

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.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.02.029

UV-C 处理对采后香蕉贮藏防御性成分和品质的影响

陈铭中^{1,2,3}, 钟旭美^{2,3}, 林海生¹, 秦小明¹

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524088; 2. 阳江职业技术学院食品与环境工程系, 广东 阳江 529566; 3. 阳江市功能性食品研发与质量评价重点实验室, 广东 阳江 529566)

摘要: 为了提高香蕉的贮藏品质, 研究短波紫外线 (UV-C) 对香蕉贮藏过程中主要酶活性和抗氧化性的影响, 用 0.02 kJ/m² 剂量的 UV-C 处理香蕉后, 于 25 °C 贮藏 18 d, 研究 UV-C 处理对香蕉果实腐烂率、失质量率、总叶绿素含量、总酚 (TP) 含量、总黄酮 (TF) 含量、纤维素酶 (CL) 活性、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (ABTS) 自由基清除率、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 自由基清除率、铁离子抗氧化能力 (FRAP 值)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性的影响。结果表明, UV-C 处理显著降低了香蕉果实的腐烂率, 减少了失质量, 同时显著减缓了香蕉皮中叶绿素的降解, 抑制了纤维素酶活性, 激活了 PAL、SOD 和 POD 的活性, 提高了多酚、总黄酮含量。通过对 12 个指标的相关性和聚类分析发现, 经 UV-C 处理后, PAL 的激活, 对诱导增加防御性成分 TF、TP、SOD 和 POD 有显著影响, 有利于维持香蕉果实在贮藏过程中的品质。由此可见, 0.02 kJ/m² 剂量 UV-C 处理可以提高香蕉果实抗病相关酶活性和抗氧化能力, 延缓香蕉成熟, 增强香蕉的抗病性, 提升香蕉在贮藏期间的品质。

关键词: 香蕉; 短波紫外线 (UV-C) 照射; 抗病相关酶; 抗氧化能力

中图分类号: TS255.3; S668.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)02-0528-11

Effects of UV-C treatment on defensive components and quality of post-harvest banana during storage

CHEN Ming-zhong^{1,2,3}, ZHONG Xu-mei^{2,3}, LIN Hai-sheng¹, QIN Xiao-ming¹

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Department of Food and Environmental Engineering, Yangjiang Polytechnic, Yangjiang 529566, China; 3. Yangjiang Key Laboratory of Functional Food R & D and Quality Analysis, Yangjiang 529566, China)

Abstract: In order to improve the storage quality of banana, the effects of short wave ultraviolet (UV-C) on the main enzyme activity and antioxidant activity of banana during storage were studied. Bananas were stored at 25 °C for 18 days after being treated with 0.02 kJ/m² UV-C. The effects of UV-C treatment on decay rate, weight loss rate, total chlorophyll content, total phenol (TP) content, total flavonoids (TF) content, cellulase (CL) activity, 2,2'-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) radical scavenging rate, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging rate, ferric reducing antioxidant power (FRAP) value, phenylalanine ammonia lyase (PAL) activity, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity in banana fruits were investigated. The results showed that UV-C treatment significantly reduced

收稿日期: 2021-06-19

基金项目: 亚热带果蔬加工与利用技术研究项目 (2013050214); 广东省普通高校特色创新类项目 (2019GKTSCX122); 广东省科技专项基金项目 (SDZX2020028)

作者简介: 陈铭中 (1979-), 男, 广东阳江人, 博士, 副教授, 研究方向为食品加工与贮藏。 (E-mail) gdyjchendan@163.com

通讯作者: 秦小明, (E-mail) qinxm@gdou.edu.cn

the decay rate and the weight loss rate, slowed down the degradation of chlorophyll significantly, inhibited the cellulase activity, promoted the activities of PAL, SOD, POD, and improved the contents of total polyphenols and flavonoids. The correlation and cluster analysis of 12 indices showed that the activation of PAL after UV-C treatment had a significant effect on the induction of the increase of defen-

sive components TF, TP, *SOD* and *POD*, which was beneficial to the quality maintenance of banana fruit during storage. In conclusion, 0.02 kJ/m² UV-C treatment can improve the activity of disease resistant-related enzymes and antioxidant capacity of banana fruit, delay the ripening, enhance the disease resistance, improve the quality of banana during storage.

