

UV-C处理对‘黄金’百香果贮藏品质和采后生理的影响

贾文君^{1,2}, 刘传和³, 王宇⁴, 邓云², 冯学敏^{5*}

(1.海南大学热带农林学院,海南儋州 571737)(2.上海交通大学农业与生物学院,上海 200240)(3.广东省农业科学院果树研究所,农业农村部南亚热带果树生物学与遗传资源利用重点实验室,广东广州 510640)(4.海南大学食品科学与工程学院,海南海口 570228)(5.海南博安盈农业开发有限公司,海南英州 572427)

摘要: 该研究以‘黄金’百香果为材料,进行不同剂量的UV-C照射处理(0、2.02、4.04和6.06 kJ/m², 0 kJ/m²为对照),20℃环境中贮藏18 d。贮藏第9天时,与对照相比,UV-C处理能显著抑制L*值的下降和b*值的上升(P<0.05),显著抑制可滴定酸(TA)和类黄酮含量的下降(P<0.05),保持a*值为负值,降低果实的腐烂指数和皱缩指数,2.02和4.04 kJ/m²剂量的UV-C处理果实后,维生素C(Vc)含量均显著高于对照(P<0.05),分别比对照高2.66和2.11 mg/100 g,2.02和6.06 kJ/m²处理果实的呼吸强度显著低于对照(P<0.05),分别比对照低7.84和16.96 mg CO₂/g FW h,但都可溶性固形物(TSS)和总酚含量以及硬度值没有显著的影响(P<0.05),6.06 kJ/m²处理增加了细胞膜的透性,使总酚含量降低。综合来看,2.02 kJ/m²处理的效果较好,好于对照和其他剂量UV-C处理的效果,可作为有效处理为UV-C在百香果采后上的应用提供一定的理论指导。

关键词: UV-C处理;百香果;采后贮藏;皱缩指数

文章编号:1673-9078(2025)01-136-144

DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1447

Effects of Ultraviolet-C Treatment on the Storage Quality and Postharvest Physiology of ‘Golden’ Passion Fruit

JIA Wenjun^{1,2}, LIU Chuanhe³, WANG Yu⁴, DENG Yun², FENG Xuemin^{5*}

(1.School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou 571737, China)(2.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)(3.Institute of Fruit Tree Research, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of South Subtropical Fruit Biology and Genetic Resource Utilization (MOA), Guangzhou 510640, China)(4.School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)(5.Hainan Boanying Agricultural Development Co. Ltd., Yingzhou 572427 China)

引文格式:

贾文君,刘传和,王宇,等.UV-C处理对‘黄金’百香果贮藏品质和采后生理的影响[J].现代食品科技,2025,41(1):136-144.

JIA Wenjun, LIU Chuanhe, WANG Yu, et al. Effects of Ultraviolet-C treatment on the storage quality and postharvest physiology of ‘golden’ passion fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 136-144.

收稿日期:2023-12-03

基金项目:海南省自然科学基金项目(321MS0765);农业农村部南亚热带果树生物学与遗传资源利用重点实验室开放课题(202104);海南省热带园艺品质采后生理与保鲜重点实验室开放课题;海南大学协同创新中心项目(XTCX2022NYB07)

作者简介:贾文君(1977-),女,在读博士,高级实验师,研究方向:园艺产品采后生物学,E-mail:wenjunjia@163.com

通讯作者:冯学敏(1986-),男,本科,农艺师,研究方向:热带果树栽培和管理,E-mail:181690586@qq.com

Abstract: In this study, ‘golden’ passion fruit was used as the experiment material, and different doses of UV-C treatment (0, 2.02, 4.04, and 6.06 kJ/m²; the sample subjected to 0 kJ/m² UV-C as the control) were used to treat the fruits before they were stored at 20 °C for 18 d. Compared with the control, on the 9th day of storage, the UV-C treatment led to significant suppression on the decrease of *L** value, the increase of *b** value ($P<0.05$), and the decrease of titratable acid (TA) and flavonoid contents ($P<0.05$), while maintaining *a** values as negative values and reducing the decay index and shrinkage index; The vitamin C contents of the fruits treated by UV-C at 2.02 or 4.04 kJ/m² were 2.66 and 2.11 mg/100 g, respectively, which were higher than that of the control; The respiration rates of the fruits treated by UV-C at 2.02 or 6.06 kJ/m² were 7.84 and 16.96 mg CO₂/g FW h, respectively, which were lower than that of the control, although there was no significant effect on the content of total soluble solids, total phenolic content and firmness value ($P<0.05$); The UV-C treatment at 6.06 kJ/m² increased cell membrane permeability and decreased total phenolic content. In general, the effect of the UV-C treatment at 2.02 kJ/m² was better than those of the control and other UV-C treatments, thus can be used as an effective treatment to provide some theoretical guidance for the application of UV-C on postharvest passion fruit.

Key words: UV-C treatment; passion fruit; storage after harvest; index of shrinkage

百香果 (*Passiflora edulis* Sims) 学名西番莲, 多在热区种植, 具有热带水果独特的、浓郁的香气和迷人的风味, 营养价值高, 富含花青素、胡萝卜素和黄酮类物质, 具有保健功效, 对慢性病和退化性疾病有一定疗效^[1], 同时热量、脂肪含量少, 深受人们的喜爱和欢迎。

百香果成熟季节温度较高, 果实采后极易出现果皮失水皱缩、微生物腐烂、氧化产生异味^[2]和通风不良极易“出汗”等品质劣变现象, 致使百香果种植户及销售商经济损失巨大。

