏温度下黄瓜果实冷害指数随贮藏时间的延长呈上升趋势。黄瓜果实贮藏 3 d 时, 热处理组和 CK 组 2, 4℃ 贮藏温度下黄瓜果实出现冷害, 在 8℃ 贮藏温度下, 热处理组和 CK 组没有冷害的发生; 在贮藏第 6 天, 热处理组和 CK 2、4 及 8℃ 组贮藏温度下黄瓜果实均出现冷害, 且随着贮藏时间的延长, 热处理组和 CK 组 2 和 4℃ 冷害指数显著高于 8℃。贮藏后期热处理组和 CK 组在 2℃ 和 4℃ 的贮藏温度下黄瓜果实冷害加剧, 在贮藏第 12 天, HWT 2℃、HWT 4℃、HWT 8℃ 贮藏温度黄瓜果实的冷害指数分别为 0.69、0.6 和 0.2。CK 2℃、CK 4℃ 及 CK 8℃ 贮藏温度黄瓜果实的冷害指数分别为 0.74、0.63 和 0.23。结果表明, 热处理可以显著降低黄瓜果实的冷害指数。热处理组和 CK 组在 8℃ 贮藏温度下黄瓜果实的冷害指数较低, 说明 8℃ 贮藏温度下保持了较低的冷害指数, 但在 8℃ 贮藏温度下, 黄瓜果实在贮藏后尾部皱缩严重, 可能是因为贮藏温度的升高, 导致黄瓜果实失水, 使黄瓜果实商品性下降。

2.2 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实失重率和硬度的影响

贮藏温度是影响黄瓜贮藏品质的重要因素, 温度越高呼吸越旺盛, 因此适宜的低温贮藏可抑制水分蒸腾, 有效地保持商品价值。由图 2 可以看出, 在整个贮藏期间, 不同贮藏温度的黄瓜果实的失重率随着贮藏时间的增加呈上升趋势, HWT 8℃ 的失重率显著高于其他贮藏温度 ($P < 0.05$)。随着贮藏时间的延长, HWT 8℃ 果实黄瓜果皮出现褶皱, 失水严重。结果表明, 在贮藏前期, 贮藏温度越低, 黄瓜果实的失重率上升率越小, 利于黄瓜贮藏期间

的水分保持, HWT 2℃贮藏可以抑制失重率升高, 延缓黄瓜果实质量的损失。说明低温能够有效抑制黄瓜的蒸腾作用, 降低水分的挥发, 这与对湖南本地青椒^[22]、绿竹笋^[23]的研究结果一致。由此可见, 温度是影响采后贮藏过程中失重率和硬度的重要因素, 低温能维持贮藏过程中较低的失重率和较高的硬度, 从而保持贮藏品质, 延长货架期。在贮藏后期, 随着冷害的加剧, HWT 2℃贮藏的失重率逐渐高于 HWT 4℃, 说明冷害程度的加深, 导致黄瓜果实失水程度加重。

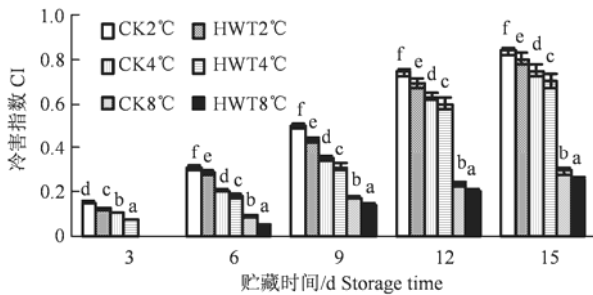


图 1 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实冷害指数影响
Figure 1 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on CI of cucumber fruits

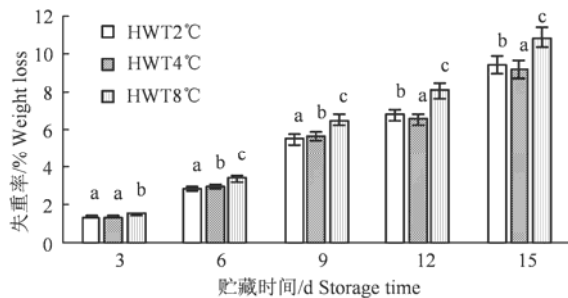


图 2 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实失重率的影响
Figure 2 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on weight loss rate of cucumber fruits