Key words: banana; short wave ultraviolet (UV-C) irradiation; disease resistant-related enzymes; antioxidant capacity

香蕉是一种深受消费者喜爱的水果,其产量在世界水果产量中排第3^[1],在中国水果产量中排第5(国家统计局2020年的数据),国内香蕉主产区在广东、广西和海南等地^[2]。香蕉的生长周期较长,营养价值高,含有多种生物活性化合物,如类胡萝卜素、酚类、生物胺和植物甾醇等^[3-4],属于呼吸跃变型水果,收获后会快速软化,并发生氧化损伤,出现皮斑和真菌腐烂等,在常温下的保质期相对较短,而低温贮藏会造成冷害^[5-7]。常规的水果蔬菜保鲜方法有化学方法(如1-甲基环丙烯处理法^[8])、生物方法(如壳聚糖涂膜法^[9])和物理方法(如低温法)等,早期的保鲜方法主要是应用化学方法贮藏,但是随着人们生活水平的提高,对食品质量安全的意识逐渐增强,无残留、绿色的保鲜方法逐渐开始代替化学保鲜方法。

短波紫外线(Ultra-violet, UV-C)处理是一种安全、环境友好、经济型的无化学残留的物理方法^[10]。相关研究结果表明,合适剂量的UV-C处理对采后西红柿^[11]、草莓^[12]、桃子^[13]、葡萄^[14]等水果有抑制软化、延缓成熟和诱导有益次生代谢物产生、增强抗病性等作用,能够较好地保持采后果蔬的品质^[15]。本研究主要分析UV-C处理香蕉的合适剂量,对比处理前后的香蕉果实品质和抗氧化能力,旨在为将UV-C技术应用于香蕉乃至其他水果保鲜中提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验原料 本试验香蕉采摘自广东省阳江市阳春市果园,于采摘当天运至实验室处理备用。

1.1.2 试验试剂 甲醇、硝酸铝、无水碳酸钠、没食子酸、无水乙酸钠,购自天津市大茂化学试剂厂;乙醇、冰乙酸,购自天津市富宇精细化工有限公司;亚硝酸钠、氢氧化钠,购自天津市凯通化学试剂有限公司;福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2-联氮基-双-(3-乙基

苯并噻唑啉-6-磺酸)二氢盐[2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS]、2,4,6-三吡啶基三嗪[2,4,6-Tri(2-pyridinyl)-1,3,5-triazine, TPTZ],购自北京欧卡技术有限公司;芸香苷,购自上海源叶生物科技有限公司;过硫酸钾,购自山东西亚化学工业有限公司。

1.1.3 主要仪器与设备 TGL-18台式高速冷冻离心机,购自上海卢湘仪离心机仪器有限公司;KQ-250E超声清洗器,购自昆明超声仪器有限公司;FA224电子天平,购自上海舜宇恒平科学仪器有限公司;UV-2600紫外-可见分光光度计,购自岛津中国有限公司;DK-S24恒温水浴锅,购自上海精宏实验设备有限公司;A11分析研磨机,购自德国IKA公司;超低温冰箱,购自中科美菱公司;TN-2254型紫外辐射照度计,购自广州泰纳电子科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 合适剂量的UV-C处理香蕉 绿熟香蕉采摘于广东省阳春市果园,挑选八成熟、大小一致、无病害、无损伤的香蕉,当天运回实验室,将香蕉去柄分开后,用自来水缓慢清洗香蕉果实表面的物理杂质,再用蒸馏水润洗3遍,用风扇吹干后,随机分为对照组和处理组。在前期试验中,用0.01 kJ/m²、0.02 kJ/m²、0.03 kJ/m²、0.04 kJ/m²、0.06 kJ/m²、0.08 kJ/m² 6种不同剂量的UV-C处理香蕉,观察其外观和贮藏效果,发现在常温(25℃)下贮藏5 d后,与对照相比,0.06 kJ/m²、0.08 kJ/m²剂量UV-C处理的香蕉果实发生了明显褐变,0.03 kJ/m²、0.04 kJ/m²剂量UV-C处理的香蕉果实在贮藏7 d时出现褐变,与Ding等^[16]的报道类似,而0.01 kJ/m²、0.02 kJ/m²剂量UV-C处理的香蕉则无褐变。结合贮藏效果发现,0.02 kJ/m²剂量UV-C处理效果最佳,因此确定本试验的UV-C照射剂量为0.02 kJ/m²,这与Pongprasert等^[17]报道的剂量(0.03 kJ/m²)不同,可能是香蕉品种不一致造成的。先将UV-C灯(飞利浦,20 W)打开,待能量稳定后,

用 0.02 kJ/m^2 剂量的紫外线照射香蕉, 对照不照射紫外线。将对照组、处理组香蕉放置于恒温恒湿箱(温度为 25°C , 湿度为 85%) 中避光贮藏^[18], 分别于贮藏起始阶段与贮藏 4 d、8 d、12 d、15 d、18 d 采集对照组和处理组样品, 将香蕉皮快速切碎, 用液氮预冷后放入超低温冰箱(-86°C) 中保存, 用于各项指标的测定。