短波紫外线 (Short-wave Ultraviolet Light, 简称 UV-C) 处理作为一种新兴的^[3]、非热力杀菌的物理保鲜技术, 能破坏有害微生物的 DNA, 使其失活, 并能通过诱导次生代谢, 提高抗氧化物质含量和抗氧化性能, 增加本身的抗性^[4,5], 提高贮藏效果。UV-C 处理无污染, 无残留, 易操作, 成本低且易于推广, 深受人们的喜爱, 逐步成为农业农村农产品保鲜的主推技术之一。目前, UV-C 处理在韭菜^[6]、番茄^[7]、菠菜^[8]、平菇^[9]、山竹^[10]、油桃^[11]和葡萄^[12]等果蔬保鲜上都有不同程度的研究, 但在百香果保鲜上的应用研究甚少。而且, UV-C 处理的影响不仅与应用剂量有关, 还因植物种类而异^[13]。因此, 有必要对不同剂量的 UV-C 对百香果的作用效果进行测试, 找出保持或者提高产品品质的合适剂量。所以, 本实验以‘黄金’百香果为材料, 进行不同剂量的 254 nm 波长的 UV-C 处理, 比较其对百香果采后生理和贮藏品质的影响, 以期得出较好的处理剂量, 为百香果采后保鲜技术提供一种新选择。

1 材料与方法

1.1 实验材料

‘黄金’百香果 (品种是‘保香一号’), 成熟度为八到九成熟, 采收于海南省保亭县一农场。采收后的百香果立即运回海南大学园艺学院果树实验室。用清水清洗, 去除表面灰尘和细菌等杂质, 自然晾干 2 h, 挑选出大小、成熟度一致, 且无机械损伤, 无病虫害的果实进行后续实验。

1.2 实验试剂和仪器

1.2.1 实验试剂

氢氧化钠、石英砂、2,6-二氯酚、无水乙醇、盐酸、标准抗坏血酸、草酸、碳酸氢钠、甲醇等均为分析纯。

1.2.2 实验仪器

TA.touch 质构仪, 上海保圣实业发展有限公司; PAL-1 手持数显糖度计, 广州市爱宕科学仪器有限公司; Dansenser®CheckPoint 便携式 O₂/CO₂ 顶空分析仪, 美国 MOCON 公司; LS171 色差仪, 深圳市林上科技有限公司; FE30K 电导率仪, 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司; HR/T20M 离心机, 湖南赫西仪器装备有限公司; SW-CJ-1F 超净工作台, 苏州安泰空气技术有限公司; BCE323-1CCN 天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; T6 紫外分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; UV-B 型双通道紫外辐照强度测量计, 北京师大光电厂。

1.3 试验方法

1.3.1 处理方法

将挑选出的果实随机分成4组，一组不做任何处理，记为对照(CK)，其他三组分别用紫外灯管(巨光牌30W，波长253.7nm，内长91cm)，照射处理10、20和30min，中间5、10和15min的时候翻面，使果实表面均匀受到照射，紫外辐照强度测量计测量照射强度为3.37($\times 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)，根据公式(1)换算剂量为2.02、4.04和6.06 kJ/m^2 。照射结束后，立即用PE薄膜袋包装，每个处理100个果实，其中20个果实用于观察腐烂和皱缩指数。固定3袋，每袋6个果实用于测量失重率和呼吸速率。其余果实每9个装一袋用于测定其他指标。装好后置于(20 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度90% $\pm 1\%$ 的恒温箱中贮藏，贮藏期间每隔2d取样，每个处理设3个生物学重复，每个重复3个果，统计相关数据和测定相关指标。

$$D = \frac{I \times t}{1000} \quad (1)$$

式中：

D —剂量， kJ/m^2 ；

I —照射强度， W/m^2 ；

t —时间，s。

1.3.2 测定方法

1.3.2.1 色泽和亮度

用色差仪测定果面色泽和亮度值，沿果实赤道对称取2个点，作为测量点。记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值。色泽 L^* 值表示亮度， a^* 和 b^* 值表示色泽， a^* 正值表示红色，负值表示绿色， b^* 正值表示黄色，负值表示蓝色。

1.3.2.2 腐烂指数

以果实表面出现水渍状病斑作为腐烂的判别依据。将腐烂面积按照体积分数将果实划分为4级：0级，无腐烂；1级，果面有0%~25%腐烂；2级，腐烂面积占果实面积的25%~50%；3级，腐烂面积大于果实面积的50%。按照下式计算果实腐烂指数：

$$I = \frac{\sum i \times Ni}{4 \times N} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

I —腐烂指数，%；

i —腐烂级别，0~3；

Ni —该级别果数，0~N；

N —总果数。

1.3.2.3 皱缩指数

参考帅良等^[14]方法。

以果实表面出现皱缩为判断依据，将皱缩面积按体积分数将果实划分为5级：0代表无皱缩；1代表0%~25%皱缩；2代表25%~50%皱缩；3代表50%~75%皱缩；4代表75%~100%皱缩。按照下式计算皱缩指数：

$$B = \frac{\sum i \times Ni}{N} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

B —皱缩指数(SI)，%；

i —皱缩级别，0~4；

Ni —该级别果数，0~N；

N —总果数。

1.3.2.4 失重率

用电子天平称重，取每组百香果失重率平均值。计算公式如下：

$$C = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

C —失重率(WL)，%；

W_0 —初始质量，g；

W_t —测量当天质量，g。

1.3.2.5 果实硬度值

参考谢晶等^[15]方法，使用质构仪测定。

每个处理6个百香果果实，每个百香果沿赤道选取均匀分布的四个点进行测定，并取四个点测定结果的平均值作为每个果实的硬度值。实验选用P50柱形探头进行压缩阻力实验，测试类型为下压，目标模式为形变，目标值为10%，停留时间为2s，测试前速度为60mm/s，测试速度为60mm/s，测试后速度为60mm/s，感应力为6g。根据所得到的质地特征曲线来得知百香果果实的硬度值。

1.3.2.6 果实可溶性固定物(TSS)含量

果浆部分，用纱布过滤，取滤液1~2滴，滴到数显糖度计测定镜面上，读数即为可溶性固形物的质量分数含量(%)。

1.3.2.7 可滴定酸(TA)含量

参考曹建康等^[16]方法，稍作修改。

取2mL过滤后果汁，等同于2g，加8mL蒸馏水，加入2~3滴酚酞指示剂，采用0.1mol/L的氢氧化钠溶液滴定法测定。使用如下公式计算结果，表示为质量分数：

$$W = \frac{V \times Nb \times f \times (V_t - V_0)}{W_t \times V_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