黄瓜果实硬度是衡量其贮藏寿命的重要指标之一。贮藏过程中由于酶的作用, 细胞壁物质发生分解, 导致果实软化^[24]。如图 3 所示, 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实硬度的变化呈下降趋势。随着贮藏时间的延长, HWT 8℃贮藏条件下下降趋势较明显。贮藏前 3 d, HWT 2℃及 HWT 4℃贮藏温度黄瓜果实硬度无显著性差异 ($P < 0.05$)。在贮藏后期, HWT 4℃黄瓜果实硬度相较于 HWT 2℃和 HWT 8℃下降缓慢, 贮藏 15 d 时, HWT 2℃、HWT 4℃和 HWT 8℃的降幅分别为 21.58%、20.48%和 25.3%。结果表明, 适宜的贮藏温度对抑制黄瓜果实硬度下降有显著效果。贮藏前期, 贮藏温度的升高会加快黄瓜果实变软, 硬度的降低与水分散失相关, 热激条件下 8℃贮藏温度由于水分散失较为严

重, 导致其硬度, 而 HWT 2℃有助于抑制硬度的下降; 贮藏后期随着冷害的加重, HWT 2℃黄瓜果肉硬度的下降率比 HWT 4℃的快。说明冷害程度影响硬度的下降, 下降的原因可能是随着冷害的加深, 细胞壁物质发生分解导致细胞软化程度加深。

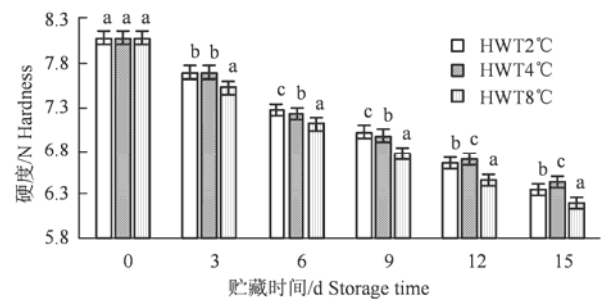


图 3 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实硬度的影响
Figure 3 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on hardness of cucumber fruits

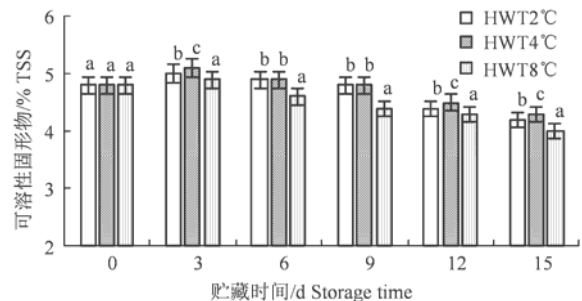


图 4 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实可溶性固形物 (TSS) 的影响
Figure 4 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on TSS of cucumber fruits

2.3 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实可溶性固形物和可溶性蛋白含量的影响

可溶性固形物能反应果实的品质和营养价值, 对果实的口味、贮藏性具有重要的影响^[25], 是评价果实品质的重要指标之一。由图 4 可知, 不同贮藏温度下可溶性固形物的含量呈先上升后下降的趋势, 第 3 天时可溶性固形物含量有少许上升, 然后逐渐降低。在贮藏第 3 天, HWT 4℃黄瓜果实的上升率最高, 这是由于淀粉等在水解酶的作用下发生水解, 使可溶性固形物增加, 随着贮藏时间的延长, 可溶性固形物含量逐渐下降。在贮藏期间, HWT 2℃和 HWT 4℃贮藏条件下的可溶性固形物含量相差不大。贮藏 6 d 后, HWT 8℃的可溶性固形物含量下降幅度最大, 且随着贮藏温度越高, 可溶性固形物消耗越快。说明低温可以有效地延缓可溶性固形物的消耗。在贮藏后期, 贮藏在 HWT 2℃下黄瓜果实冷害程度加深, 使得细胞膜透性增强, 加剧了有机物的消耗。结果表明, 贮藏前期糖分的积累,

导致可溶性固形物的增加, 且低温下贮藏可溶性固形物下降缓慢, 这与对西番莲^[26]、山楂^[27]的试验结果一致。HWT4℃贮藏下黄瓜果实可溶性固形物的含量能较好地保持, 能较好地维持贮藏期间黄瓜果实的品质。