1.2.2 腐烂率(DR)和失质量率(MLR)的测定

本试验用果实的腐烂率和失质量率来评价贮藏效果, 分别按照公式(1)、公式(2)计算, 当贮藏的香蕉果实出现可见的腐烂斑点即视为腐烂。

$$DR = (\text{腐烂果实数量} / \text{试验果实总数量}) \times 100\% \quad (1)$$

$$MLR = (\text{贮藏前质量} - \text{贮藏后质量}) / \text{贮藏前质量} \times 100\% \quad (2)$$

1.2.3 总叶绿素(TChl.)含量的测定 叶绿素含量的测定采用曹建康等^[19]的方法并稍作修改。准确称取 0.50 g 香蕉果实粉末, 加入 1 ml 80% 丙酮, 在弱光条件下充分研磨, 定容至 10 ml 后于黑暗条件下浸提, 每隔 3 h 振摇 1 次, 浸提至样品残渣颜色变为白色。采用分光光度法测定 663 nm 、 645 nm 处的吸光度, 分别记为 A_{663} 、 A_{645} , 按照公式(3)计算 C_{Tchl} (mg/g , 鲜质量含量):

$$C_{\text{Tchl}} = (20.29A_{645} + 8.05A_{663}) \times V \times F / m / 1000 \quad (3)$$

式中, A_{663} 、 A_{645} 分别为样品测定液在 663 nm 、 645 nm 处的吸光度; V 为提取液体积, 10 ml ; F 为稀释倍数; m 为样品质量, g 。

1.2.4 纤维素酶(CL)活性的测定 CL 活性的测定参照曹建康等^[19]的方法并稍作修改, 准确称取 1.00 g 香蕉果实粉末, 置于离心管中, 用乙醇溶液提取法提取, 于 540 nm 处测定吸光度, 计算样品(鲜质量)的 CL 活性[单位: $\mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{g})$]。

1.2.5 苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的测定 准确称取 0.10 g 香蕉果实粉末, 加入 0.5 ml 0.1 mol/L pH 值为 8.8 的硼酸缓冲液[含 40 g/L 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、 2 mmol/L 乙二胺四乙酸(EDTA)和 5 mmol/L β -巯基乙醇], 冰浴下研磨成匀浆, 于 4°C 、 10000 r/min 离心 15 min , 收集上清液, 即为粗酶提取液^[19]。根据苯丙氨酸解氨酶试剂盒说明书, 按照公式(4)计算 PAL 活性(U/g , 以鲜质量计):

$$PAL \text{ 活性} = 16.6 \times (A_s - A_b) / A_b \quad (4)$$

式中, A_s 表示样品测定管在 290 nm 处的吸光

度; A_b 表示空白对照管在 290 nm 处的吸光度。

1.2.6 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定 准确称取 0.10 g 香蕉果实粉末, 加入 0.4 ml 提取液(0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液, pH 值为 $7.0 \sim 7.4$), 冰浴下研磨成均浆, 于 4°C 、 8000 r/min 离心 10 min , 收集上清液, 即为粗酶提取液。参照超氧化物歧化酶试剂盒说明书, 按照公式(5)计算 SOD 活性(U/g , 以鲜质量计):

$$SOD \text{ 活性} = 11.4 \times \text{抑制百分率} / (1 - \text{抑制百分率}) / m \times F \quad (5)$$

式中, m 为样品质量, g ; F 为稀释倍数。

1.2.7 过氧化物酶(POD)活性的测定 准确称取 0.10 g 香蕉果实粉末, 加入 0.4 ml 生理盐水, 冰浴下研磨成均浆, 4°C 、 8000 r/min 离心 10 min , 收集上清液即为粗酶提取液。根据过氧化物酶试剂盒说明书, 按公式(6)计算 POD 活性(U/mg , 以鲜质量计):

$$POD \text{ 活性} = (A_s - A_c) \times (V_1 / V_2) / 360 / C_{\text{prot}} \times 1000 \quad (6)$$

式中, A_s 、 A_c 分别表示样品测定管、对照管在 420 nm 处的吸光度; V_1 为反应液总体积, ml ; V_2 为取样量, ml ; C_{prot} 为匀浆蛋白浓度, mg/ml 。

1.2.8 甲醇提取液的制备 参考 Silva 等^[20]的甲醇提取法并略作修改。准确称取 0.50 g 香蕉果实粉末, 加入 2 ml 80% 甲醇, 在水浴振荡器中于 60°C 、 50 r/min 振荡 25 min , 然后于 5000 r/min 离心 10 min , 收集上清液, 重复以上步骤提取 2 次。收集、合并上清液, 用 80% 甲醇定容至 10 ml , 于 -20°C 保存备用, 测定总酚(Total phenolic content, TP)含量、总黄酮(Total flavonoid content, TF)含量、DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力和铁离子还原能力(Ferric reducing antioxidant power, FRAP)。上清液在所有环节均用铝箔覆盖, 避免提取物受到光破坏。