W —100 g 新鲜样品中 TA 的含量, %;

V —样品提取液的总体积, mL;

Nb —标定后的氢氧化钠的摩尔浓度, mmol/mL;

V_t —滴定提取液所用的氢氧化钠的体积, mL;

V_0 —滴定空白所用的氢氧化钠的体积, mL;

W_t —样品质量, g;

V_s —滴定时所用提取液的体积, mL;

f —折算系数(1 mmol 氢氧化钠折算为主要有机的克数, 0.064 g/mmol)。

1.3.2.8 呼吸强度

参考程赤云等^[17]方法, 采用便携式 O₂/CO₂ 顶空分析仪测定。

选取 6 个百香果称重, 放入 2 L 塑料容器中, 常温(25 ℃)下密闭 1.5 h。然后收集 10 μL 的气体, 用采样器插入柱中, 每个密封容器采集 3 次。使用以下公式计算结果:

$$Ri = \frac{N \times 19.64 \times (V_t - V_0)}{W \times t} \quad (6)$$

式中:

Ri —呼吸速率, mg CO₂/(g FW h);

N —二氧化碳浓度, %;

V_t —密封容器体积, L;

V_0 —密封果实体积, L;

W —密封果实质量, g;

t —密封时间, h;

19.64—二氧化碳的密度, mg/L。

1.3.2.9 果皮细胞膜透性

参考曹建康等^[16]方法测定, 稍有修改。

用简易打孔器, 直径约 0.5 cm, 沿赤道打孔取果皮圆片, 每个重复 10 片, 用蒸馏水浸泡 30 min, 用电导率仪测定并记录数值 E_1 , 接着沸水浴 30 min, 自来水冷却到室温, 再用电导率仪测定并记录数值 E_2 。使用下式计算结果:

$$H = \frac{E_1}{E_2} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

H —细胞膜透性, %;

E_1 —煮沸前电导率, μs/cm;

E_2 —煮沸后电导率, μs/cm。

1.3.2.10 维生素 C (Vc) 含量

参考曹建康等^[16]方法, 稍作修改。

取 2 mL 过滤后果汁, 记为 2 g, 加质量分数为 2% 草酸 8 mL, 混合摇匀, 采用 2,6-二氯酚法测定。使用如下公式计算结果:

$$Q = \frac{(V_2 - V_1) \times V_t \times T \times 100}{V_s \times m} \quad (8)$$

式中:

Q —100 g 样品中含有 Vc 的毫克数, mg/100 g FW;

V_2 —滴定提取液所用的染料体积, mL;

V_1 —空白滴定所用染料的体积, mL;

V_t —样品提取液的总体积, mL;

T —1 mL 染料所能氧化的标准抗坏血酸的量, mg/mL;

V_s —滴定时所取的样品提取液体积, mL;

m —测定样品质量, g。

1.3.2.11 总酚和类黄酮含量

参考曹建康等^[16]方法测定, 采用盐酸-甲醇法测定, 稍有修改。

提取: 称取 2.0 g 果皮组织, 加入少许经预冷的体积分数为 1% 盐酸-甲醇溶液, 在冰浴条件下研磨匀浆后, 转入 20 mL 刻度试管中。用 1% 盐酸-甲醇溶液冲洗研钵, 一并转移到试管中, 定容至 20 mL, 混匀, 于 4 ℃ 避光提取 20 min, 期间摇动数次, 然后过滤, 收集滤液待用。

测定: 以 1% 盐酸-甲醇溶液作空白参比调零, 取滤液分别于波长 280 nm、325 nm 处测定溶液的吸光度值, 重复三次。

计算结果: 总酚含量 = OD₂₈₀/g (FW)

类黄酮含量 = OD₃₂₅/g (FW)

1.3.3 数据处理和统计分析

使用 Microsoft office 2021 软件对试验数据进行整理, SPSS 26 (IBM) 做差异显著性分析 (Duncan 法, 置信区间 95%), Originpro 2021 作图。

2 结果与讨论

2.1 UV-C 处理对百香果外观色泽的影响

百香果采后颜色和亮度的变化, 伴随着果实成熟和衰老的进程。 L^* 值的大小表示亮暗, 正值表示偏亮, 负值表示偏暗。如图 1a 所示, 对照和 UV-C 处理的果实, L^* 值在整个贮藏期间均呈现出先上升, 后平缓下降的趋势, UV-C 处理的果实, 前 6 d, L^* 值低于对照, 后面整个贮藏期间, 除了第 15 天之外, 均显著高于对照 ($P < 0.05$)。这与百香果成熟时颜色由绿变黄, 亮度增加, 随着衰老, 颜色变暗至褐色一致。施衡乐等^[18]用 1、3 和 5 kJ/m² 的 UV-C 处理紫