可溶性蛋白的积累能够提高植物体的渗透调节, 较好地维持细胞膜的完整性^[28]。由图 5 可知, 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实的可溶性蛋白含量随着贮藏时间的变化呈先迅速升高然后缓慢下降的趋势。在贮藏期间, 不同贮藏温度的可溶性蛋白含量均呈显著差异 ($P < 0.05$)。贮藏第 3 天, 不同贮藏温度的可溶性蛋白含量达到峰值, HWT 2℃的可溶性蛋白含量上升最快, 为 24.2%, HWT 4℃和 8℃的可溶性蛋白上升率为 18.4%和 14.3%, 在贮藏后期, 可溶性固形蛋白含量逐渐下降, 各处理组有差异显著 ($P < 0.05$), HWT 2℃组贮藏下黄瓜果实可溶性蛋白含量下降最快。在贮藏末期, HWT 4℃的可溶性蛋白含量大于 HWT 2℃和 HWT 8℃的可溶性蛋白含量。第 15 天时, HWT 4℃贮藏的可溶性蛋白含量比 HWT 8℃高 3.46%。结果表明, 在贮藏前期, 低温逆境下可溶性蛋白含量增加, HWT 2℃贮藏上升最快; 而贮藏后期, 随着贮藏时间的延长, 贮藏温度越高可溶性蛋白消耗越多, 随着冷害的加深, HWT 2℃贮藏温度的可溶性蛋白含量流失加重。说明低温显著抑制了可溶性蛋白质含量的下降, 且 HWT 4℃贮藏能较好地维持细胞生命活性, 有利于保持其营养品质。

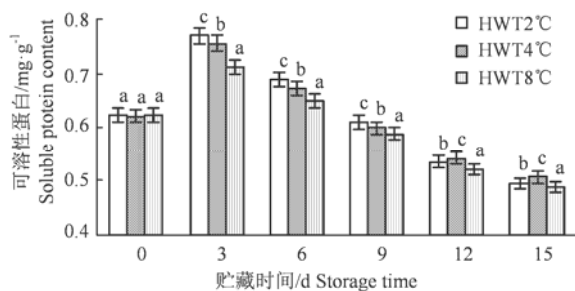


图 5 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实可溶性蛋白的影响

Figure 5 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on soluble protein in cucumber fruits

2.4 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性的影响

在膜脂过氧化反应中, 过氧化氢酶在植物生长发育、抗衰老等方面发挥着重要作用, 可以减少因为活性氧机体受到的不良影响^[29], 能够有效地清除

自由基, 防止活性氧对植物造成伤害^[30]。如图 6 所示, CAT 酶活性呈现出先增大后减小的趋势, 贮藏第 9 天时各处理组的 CAT 活性达到峰值, 随后逐渐降低。在贮藏前 9 d, HWT 4℃黄瓜果实 CAT 活性的上升趋势显著高于其他贮藏温度, HWT 2℃、HWT 4℃和 HWT 8℃的 CAT 活性分别为 25.9、28.64 及 24.8 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$, 表明果实中 CAT 活性在适宜的贮藏温度下, 被诱导升高, 清除活性氧。在贮藏后期, 随着冷害的加深, HWT 8℃黄瓜果实的 CAT 活性下降较缓慢。贮藏 15 d 时, HWT 2℃、HWT 4℃和 HWT 8℃贮藏的 CAT 活性分别为 14.32、17.12 和 15.48 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$, 说明贮藏后期, 因冷害程度的加深, HWT 8℃的 CAT 活性比 HWT 2℃高, 使其受活性氧物质的伤害程度减小。结果表明, HWT 4℃黄瓜果实的 CAT 活性对于清除植物体内积累的 H_2O_2 有显著影响。

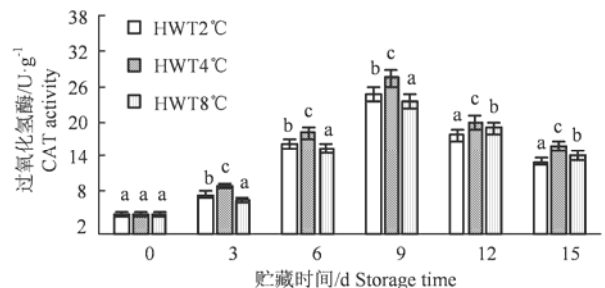


图 6 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实过氧化氢酶(CAT)的影响

Figure 6 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on CAT in cucumber fruits