1.2.9 总酚含量的测定 取 0.50 ml 按方法 1.2.8 制备的甲醇提取液, 加入 0.5 ml 福林酚溶液(甲醇溶液、 95% 福林酚的体积比为 $1:10$) 手动摇晃 15 s , 加入 1 ml 7.5% 碳酸钠溶液和 1 ml 蒸馏水, 在室温黑暗处放置 1 h , 于 725 nm 处测吸光度。以没食子酸为标准品制作标准曲线, 得到标准方程: $Y = 0.1885x + 0.0265$, $R^2 = 0.9990$ 。将于 725 nm 处测定的吸光度代入标准曲线中计算香蕉果实的总酚含量^[21]。

1.2.10 总黄酮含量的测定 取 2.00 ml 按方法 1.2.8 制备的甲醇提取液置于 10 ml 比色管中,加入 0.4 ml 5%亚硝酸钠溶液,摇匀后静置 5 min;加入 0.4 ml 10%硝酸铝溶液,摇匀后静置 5 min,加入 4 ml 4%氢氧化钠溶液,用 60%乙醇定容至 10 ml;静置显色 10 min 后于 510 nm 处测吸光度。以芸香苷为标准品制作标准曲线,得到标准方程: $Y = 0.1570x + 0.1534$, $R^2 = 0.9999$ 。将于 510 nm 处测定的吸光度代入标准曲线中计算香蕉果实的总黄酮含量^[22]。

1.2.11 对 DPPH 自由基清除能力的测定 取 0.10 ml 按方法 1.2.8 制备的甲醇提取液,加入 3.90 ml 0.063 mmol/L DPPH 甲醇溶液中混合均匀,在室温下放置 20 min,在波长 515 nm 处测定吸光度^[21]。根据公式(7)计算香蕉果实样品提取液对 DPPH 自由基的清除能力:

$$\text{DPPH 自由基清除率} = (A_b - A_s) / A_b \times 100\% \quad (7)$$

式中, A_b 表示空白对照管的吸光度; A_s 表示样品测定管的吸光度。

1.2.12 FRAP 值的测定 FRAP 工作液:20 mmol/L TPTZ 溶液(用 40 mmol/L HCl 溶液配制)、20 mmol/L $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液、0.3 mol/L pH 值为 3.6 的乙酸钠缓冲液,按 10:1:1 的体积比混合配制(现配现用)^[23]。

取 90 μl 样品提取液,加入 900 μl FRAP 工作液,定容至 10 ml 并混匀后,于 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴反应 30 min,在 593 nm 处测定吸光度。以 FeSO_4 为标准品制作标准曲线,得到标准方程: $Y = 0.1914x + 0.0316$, $R^2 = 0.9998$,将于 593 nm 处测定的吸光度代入标准曲线中计算香蕉果实的 FRAP 值。

1.2.13 对 ABTS 自由基清除能力的测定 ABTS⁺ 储备液的配制:配制 2.45 mmol/L 过硫酸钾,用其溶解 ABTS⁺,配成 7 mmol/L ABTS⁺ 储备液^[24],在室温、避光条件下静置 12~16 h,这种储备液可稳定 3~4 d。ABTS⁺ 测定液的配制:将 ABTS⁺ 储备液用磷酸盐缓冲液(10 mmol/L, pH 值为 7.4)稀释,使其在 734 nm 处的吸光度达到 0.700 ± 0.020 。

香蕉果实样品待测液对 ABTS 自由基清除能力的测定:取 4.00 ml ABTS⁺ 测定液,加入 40 μl 样品待测液,振荡 30 s,反应一定时间后于 734 nm 处测定吸光度。根据公式(8)计算香蕉果实样品待测液对 ABTS 自由基的清除能力:

$$\text{ABTS 自由基清除率} = (1 - A_s / 0.700) \times 100\% \quad (8)$$

式中, A_s 表示样品在 734 nm 处的吸光度。

1.3 数据处理与分析

本试验平行测定 3 次,结果以“平均值 \pm 标准差”表示,用 OriginPro 2019b 软件绘图,用 SPSS 21.0 统计软件进行显著性检验,用 R 语言进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 UV-C 处理对香蕉果实腐烂率、失质量率的影响

在 25 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏 18 d 后,UV-C 处理香蕉的色泽青黄、外形饱满、有光泽,个别香蕉果实出现很少的黑点,而对照组香蕉色泽淡黄,已经出现大量黑点,同时部分香蕉果实开始出现腐烂斑块,表明经过合适剂量 UV-C 处理后,香蕉能够保持良好的外观状态。UV-C 处理后常温贮藏 18 d 的香蕉外观状况见图 1。