背天葵，所有剂量均能抑制 L^* 值的下降。

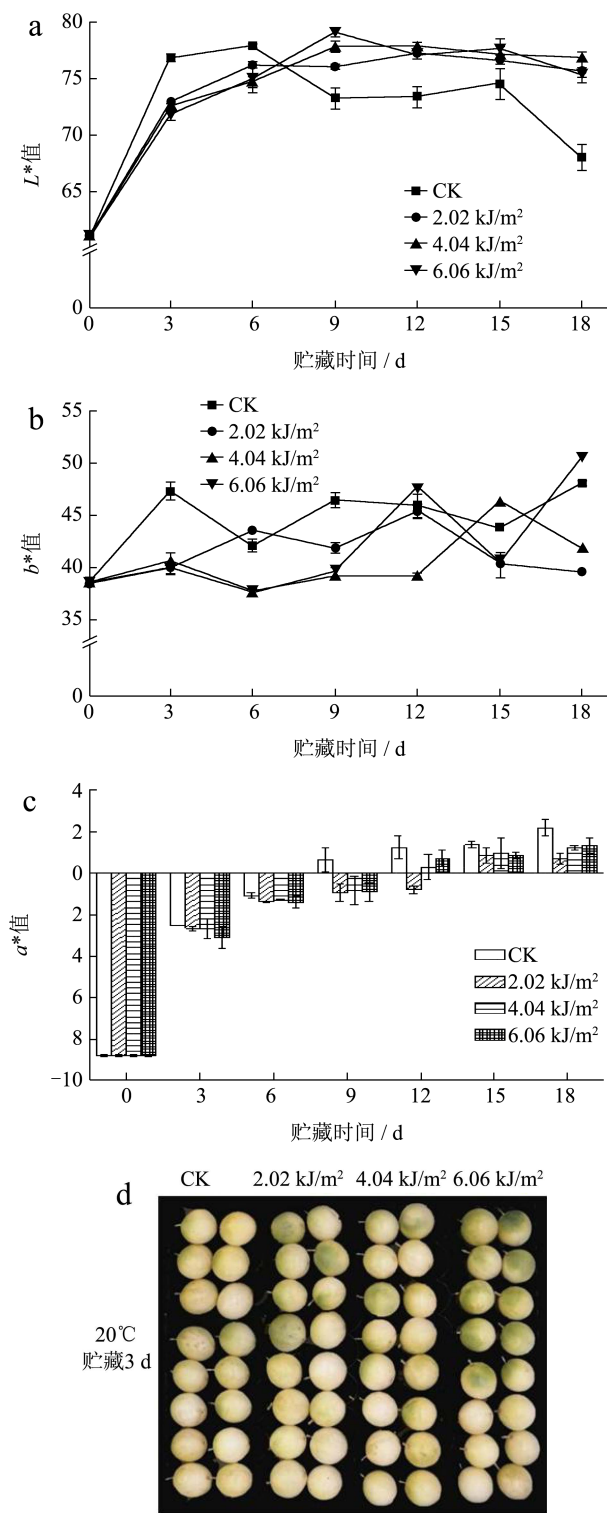


图1 UV-C处理对百香果 L^* 值 (a)、 b^* 值 (b)、 a^* 值 (c) 和贮藏3 d 表现 (d) 的影响

Fig.1 Effect of UV-C treatment on L^* value (a), b^* value (b), a^* value (c), and the Appearance on 3th day (d) of passion fruit

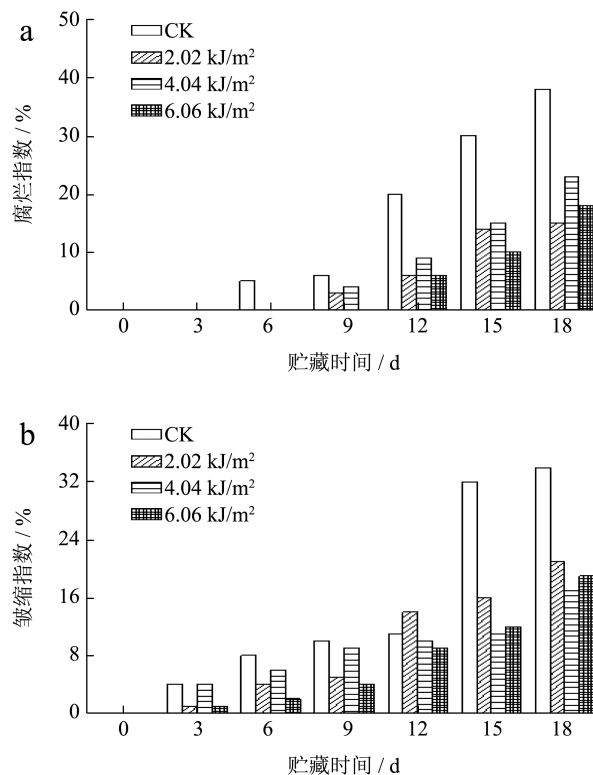
b^* 值，正值表示黄色，负值表示蓝色。如图 1b 所

示，整个贮藏期间， b^* 值呈现波动上升的趋势，第 3 天，UV-C 处理的 b^* 值显著低于对照的 b^* 值，但是各处理之间无显著差异 ($P < 0.05$)，说明 UV-C 处理在前期能保持果实的绿色^[10]，与对照组相比，在贮藏前 9 d，UV-C 处理显著延迟了山竹花萼的鲜绿色向棕色的转变。

a^* 值的正值表示红色，负值表示绿色。如图 1c 和 1d 所示，贮藏前 9 天，UV-C 处理果实的 a^* 值小于对照果实的 a^* 值，且均为负值，对照组第 9 d 开始已经表现为正值，说明 UV-C 处理在贮藏前期能保持果实的绿色，抑制叶绿素的降解，陈铭中等^[19]用 UV-C 处理香蕉，显著减缓了香蕉皮中叶绿素的降解。贮藏后期数值为正值，可能跟果实表面褐变和腐烂有关。

2.2 UV-C处理对果实贮藏品质的影响

果实的腐烂指数反映了处理的保鲜效果。如图 2a 所示，整个贮藏期间，对照和处理果实的腐烂指数均呈现上升的趋势，UV-C 处理抑制了腐烂情况的发生。这与 UV-C 处理能表面杀菌和诱导抗病性的作用有关，Sripong 等^[10]发现 13 kJ/m² 的 UV-C 处理山竹，能抑制 *L. theobromae* 引起的腐烂病发生，而高剂量 40 kJ/m² 和低剂量 6 kJ/m² 却没有显著的效果。