过氧化物酶(POD)是防止植物膜脂过氧化的酶促防御体系中重要保护酶, 能催化不饱和脂肪酸的氢过氧化物的裂解, 可以减轻 H_2O_2 对细胞的损伤, 同时产生自由基^[31], 在果实衰老和冷害发展中起重要作用, 也是反映果实衰老的一个重要指标^[32]。由图 7 可知, POD 活性呈上升趋势, 随贮藏时间延长而增加, 不同处理组 POD 的活性存在显著差异 ($P < 0.05$)。在贮藏前 6 d, 4℃贮藏温度处理组的黄瓜果实的 POD 活性低于 2 和 8℃; 贮藏第 6 天, HWT 2℃、HWT 4℃及 HWT 8℃处理组分别较 0 d 的高 2.03、1.91 和 2.66 倍, 其中 HWT 4℃的抑制效果最明显; 在贮藏 9 d 后, HWT 2℃的 POD 活性低于 HWT 4℃和 HWT 8℃; 在贮藏末期, HWT 8℃组贮藏温度的黄瓜果实的 POD 活性由 0 d 时的 3.38 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 增长到 15 d 时的 17.26 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。说明低温能够降低过氧化氢酶活性, 减少自由基的产生, 可能是因为自由基的增加, 诱导 POD 的合成, 使 POD 酶活性提高。

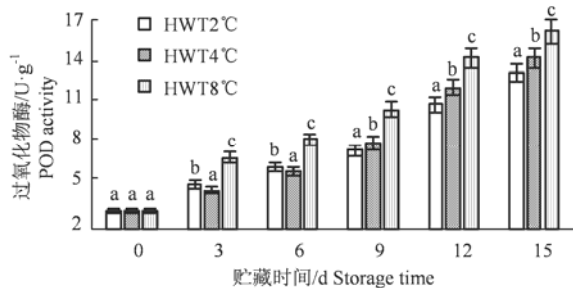


图 7 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实过氧化物酶(POD)的影响

Figure 7 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on POD in cucumber fruits

多酚氧化酶(PPO)能催化多种酚类物质氧化成醌类化合物^[33],这些化合物进一步聚合形成褐色,PPO活性的高低可直接影响到果实的褐变及发生程度。从图8可以看出,随着贮藏时间的延长,PPO酶活性呈逐渐上升的趋势,且HWT 8°C贮藏温度下PPO酶活性上升较快,HWT 2°C贮藏的PPO酶活性上升较慢。在贮藏15 d时,PPO酶活性分别达到0.197、0.202和0.236 U·g⁻¹,存在显著性差异($P < 0.05$),说明低温能够显著降低多酚氧化酶活性,抑制膜脂过氧化能力,延缓褐变。

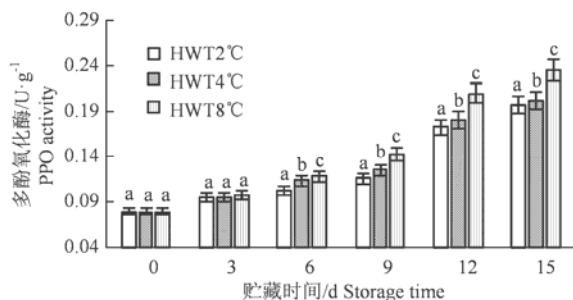


图 8 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实多酚氧化酶(PPO)的影响

Figure 8 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on PPO in cucumber fruits

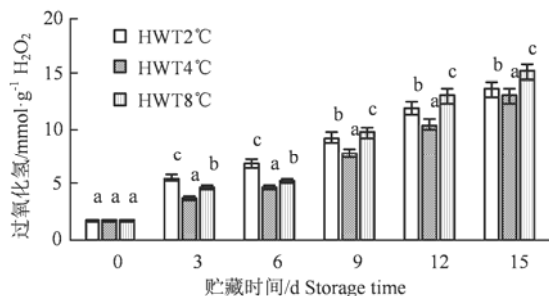


图 9 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实 H₂O₂ 含量影响

Figure 9 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on H₂O₂ content in cucumber fruits