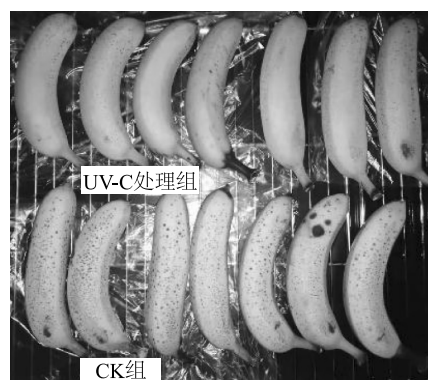
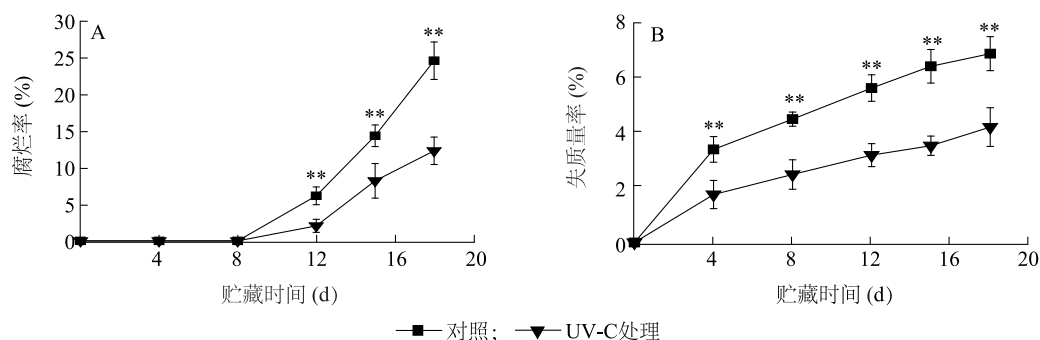


图1 短波紫外线(UV-C)处理后常温贮藏18 d的香蕉果实外观状况

Fig.1 Appearance of banana fruits stored at 25 $^{\circ}\text{C}$ for 18 days after being treated with short wave ultraviolet (UV-C)

由图 2A 可以看出,在常温条件下贮藏 0~8 d, UV-C 处理和对照的样品均未腐烂;贮藏 12~18 d, UV-C 处理和对照的样品腐烂率均呈上升趋势,并且对照的样品腐烂率一直极显著高于 UV-C 处理($P < 0.01$),表明 UV-C 处理可以显著降低贮藏周期中香蕉果实的腐烂率。由图 2B 可以看出,在贮藏周期内,对照、UV-C 处理的失质量率均呈上升趋势,但对照的失质量率始终高于 UV-C 处理,并且它们之间的差异极显著($P < 0.01$),说明 UV-C 处理可较好地抑制香蕉果实水分流失,降低香蕉果实的失质量率,避免采后香蕉果实因失水而形成皱褶,维持香蕉果实的感官品质,有利于香蕉果实的采后贮藏。



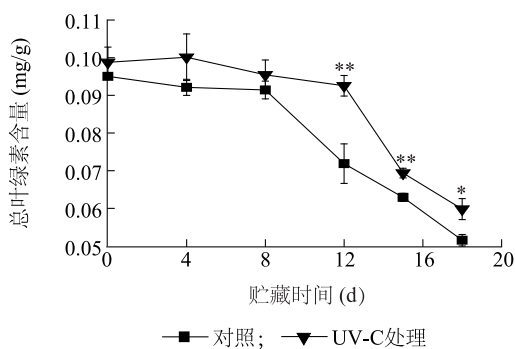
A:腐烂率;B:失质量率。*表示对照与短波紫外线(UV-C)处理间差异显著($P<0.05$),**表示对照与短波紫外线(UV-C)处理间差异极显著($P<0.01$)。

图2 短波紫外线(UV-C)处理对贮藏期间香蕉果实腐烂率和失质量率的影响

Fig.2 Effects of UV-C treatment on decay rate and weight loss rate of banana fruits during storage

2.2 UV-C处理对香蕉果实TChl.含量的影响

叶绿素含量是水果品质的重要指标,在香蕉等果蔬果实的贮藏过程中,随着果实的成熟、衰老,其叶绿素含量不断下降。由图3可以看出,在香蕉果实贮藏期间,UV-C处理的TChl.含量始终高于对照,并且在贮藏12~18 d,相同采样时间的UV-C处理的TChl.含量均极显著高于对照($P<0.01$),对照的TChl.含量在贮藏12 d时出现最大幅度的下降,UV-C处理的TChl.含量在贮藏15 d时才出现较大幅度的下降,其最大降幅出现的时间相对于对照所有延迟,表明UV-C处理延缓了采后香蕉果实TChl.的分解,延迟了其在贮藏期颜色的变黄。