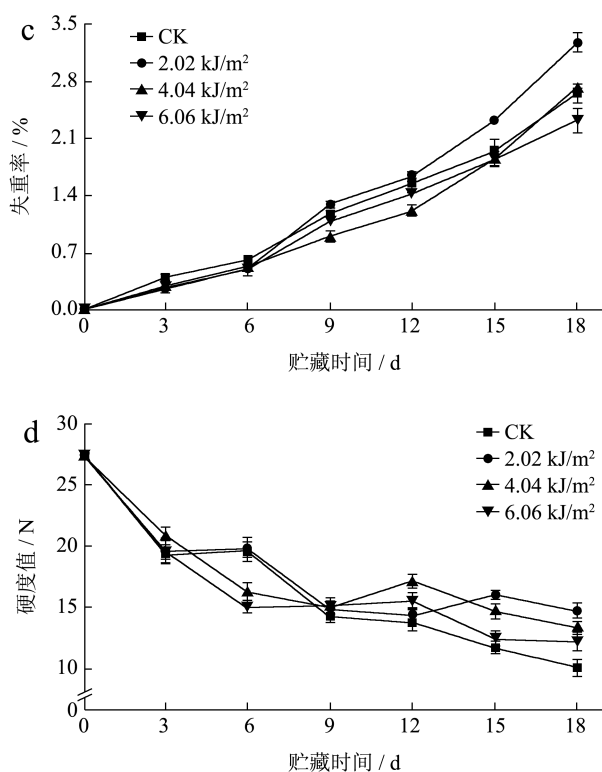


图2 UV-C处理对百香果腐烂指数(a)、皱缩指数(b)、失重率(c)和硬度值(d)的影响

Fig.2 Effect of UV-C treatment on decay index (a), shrinkage index (b), weight loss (c) and (d) firmness of fruit

皱缩指数反映了果实的新鲜度。整个贮藏期间, 对照组和处理组果实的皱缩指数呈现逐步上升的趋势。除第12天外, UV-C处理能够抑制果实的皱缩, 贮藏前12 d, 6.06 kJ/m²的皱缩指数最低(图2b)。与对失重的影响相比, 2.02 kJ/m²处理对皱缩指数的影响, 结果表现不一致, 没有产生负面影响, 这可能与百香果的皱缩是一个复杂的过程, 不完全依赖失水, 还可能与内容物和果皮的降解有关。

失重率的高低反映了果实的失水情况, 也跟果实的新鲜程度有关。如图2c所示, 整个贮藏期间, 所有处理果实的失重率均呈现上升的趋势, 4.04和6.06 kJ/m²处理的果实在贮藏前15 d的失重率低于对照果实的失重率, 但是差异不显著。Sripong等^[10]和施衡乐等^[18]发现, UV-C处理能抑制山竹和紫背天葵采后失重率的增加。本研究中2.02 kJ/m²处理的果实, 仅前6 d对果实失重率有抑制作用, 中后期, 增加了果实的失重, 但不影响外观, 这可能与剂量有关, 也有研究发现UV-C处理增加了‘O’Neal’蓝莓和‘Legacy’蓝莓的鲜重的损失^[20,21]。

果实的硬度值与果实的新鲜度和成熟软化有关。本研究中, 结合保鲜袋包装和20℃条件下贮藏, 果实基本无皱缩, 还是饱满状态, 所以硬度值完全跟成熟衰老有关, 与果皮的严重皱缩导致韧性增强无关。如图2d所示, 果实的硬度值在整个贮藏期间, 均呈现了下降的趋势, 2.02 kJ/m²处理的果实, 一直保持较高的硬度值, 其他UV-C处理在贮藏后期能够抑制硬度值的下降。Jia等^[22]发现5 kJ/cm²的UV-C能降低‘Lingwu long’枣的多聚半乳糖醛酶(PG)、果胶酸裂解酶(PL)、纤维素酶(CeL)和β-半乳糖苷酶(β-GAL), 因此延迟了硬度值的下降。

2.3 UV-C处理对果实采后生理的影响

整个贮藏期间, 所有果实, TSS含量均呈现缓慢下降的趋势, 与对照相比, UV-C处理不能显著抑制TSS含量的下降(表1), González-Villagra等^[21]也发现UV-C处理对蓝莓的TSS含量变化没有明显的影响, 但有人发现UV-C处理水蜜桃^[23]和刺梨^[24], 均有效保持了TSS的含量。

如表1所示, UV-C处理的TA含量呈现先下降, 后波动上升最后下降的趋势, 对照组的果实呈现先下降, 后上升的趋势, 贮藏第3至9天, 2.02和4.04 kJ/m²处理的果实, TA含量均比对照高, 贮藏第9天时, 所有处理TA含量均显著高于对照的($P < 0.05$)。研究人员用UV-C处理刺梨和‘千禧’樱桃番茄, 发现可以延缓TA的下降^[24,25]。

如图3a所示, 在整个贮藏期间, 对照组和UV-C处理果实的呼吸速率均呈现先下降后缓慢上升的趋势, 2.02和6.06 kJ/m²处理的果实, 在整个贮藏期间, 均保持了较低的呼吸速率。其中第3天时, 2.02和6.06 kJ/m²处理果实的呼吸强度分别为39.99和40.82 mg CO₂/(g FW h), 均显著低于对照果实的呼吸速率66.49 mg CO₂/(g FW h)和4.04 kJ/m²处理果实的呼吸速率61.12 mg CO₂/(g FW h) ($P < 0.05$)。Michailidis等^[26]发现1.2、3.0和6.0 kJ/m²的UV-C处理能够降低甜樱桃的呼吸强度, 且跟处理剂量成正比, 有人推测这可能与UV-C能够抑制三羧酸循环中和线粒体呼吸电子传递链上某些关键酶的活性有关^[27]。本研究中没有测到呼吸高峰, 与前人报道百香果属于呼吸跃变型水果^[28]不符, 这可能与采摘期过晚, 没有经过采后的后熟过程有关, 也可能是因为百香果的后熟过程不如香蕉和芒果明显。