顾思彤等^[34]探究贮藏温度(0、5和10°C)对软枣猕猴桃采后生理品质及抗氧化酶活性的影响,

研究发现 0°C 贮藏显著抑制了软枣猕猴桃的褐变,保持了较高的果实硬度,抑制了过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性的增加,保持了较高的抗氧化酶活性,这与本试验的研究结果一致。本研究发现 POD 和 PPO 呈正相关,与 HWT 8°C 组相比,在 HWT 2°C 和 HWT 4°C 贮藏下果实的 POD 和 PPO 活性较低,可能是因为低温逆境抑制细胞呼吸和生物代谢,提高抗氧化酶活性和膜的稳定性。

2.5 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实过氧化氢含量(H₂O₂)和超氧阴离子自由基(O^{2·-})影响
过氧化氢(H₂O₂)是植物体内一种活性氧自由基,是引起衰老的启动因子,当活性氧清除系统代谢不平衡时,H₂O₂将会大量累积导致细胞膜结构受到破坏。由图9可见,在贮藏期间,各处理组黄瓜果实的 H₂O₂ 含量总体呈上升的趋势,HWT 4°C 的黄瓜果实 H₂O₂ 含量与 HWT 2°C 和 HWT 8°C 存在显著性差异($P < 0.05$)。在贮藏前 6 d,HWT 2°C 组 H₂O₂ 含量显著高于 HWT 4°C 和 HWT 8°C 的 H₂O₂ 含量,这可能与在贮藏前期冷害程度的加深,导致细胞膜的损伤程度加深和 H₂O₂ 含量的大量积累;在贮藏第 6 天,HWT 2°C、HWT 4°C 和 HWT 8°C 的 H₂O₂ 含量分别比 0 d 高 4、2.74 和 3.09 倍;在贮藏后期,HWT 8°C 的 H₂O₂ 含量显著高于 HWT 2°C、HWT 4°C 贮藏温度下的 H₂O₂ 含量;在贮藏第 15 天时,HWT 8°C 比 HWT 2°C 和 HWT 4°C 组分别高 9.8% 和 13.8%。结果表明 HWT 4°C 组能明显抑制黄瓜果实体内 H₂O₂ 含量的上升,有利于减少果实内 H₂O₂,减缓其伤害,延缓果实衰老。

脂质过氧化反应会导致疾病的发生和机体组织的损伤。而果实在成熟过程中,会积累大量的活性氧,其具有极强的氧化能力,加速果实内部的氧化伤害。随着 O^{2·-} 的不断累积,细胞的完整性会遭到破坏,膜结构及功能受损伤。但机体也会对这种反应作出防御,使活性氧维持在一个较低的水平,防止其产生毒害作用。由图 10 可见,随着贮藏时间的延长,不同贮藏温度下的超氧阴离子自由基含量呈上升趋势,在贮藏前期,HWT 2°C 组贮藏的 O^{2·-} 显著高于 HWT 4°C 和 HWT 8°C 组 ($P < 0.05$)。在贮藏第 3 天,HWT 2°C、HWT 4°C 和 HWT 8°C 组贮藏较 0 d 分别高 1.85、1.65 和 1.77 倍,说明 HWT 4°C 组贮藏抑制黄瓜果实 O^{2·-} 含量的增加,提高了果实的抗氧化性,较好地保持了果实的品质;在贮藏后期,HWT 8°C 始终大于 HWT 2°C 和 HWT 4°C 贮藏下的超氧阴离子自由基含量,在贮藏 15 d 时,HWT 2°C、HWT 4°C 和 HWT 8°C 贮藏较 0 d 分别高 4.68、4.45

及 5.36 倍, HWT 8 °C 贮藏的黄瓜果实 $O_2^{\cdot-}$ 含量的增加, 说明其抗氧化性逐渐降低, 果实逐渐衰老。

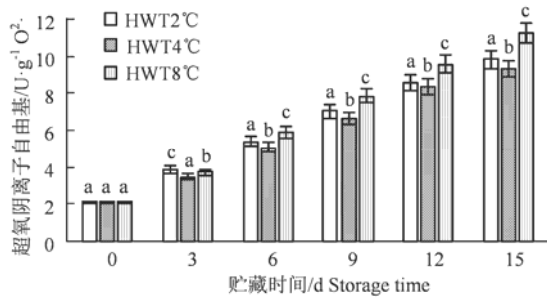


图 10 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实超氧阴离子自由基 ($O_2^{\cdot-}$) 的影响