*表示对照与短波紫外线(UV-C)处理间差异显著($P<0.05$),**表示对照与短波紫外线(UV-C)处理间差异极显著($P<0.01$)。

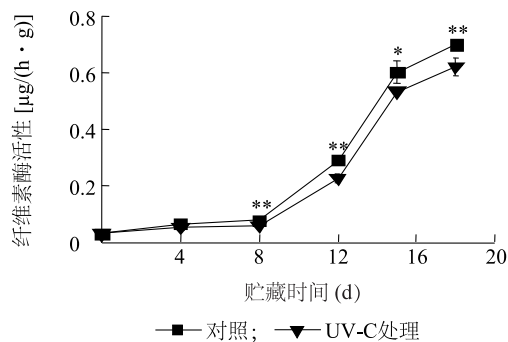
图3 短波紫外线(UV-C)处理对贮藏期间香蕉果实总叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of UV-C treatment on chlorophyll content of banana fruits during storage

2.3 UV-C处理对香蕉果实纤维素酶活性的影响

纤维素酶是催化分解果蔬细胞壁中纤维素的一种酶,其活性影响了果蔬的硬度和品质^[25-26]。本研

究用合适剂量的UV-C处理香蕉后,测定香蕉果实中的纤维素酶活性。由图4可以看出,随着贮藏时间的延长,香蕉果实逐渐成熟,纤维素酶活性逐渐增大,UV-C处理的纤维素酶活性在贮藏前8 d变化不显著,对照的纤维素酶活性在贮藏8 d时就表现出极显著变化($P<0.01$),贮藏8 d至采样结束期间,相同采样时间的2个处理的纤维素酶活性相比,UV-C处理均极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)低于对照,表明UV-C处理可以抑制采后香蕉果实的纤维素酶活性,有利于保持香蕉果实在采后贮藏期的硬度和品质。



*表示对照与短波紫外线(UV-C)处理间差异显著($P<0.05$),**表示对照与短波紫外线(UV-C)处理间差异极显著($P<0.01$)。

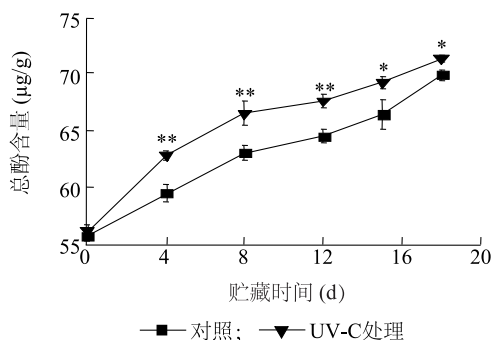
图4 短波紫外线(UV-C)处理对贮藏期间香蕉果实纤维素酶活性的影响

Fig.4 Effects of UV-C treatment on cellulase activity of banana fruits during storage

2.4 UV-C处理对香蕉果实TP、TF含量的影响

香蕉果实中富含酚类化合物,如儿茶素、表儿茶素和单宁,对维持香蕉品质十分重要^[27-28]。由图5可以看出,香蕉果实中的总酚含量随着香蕉成熟度

的增加而不断升高,UV-C 处理与对照的总酚含量在贮藏4~12 d 时差异极显著 ($P<0.01$),在贮藏15~18 d 时差异显著 ($P<0.05$),可能由于贮藏前期(4~12 d)在短波紫外线的诱导下,有利于果实中总酚的生物合成,而在贮藏后期(15~18 d),短波紫外线的诱导增长作用没有前期那么明显。UV-C 处理下,香蕉果实中的总酚含量均高于对照组,与番茄^[29]、鲜切草莓^[30]短波紫外线保鲜的研究结果一致。之所以出现上述现象,可能由于黄酮类化合物是天然的植物抗氧化剂,具有螯合金属离子和清除自由基的特性,也被报道有延缓许多慢性疾病发展和抑制脂质过氧化等作用^[31]。



* 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异显著 ($P<0.05$),
** 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

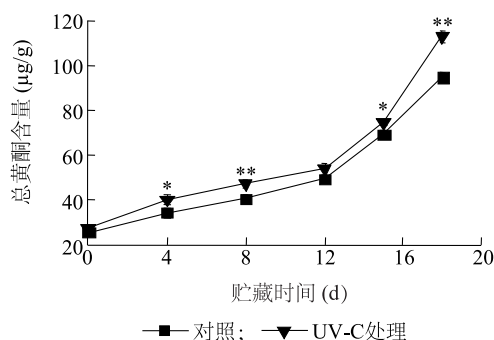
图5 短波紫外线 (UV-C) 处理对贮藏期间香蕉果实总酚含量的影响

Fig.5 Effects of UV-C treatment on total phenol content of banana fruits during storage