表 1 UV-C处理对果实TSS和TA含量的影响

Table 1 Effect of UV-C treatment on TSS and TA content of fruit

贮藏时间/d	TSS 含量/%				TA 含量/%			
	CK	2.02 kJ/cm ²	4.04 kJ/cm ²	6.06 kJ/cm ²	CK	2.02 kJ/cm ²	4.04 kJ/cm ²	6.06 kJ/cm ²
0	17.63 ± 0.18 ^a	17.63 ± 0.18 ^a	17.63 ± 0.18 ^a	17.63 ± 0.18 ^a	3.08 ± 0.05 ^a	3.08 ± 0.05 ^a	3.08 ± 0.05 ^a	3.08 ± 0.05 ^a
3	17.47 ± 0.29 ^a	18.00 ± 0.24 ^a	17.40 ± 0.09 ^a	17.67 ± 0.05 ^a	2.45 ± 0.08 ^{ab}	2.57 ± 0.07 ^{ab}	2.73 ± 0.09 ^a	2.36 ± 0.08 ^b
6	18.10 ± 0.08 ^a	18.17 ± 0.19 ^a	17.77 ± 0.20 ^a	17.70 ± 0.24 ^a	2.20 ± 0.09 ^c	2.60 ± 0.03 ^{ab}	2.70 ± 0.04 ^a	2.40 ± 0.03 ^{bc}
9	17.37 ± 0.07 ^a	17.27 ± 0.07 ^a	17.57 ± 0.19 ^a	17.27 ± 0.12 ^a	2.29 ± 0.09 ^d	2.61 ± 0.04 ^{bc}	3.06 ± 0.05 ^a	2.79 ± 0.08 ^b
12	17.27 ± 0.07 ^a	17.33 ± 0.03 ^a	17.33 ± 0.15 ^a	17.20 ± 0.12 ^a	2.65 ± 0.05 ^c	2.88 ± 0.05 ^{ab}	2.52 ± 0.03 ^c	3.05 ± 0.08 ^a
15	16.67 ± 0.15 ^a	17.00 ± 0.05 ^a	16.63 ± 0.15 ^a	16.80 ± 0.12 ^a	2.65 ± 0.05 ^{ab}	2.54 ± 0.05 ^b	2.76 ± 0.05 ^{ab}	2.85 ± 0.08 ^a
18	16.83 ± 0.12 ^a	17.23 ± 0.07 ^a	17.00 ± 0.17 ^a	16.90 ± 0.12 ^a	3.19 ± 0.09 ^a	2.54 ± 0.08 ^b	2.66 ± 0.10 ^b	2.45 ± 0.08 ^b

注: TSS 和 TA 均用平均值 ± 标准误差表示, 表中小写字母代表同一贮藏时间段, 各处理之间的差异显著性水平 ($P < 0.05$)。

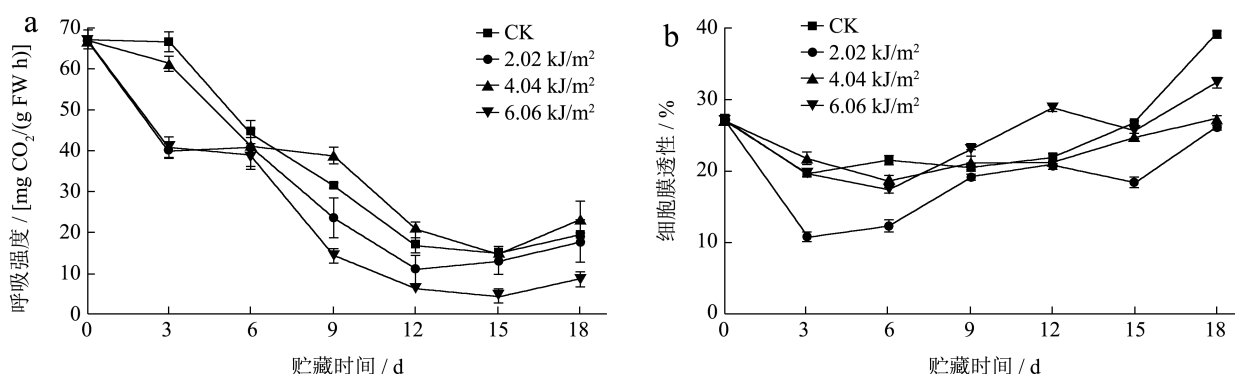


图 3 UV-C 照射对百香果呼吸速率 (a) 和果皮细胞膜透性 (b) 的影响

Fig.3 Effect of UV-C treatment on respiration rate (a) and penetration of cell membrane (b) of fruit

表 2 UV-C处理对总酚和总类黄酮含量的影响

Table 2 Effect of UV-C treatment on total phenols and total flavonoid content of fruit

贮藏时间/d	总酚含量/(OD ₂₈₀ /g FW)				类黄酮含量/(OD ₃₂₅ /g FW)			
	CK	2.02 kJ/cm ²	4.04 kJ/cm ²	6.06 kJ/cm ²	CK	2.02 kJ/cm ²	4.04 kJ/cm ²	6.06 kJ/cm ²
0	1.04 ± 0.02 ^a	1.04 ± 0.02 ^a	1.04 ± 0.02 ^a	1.04 ± 0.02 ^a	0.95 ± 0.08 ^a	0.95 ± 0.08 ^a	0.95 ± 0.08 ^a	0.95 ± 0.08 ^a
3	1.64 ± 0.01 ^a	1.70 ± 0.00 ^a	1.65 ± 0.02 ^a	1.68 ± 0.02 ^a	0.37 ± 0.00 ^a	0.35 ± 0.00 ^a	0.39 ± 0.01 ^a	0.42 ± 0.03 ^a
6	1.54 ± 0.01 ^a	1.53 ± 0.07 ^a	1.36 ± 0.08 ^a	1.03 ± 0.09 ^b	0.73 ± 0.05 ^a	0.75 ± 0.01 ^a	0.79 ± 0.03 ^a	0.58 ± 0.03 ^a
9	1.60 ± 0.03 ^a	1.61 ± 0.02 ^a	1.51 ± 0.04 ^a	1.52 ± 0.03 ^a	0.38 ± 0.01 ^b	0.47 ± 0.01 ^a	0.44 ± 0.02 ^a	0.47 ± 0.01 ^a
12	1.30 ± 0.03 ^c	1.56 ± 0.02 ^a	1.41 ± 0.06 ^{bc}	1.47 ± 0.02 ^{ab}	0.37 ± 0.03 ^a	0.39 ± 0.01 ^a	0.36 ± 0.01 ^a	0.33 ± 0.01 ^a
15	1.55 ± 0.05 ^a	1.39 ± 0.06 ^{ab}	1.40 ± 0.08 ^{ab}	1.28 ± 0.08 ^b	0.41 ± 0.00 ^b	0.75 ± 0.04 ^a	0.83 ± 0.05 ^a	0.46 ± 0.02 ^b
18	1.44 ± 0.01 ^b	1.52 ± 0.01 ^a	1.41 ± 0.02 ^b	1.47 ± 0.02 ^{ab}	0.33 ± 0.00 ^a	0.32 ± 0.01 ^a	0.34 ± 0.01 ^a	0.34 ± 0.01 ^a