Figure 10 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on $O_2^{\cdot-}$ in cucumber fruits

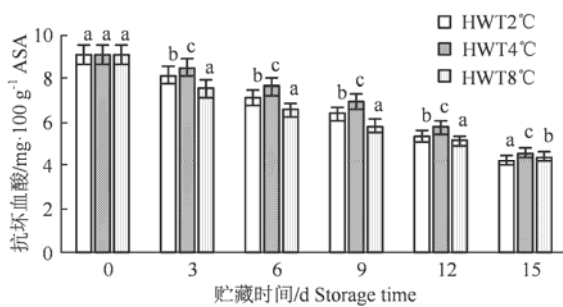


图 11 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实抗坏血酸 (ASA) 含量的影响

Figure 11 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on ASA content in cucumber fruits

2.6 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实抗坏血酸含量 (ASA) 和还原性谷胱甘肽含量 (GSH) 的影响

抗坏血酸 (ASA) 是果蔬营养品质的一个重要指标, 可以抵抗自由基对细胞伤害, 具有抗氧化活性, 延缓果蔬衰老^[35]。由图 11 可知, 随着贮藏时间延长, 黄瓜果实的 ASA 含量呈下降的趋势, 且 HWT 4 °C 贮藏条件下的 ASA 含量显著高于 HWT 2 °C 和 HWT 8 °C 贮藏条件, 说明适宜温度的低温贮藏能较好地保持 ASA 含量。在贮藏第 6 天, HWT 2 °C、HWT 4 °C 和 HWT 8 °C 下黄瓜 ASA 含量分别为 0 d 的 21.5%、15.85%、27.59%; 贮藏第 15 天, HWT 2 °C、HWT 4 °C 和 HWT 8 °C 下黄瓜 ASA 含量分别比 0 d 低 53.62%、49.47% 及 51.52%。在贮藏前期, HWT 8 °C 下 ASA 含量下降迅速, 说明温度的升高导致黄瓜果实 ASA 含量的下降; 在贮藏后期, HWT 2 °C 贮藏温度下 ASA 含量下降明显, 是由于随着冷害程度的加深, 细胞膜损伤严重, 导致营养物质流失。HWT 4 °C 贮藏下, 黄瓜果实 ASA 含量下降较为缓慢, 能较好地维持贮藏期间黄瓜果实的品质。

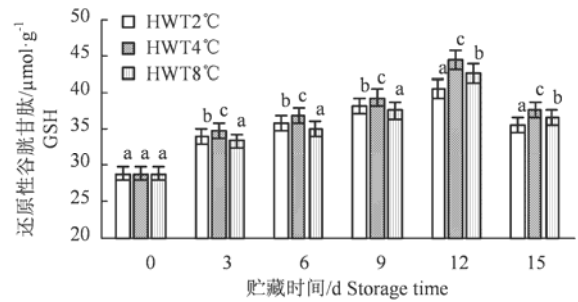


图 12 不同贮藏温度结合热处理对黄瓜果实还原性谷胱甘肽含量 (GSH) 的影响

Figure 12 Effects of different storage temperature combined with heat treatment on GSH content in cucumber fruits

还原性谷胱甘肽 GSH 可作为供氢体, 使 H_2O_2 转变为 H_2O , 清除脂类氢过氧化物, 减轻有机氢过氧化物对机体的损伤, 抑制活性氧诱发脂类过氧化, 在预防衰老方面起到重要作用。且 ASA-GSH 循环是非酶类抗氧化物质的联合作用, 更能发挥清除活性氧及抑制膜脂过氧化的作用。由图 12 可知, 不同贮藏温度黄瓜果实中 GSH 含量呈现出先缓慢上升后下降的趋势, 在第 12 天达到峰值。在贮藏到 9 d 时, HWT 2 °C、HWT 4 °C 和 HWT 8 °C 的 GSH 含量分别由 0 d 时的 $28.68 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 38.03 、 39.06 和 $37.41 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; 在贮藏结束时, HWT 2 °C、HWT 4 °C 和 HWT 8 °C 的 GSH 含量分别为 35.32 、 37.54 和 $36.42 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。结果表明, 在贮藏前期, HWT 2 °C 和 HWT 4 °C 的上升程度大于 HWT 8 °C 组; 在贮藏后期, 随着冷害程度的加深, 黄瓜果实内部过氧化导致 HWT 2 °C 组的 GSH 含量低于其他贮藏温度。HWT 4 °C 组贮藏温度下黄瓜果实的 GSH 含量上升幅度最大, 有助于黄瓜果实的活性氧积累。