由图6可以看出,香蕉果实中的总黄酮含量随着贮藏时间的延长而增加,在UV-C处理下,香蕉果实中的总黄酮含量在贮藏12 d 时与对照间的差异不显著,在其他时间则与对照间差异显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$),并且在同一时期始终高于对照,与焦中高等^[32]采用UV-C处理采后甜樱桃总黄酮含量的变化相似。本研究结果表明,用UV-C处理采后香蕉,能够诱导香蕉在贮藏期抑菌成分(总酚和总黄酮)含量的增长,有利于增强采后香蕉的抗病性,降低其腐败率。

2.5 UV-C 处理对香蕉果实 PAL 活性的影响

PAL 是植物响应低温、干旱和紫外线等逆性胁迫的一种重要酶,同时也是苯丙烷类代谢生物合成途径的关键酶^[33]。由图7可以看出,在整个贮藏期间,香蕉果实的 PAL 活性随贮藏时间的延长而增加,UV-C

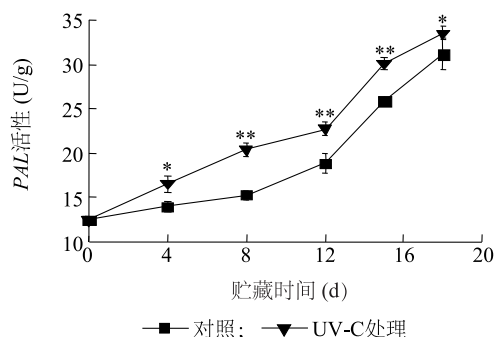


* 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异显著 ($P<0.05$),
** 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

图6 短波紫外线 (UV-C) 处理对贮藏期间香蕉果实总黄酮含量的影响

Fig.6 Effects of UV-C treatment on total flavonoids content of banana fruits during storage

处理的 PAL 活性一直高于对照,在贮藏4 d、18 d,两者之间的差异显著 ($P<0.05$),在贮藏8~16 d,两者之间的差异极显著 ($P<0.01$),其中贮藏8 d 时的差异最大,UV-C 处理的 PAL 活性是对照的1.34倍,这与Huyskens-Keil等^[34]报道的经UV-C处理后,白芦笋 PAL 活性增强的研究结果一致。



* 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异显著 ($P<0.05$),
** 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异极显著 ($P<0.01$)。PAL: 苯丙氨酸解氨酶。

图7 短波紫外线 (UV-C) 处理对贮藏期间香蕉果实苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性的影响

Fig.7 Effects of UV-C treatment on phenylalanine ammonia lyase (PAL) activity of banana fruits during storage

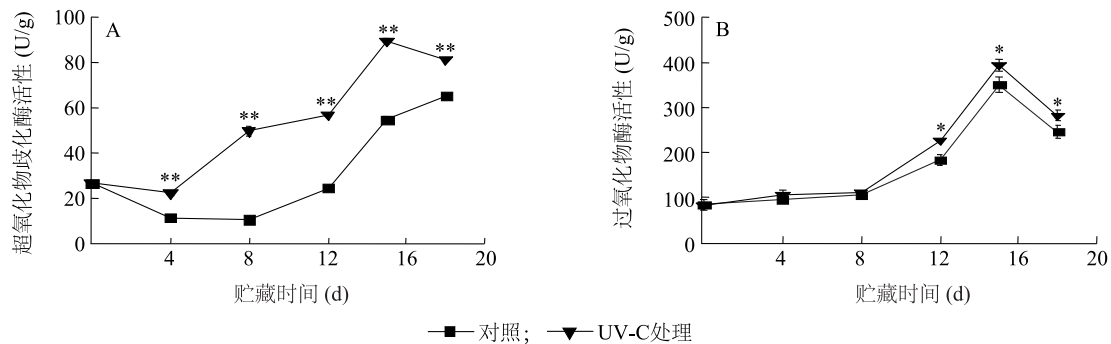
2.6 UV-C 处理对香蕉果实 SOD、POD 活性的影响

POD、SOD 是采后果蔬抗氧化、抗衰老系统中不可缺少的酶,SOD 通过催化超氧阴离子自由基歧化反应生成 O_2 和 H_2O_2 ,POD 进一步将 H_2O_2 分解为 H_2O 等无害物质^[35]。由图8A可以看出,香蕉果实的 SOD 活性在贮藏前期均出现短暂的下降,随后出现较大幅

度的升高。在贮藏期间,UV-C 处理的 *SOD* 活性始终高于对照,并且差异极显著 ($P<0.01$),贮藏 8 d 时的差异最大,UV-C 处理的 *SOD* 活性是对照的 4.75 倍,在贮藏 18 d 时,UV-C 处理的 *SOD* 活性比对照高 25%。结果表明,UV-C 处理能够有效诱导香蕉果实中 *SOD* 活性的增强,有利于香蕉果实清除贮藏期间因成熟、衰老而产生的氧自由基,保护细胞膜的完整性,提高采后香蕉的贮藏品质。