注: 总酚含量和类黄酮含量均用平均值 ± 标准误差表示, 表中小写字母代表同一贮藏时间段, 各处理之间的差异显著性水平 ($P < 0.05$)。

果皮细胞膜透性, 如图 3b 所示, 在整个贮藏期间, 所有处理组果实, 均呈现先下降后上升的趋势, 2.02 kJ/m² 处理果实的细胞膜透性, 除了贮藏第 9 天和 12 天外, 均显著低于对照和其他两个 UV-C 处理组 ($P < 0.05$), 贮藏第 9 天时, 4.04 和 6.06 kJ/m² 的 UV-C 处理组果实的细胞膜透性高于对照组。UV-C 抑制呼吸作用也可能导致了底物消耗的降低, 比如

TA、Vc 等, 从而保持了细胞膜的完整性, 但是与贮藏时间和作用剂量有关。

2.4 UV-C处理对百香果抗氧化品质的影响

贮藏期间, 所有果实的 Vc 含量均呈现先上升后缓慢下降的趋势 (图 4), 贮藏第 9 天时, 除 6.06 kJ/m² 处理以外, 其他剂量处理果实的 Vc 含量

均显著高于对照,第6天至贮藏结束,2.02 kJ/m²处理的果实的Vc含量一直高于对照,且在第9和18天时,含量为18.24和17.99 mg/100 g FW,分别显著高于对照的Vc含量15.58和13.93 mg/100 g FW ($P<0.05$),研究人员用UV-C处理,能够保持刺梨^[24]、樱桃番茄^[25]和西兰花^[29]等果蔬采后Vc的含量。其他4.04和6.06 kJ/m²两个处理在不同的时间段表现的结果不一致。

如表2所示,对照和所有UV-C处理的果实的果皮总酚含量均呈现先上升后波动式下降的趋势,贮藏第3天和12天时,UV-C处理果实的总酚含量均高于对照果实的总酚含量,这与UV-C处理能诱导果实产生次生代谢物质,提高抗氧化能力有关^[30],Nie等^[9]用UV-C单独处理或者结合毕赤酵母生物防治平菇,都能诱导蘑菇中抗菌物质,如总酚和类黄酮的积累,Zhang等^[31]用1.05、2.10和4.20 kJ/m²处理甜樱桃,发现UV-C处理能够提高类黄酮、总酚和总花青素的含量,2.10 kJ/m²处理效果最好,本研究也发现2.02 kJ/m²处理在12 d和18 d的总酚含量均显著高于对照。

整个贮藏期间,类黄酮的含量呈现波动式下降的趋势(表2),贮藏第9天和15天时,UV-C处理的果实均保持了较高的类黄酮含量,其中2.02和4.04 kJ/m²处理组的含量均显著高于对照组的类黄酮含量($P<0.05$),赵雅琦^[32]研究中也发现,与对照果实相比,UV-C处理后的人参果,在贮藏28 d结束后,其黄酮类化合物和总酚类物质的含量保持较高水平。

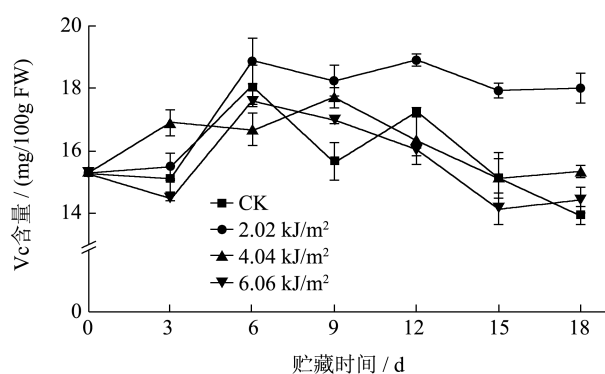


图4 UV-C处理对果实Vc含量的影响

Fig.4 Effect of UV-C treatment on Vc content of fruit

3 结论

本文用UV-C处理‘黄金’百香果,发现贮藏前9 d,UV-C能抑制果实转色,保持果实的绿色,

在贮藏期间,能抑制果实失重率的升高和硬度值的降低,保持较高的Vc含量和TA含量,降低果实的腐烂指数和皱缩指数,同时能够抑制果实的呼吸速率和降低细胞膜的透性,贮藏第9天和15天诱导类黄酮的含量升高,但是对TSS含量的变化没有显著的影响。综合来看,2.02 kJ/m²处理的效果较好,可以推荐用于百香果的采后商品化处理。