3 结论

热处理后进行低温贮藏, 黄瓜的各项生命活动都会受到抑制, 低温会抑制酶的活性, 酶在低温下生化反应的速率会减慢, 从而可以降低黄瓜品质劣变。本试验中, 不同贮藏温度下, 热处理可以显著降低黄瓜果实的冷害指数, 抑制冷害的加剧, 说明热处理对黄瓜果实的贮藏起到积极作用。根据前期试验中通过二次回归正交旋转组合设计确定的贮藏温度 2 °C、4 °C 和 8 °C 对应的最佳热处理条件进行研究, 发现适当的低温可抑制失重率和硬度的下降, 保持活性氧清除系统代谢平衡, 热处理组 2 °C 和 4 °C 低温贮藏对黄瓜果实失重率和硬度的保持效果都明显优于热处理组 8 °C 贮藏温度, 热处理组 2 °C 和 4 °C 的冷害指数较 8 °C 严重, 但热处理组 8 °C 在

贮藏后期, 黄瓜果实尾部发生明显失水皱缩, 影响了黄瓜果实的商品性。HWT 2 °C 和 HWT 4 °C 低温贮藏能有效抑制黄瓜果实营养物质的劣变, 抑制果实硬度的降低、可溶性固形物、抗坏血酸的下降, 抑制 H₂O₂ 和 O²⁻ 的大量累积, 抑制细胞膜结构的破坏程度, 延缓营养物质的下降速度, 减慢黄瓜果实的衰老和褐变。通过比较, 在 HWT 4 °C 组(即热水处理条件为 39.4 °C、24.3 min)贮藏条件下, 黄瓜的贮藏效果更好, 能更好地维持营养及活性氧代谢平衡, 是黄瓜果实较适宜的贮藏条件。

参考文献:

- [1] DHALL R K, SHARMA S R, MAHAJAN B V C. Effect of shrink wrap packaging for maintaining quality of cucumber during storage[J]. *J Food Sci Technol*, 2012, 49(4): 495-499.
- [2] 张懋, 刘倩. 国内外果蔬保鲜技术及其发展趋势[J]. *食品与生物技术学报*, 2014, 33(8): 785-792.
- [3] ESCRIBANO S, MITCHAM E. Progress in heat treatments[J]. *Stewart Postharvest Review*, 2014, 10: 1-6.
- [4] HUAN C, HAN S, JIANG L, et al. Postharvest hot air and hot water treatments affect the antioxidant system in peach fruit during refrigerated storage[J]. *Postharvest Biol Technol*, 2017, 126: 1-14.
- [5] ZHANG N, YANG Z, CHEN A Q, et al. Effects of intermittent heat treatment on sensory quality and antioxidant enzymes of cucumber[J]. *Sci Hort*, 2014, 170: 39-44.
- [6] NASEF I N. Short hot water as safe treatment induces chilling tolerance and antioxidant enzymes, prevents decay and maintains quality of cold-stored cucumbers[J]. *Postharvest Biol Technol*, 2018, 138: 1-10.
- [7] SHADMANI N, AHMAD S H, SAARI N, et al. Chilling injury incidence and antioxidant enzyme activities of *Carica papaya* L. 'Frangi' as influenced by postharvest hot water treatment and storage temperature[J]. *Postharvest Biol Technol*, 2015, 99: 114-119.
- [8] MA Q S, SUO J T, HUBER D J, et al. Effect of hot water treatments on chilling injury and expression of a new C-repeat binding factor (CBF) in 'Hongyang' kiwifruit during low temperature storage[J]. *Postharvest Biol Technol*, 2014, 97: 102-110.
- [9] SHAO X F, TU K. Hot air treatment improved the chilling resistance of loquat fruit under cold storage[J]. *J Food Process Preserv*, 2014, 38(2): 694-703.
- [10] GWANPUA S G, JABBAR A, ZHAO M, et al. Investigating the potential of dual temperature storage as a postharvest management practice to mitigate chilling injury in kiwifruit[J]. *Int J Refrig*, 2018, 86: 62-72.
- [11] 王昱, 李海燕, 范杰英, 等. 低温贮藏保鲜技术的发展概况[J]. *安徽农学通报(下半月刊)*, 2009, 15(16): 227-230.
- [12] 乔勇进, 高春霞, 甄凤元, 等. 贮藏温度对鸡毛菜贮藏品质的影响[J]. *上海农业学报*, 2018, 34(2): 94-98.
- [13] 赵祎, 马力群, 罗云波, 等. 贮藏温度对嘎啦苹果贮藏期及货架期品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(3): 8-14.
- [14] 曹建康, 陈文化, 赵玉梅, 等. 壳聚糖结合 1-甲基环丙烯处理对李果实货架期品质的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(22): 366-368.
- [15] 李素清, 秦文, 王家梅, 等. 贮藏温度对热处理楠竹笋保鲜效果的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2014, 32(4): 413-417.
- [16] 李新, 周宜洁, 唐瑞芳, 等. 贮藏温度对鲜枸杞生理指标和营养品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(14): 264-269, 281.
- [17] 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.
- [18] JAYACHANDRAN L E, CHAKRABORTY S, RAO P S. Inactivation kinetics of the most baro-resistant enzyme in high pressure processed *Litchi*-based mixed fruit beverage[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2016, 9(7): 1135-1147.
- [19] CHEN B X, YANG H Q. 6-Benzylaminopurine alleviates chilling injury of postharvest cucumber fruit through modulating antioxidant system and energy status[J]. *J Sci Food Agric*, 2013, 93(8): 1915-1921.
- [20] 李静, 李霞, 陈翠松, 等. GABA 处理对双孢蘑菇活性氧代谢和膜脂过氧化的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(3): 275-280.
- [21] 王慧, 张艳梅, 王大鹏, 等. 热激处理对青椒耐冷性及抗氧化体系的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(2): 312-316.
- [22] 徐海山, 肖佳颖, 周辉, 等. 贮藏温度对湖南本地青椒采后理化品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(9): 2514-2520.
- [23] 张雪芹, 谢志南, 林建忠, 等. 采后预冷处理和贮藏温度对台湾绿竹笋鲜笋老化的影响[J]. *亚热带植物科学*, 2018, 47(3): 218-221.
- [24] CHEN H J, CAO S F, FANG X J, et al. Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage[J]. *Sci Hort*, 2015, 188: 44-48.
- [25] 许淑芳, 张学英, 陈海江. 不同贮藏温度对桃果实品质的影响[J]. *北方园艺*, 2012(13): 173-176.
- [26] 徐雪莹, 陈于陇, 徐玉娟, 等. 不同温度贮藏西番莲品质变化规律研究[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(3): 557-562.
- [27] ALI S, KHAN A S, MALIK A U, et al. Effect of controlled atmosphere storage on pericarp browning, bioactive compounds and antioxidant enzymes of *Litchi* fruits[J]. *Food Chem*, 2016, 206: 18-29.
- [28] 化延斌, 常月梅. 核桃枝条干枯与可溶性蛋白含量和总酚含量的关系[J]. *河北果树*, 2016(5): 5-8, 15.
- [29] ZHAO H D, LIU B D, ZHANG W L, et al. Enhancement of quality and antioxidant metabolism of sweet cherry fruit by near-freezing temperature storage[J]. *Postharvest Biol Technol*, 2019, 147: 113-122.
- [30] 刘云芬, 王薇薇, 祖艳侠, 等. 过氧化氢酶在植物抗逆中的研究进展[J]. *大麦与谷类科学*, 2019(1): 5-8.
- [31] 陈凯路. 不同温度对桃果实软化相关酶的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [32] HONG K Q, XU H B, WANG J N, et al. Quality changes and internal browning developments of summer pineapple fruit during storage at different temperatures[J]. *Sci Hort*, 2013, 151: 68-74.
- [33] 郭宇婷, 刘帅民, 宋汉良, 等. 贮藏温度对槟榔果仁褐变的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(7): 62-65.
- [34] 顾思彤, 姜爱丽, 李宪民, 等. 不同贮藏温度对软枣猕猴桃采后生理品质及抗氧化性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(13): 178-184.
- [35] 颜廷才, 秦骅, 张鹏, 等. 1-甲基环丙烯结合 ξ -聚赖氨酸对贮藏后货架期富士苹果的品质及挥发性成分的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(9): 207-214.