参考文献

- [1] DOS REIS L C R, FACCO E M P, SALVADOR M, et al. Antioxidant potential and physicochemical characterization of yellow, purple and orange passion fruit [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(7): 2679-2691.
- [2] 帅良,廖玲燕,吴振先,等.不同保鲜膜包装对百香果采后贮藏品质的影响[J].食品工业,2017,38(12):180-183.
- [3] MENESES-ESPINOSA E, GÁLVEZ-LÓPEZ D, QUIJANO R R, et al. Advantages and disadvantages of using emerging technologies to increase postharvest life of fruits and vegetables [J]. Food Reviews International, 2023.
- [4] 徐文慧,周锦云,蔡静,等.基于低温等离子体技术的果蔬生鲜杀菌保鲜研究进展[J].浙江农业科学,2020,61(1): 121-124.
- [5] 洪雅敏,朱庆庆,刘清,等.紫外线在果蔬保鲜方面的研究进展[J].中国野生植物资源,2017,8:50-52,59.
- [6] 郑杨,曹敏,申琳,等.短波紫外线照射对韭菜采后贮藏品质及活性氧代谢相关酶的影响[J].食品科学,2011,32(20): 307-311.
- [7] MANSOURBAHMANI S, GHAREYAZIE B, KALATEJARI S, et al. Effect of post-harvest UV-C irradiation and calcium chloride on enzymatic activity and decay of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) fruit during storage [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(9): 2093-2100.
- [8] MARTÍNEZ-SÁNCHEZ A, LOZANO-PASTOR P, ARTÉS-HERNÁNDEZ F, et al. Preharvest UV-C treatment improves the quality of spinach primary production and postharvest storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 155: 130-139.
- [9] NIE X B, ZHANG R CH, CHENG L L, et al. Combining the biocontrol yeast *Pichia kluyveri* with UV-C treatment to control postharvest decay of king oyster mushrooms (*Pleurotus eryngii*) caused by *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis* [J]. Biological Control, 2020, 149: 104327.
- [10] SRIPONG K, JITAREERAT P, UTHAIRATANAKIJ A. UV irradiation induces resistance against fruit rot disease and improves the quality of harvested mangosteen [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 149: 187-194.
- [11] ZHANG W L, JIANG H T, CAO J K, et al. UV-C

- treatment controls brown rot in postharvest nectarine by regulating ROS metabolism and anthocyanin synthesis [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180: 111613.
- [12] SHENG K L, ZHENG H H, SHUI SH SH, et al. Comparison of postharvest UV-B and UV-C treatments on table grape: changes in phenolic compounds and their transcription of biosynthetic genes during storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 138: 74-81.
- [13] DARRÉ M, VICENTE A R, CISNEROS-ZEVALLOS L, et al. Postharvest ultraviolet radiation in fruit and vegetables: applications and factors modulating its efficacy on bioactive compounds and microbial growth [J]. *Foods*, 2022, 11(5): 653.
- [14] 帅良,杨玉霞,廖玲燕,等.海藻酸钠涂膜对百香果贮藏品质的影响[J].*食品工业科技*,2016,37(13):332-334,339.
- [15] 谢晶,潘家丽,覃子倚,等.褪黑素处理对百香果采后生理及质构特性的影响[J].*保鲜与加工*,2021,21(7):1-7.
- [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.
- [17] 程赤云,张娜,朱喜成,等.PBAT/PLA复合膜结合1-MCP处理对金玉兰菜保鲜效果的影响[J].*食品研究与开发*,2023,44(6):21-29.
- [18] 施衡乐,吴伟杰,郜海燕,等.短波紫外线处理对紫背天葵采后贮藏品质的影响[J].*核农学报*,2018,32(7):1377-1383.
- [19] 陈铭中,钟旭美,林海生等.UV-C处理对采后香蕉贮藏防御性成分和品质的影响[J].*江苏农业学报*,2022,38(2): 528-538.
- [20] SÁNCHEZ G J, CONTIGIANI E V, CORONEL M B, et al. Study of UV-C treatments on postharvest life of blueberries ‘O’Neal’ and correlation between structure and quality parameters [J]. *Heliyon*, 2021, 7(6): e07190.
- [21] GONZÁLEZ-VILLAGRA J, REYES-DÍAZ M, ALBERDI M, et al. Impact of cold-storage and UV-C Irradiation postharvest treatments on quality and antioxidant properties of fruits from blueberry cultivars grown in southern chile [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(4): 1751-1758.
- [22] JIA L L, LI Y, LIU G SH, et al. UV-C delays senescence in ‘Lingwu long’ jujube fruit by regulating ROS and phenylpropanoid metabolism [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 194: 383-393.
- [23] 李晓宇,杜小龙,刘影,等.UV-C结合新型生物保鲜纸对水蜜桃常温贮藏品质的影响[J].*食品科技*,2019,44(6):56-62.
- [24] 张志敏,冉旭勇,侯发民,等.短波紫外线辐射处理对刺梨果实贮藏品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2020,46(16): 201-207.
- [25] 姚萍,蒋海峰,刘瑶,等.不同处理对樱桃番茄贮藏品质的影响[J].*保鲜与加工*,2021,21(3):8-15.
- [26] MICHA ILIDIS M, KARAGIANNIS E, POLYCHRONIADOU C, et al. Metabolic features underlying the response of sweet cherry fruit to postharvest UV-C irradiation [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 144: 49-57.
- [27] YANG ZH F, CAO SH F, SU X G, et al. Respiratory activity and mitochondrial membrane associated with fruit senescence in postharvest peaches in response to UV-C treatment [J]. *Food Chemistry*, 2014, 161: 16-21.
- [28] 乔沛,殷菲彤,李静,等.百香果采后贮藏保鲜研究进展[J].*保鲜与加工*,2020,20(4):220-225,229.
- [29] 刘泽松,史君彦,左进华,等.UV-C和LED红光复合处理对西兰花贮藏品质的影响[J].*食品科学*,2020,41(17):238-245.
- [30] PERERA W P T D, NAVARATNE S B, WICKRAMASINGHE I. Review on effect of postharvest illumination by fluorescent and ultraviolet light waves on the quality of vegetables [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 45(2): e13960.
- [31] ZHANG Q, YANG W B, LIU J CH, et al. Postharvest UV-C irradiation increased the flavonoids and anthocyanins accumulation, phenylpropanoid pathway gene expression, and antioxidant activity in sweet cherries (*Prunus avium* L.) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 175: 111490.
- [32] 赵雅琦.不同贮藏方法和处理对人参果采后品质的影响及机制研究[D].南宁:广西大学,2023.