POD 能够清除细胞中多余的 H_2O_2 ,是植物抗氧化系统中的关键酶,能够维持植物体内活性氧代谢的动态平衡^[36]。由图 8B 可以看出,香蕉果实的 *POD* 活性

在贮藏前 8 d 的变化不大,UV-C 处理的 *POD* 活性高于对照组,但两者间没有显著差异,UV-C 处理的 *POD* 活性在贮藏 4 d 时与贮藏起始阶段间的差异显著 ($P<0.05$),与贮藏 8 d 时的差异不显著,对照的 *POD* 活性在贮藏起始阶段与贮藏 4 d、8 d 时的差异不显著;在贮藏 8~15 d,对照、UV-C 处理的 *POD* 活性大幅度增强,同期 UV-C 处理的香蕉果实 *POD* 活性显著高于对照 ($P<0.05$);在贮藏 18 d 时,对照、UV-C 处理的 *POD* 活性有所下降,但 UV-C 处理仍高于对照且二者间差异显著 ($P<0.05$)。结果表明,用 UV-C 处理采后香蕉果实,能够诱导其在贮藏期 *POD* 活性的增强。



A: 超氧化物歧化酶活性; B: 过氧化物酶活性。* 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异显著 ($P<0.05$), ** 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

图 8 短波紫外线 (UV-C) 处理对贮藏期间香蕉果实超氧化物歧化酶 (*SOD*) 和过氧化物酶 (*POD*) 活性的影响

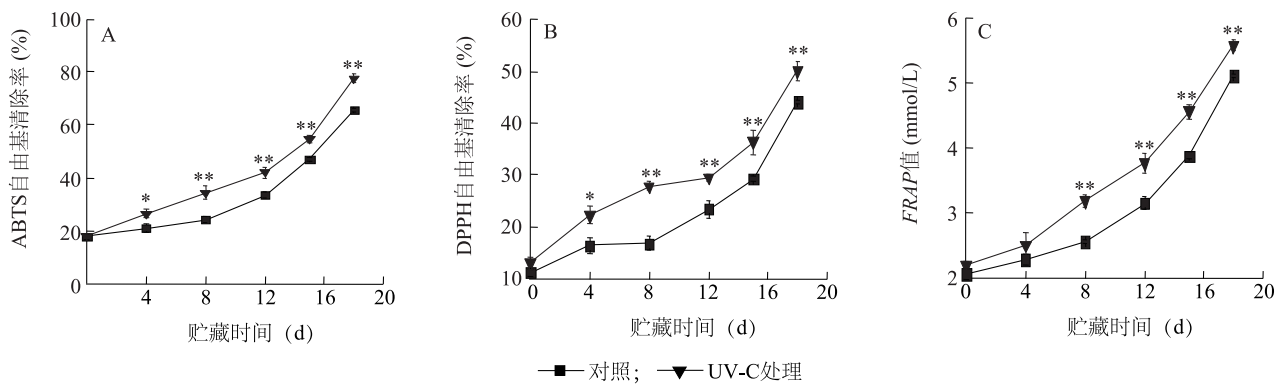
Fig.8 Effects of UV-C treatment on superoxide dismutase (*SOD*) activity and peroxidase (*POD*) activity of banana fruits during storage

2.7 UV-C 处理对香蕉果实中 ABTS、DPPH 自由基清除率和 FRAP 值的影响

本试验采用 ABTS、DPPH 自由基清除率和 FRAP 值 3 个指标来评价 UV-C 处理前后香蕉果实的抗氧化能力。由图 9A 可以看出,对照、UV-C 处理香蕉的 ABTS 自由基清除率在贮藏期间不断升高,UV-C 处理的 ABTS 自由基清除率始终高于对照,且二者在贮藏 4 d 时的差异显著 ($P<0.05$),在贮藏 8 d、12 d、15 d、18 d 时差异极显著 ($P<0.01$)。由图 9B 可以看出,香蕉的 DPPH 自由基清除率在贮藏期间不断升高,UV-C 处理的 DPPH 自由基清除率始终高于对照,二者在贮藏 4 d 时差异显著 ($P<0.05$),在贮藏 8 d、12 d、15 d、18 d 时差异极显著 ($P<0.01$)。由图 9C 可以看出,对照、UV-C 处理香蕉的 FRAP 值在贮藏期间不断上升,并且 UV-C 处理的 FRAP 值始终高于对照,二者间的差异在贮藏 4 d 内不显著,在贮藏 8 d、12 d、15 d、18 d 时差异极显著 ($P<0.01$)。由此可见,与对照相比,经 UV-C 处理的采后香蕉在贮藏期的抗氧化能力显著提高。

2.8 香蕉果实不同指标间的相关性

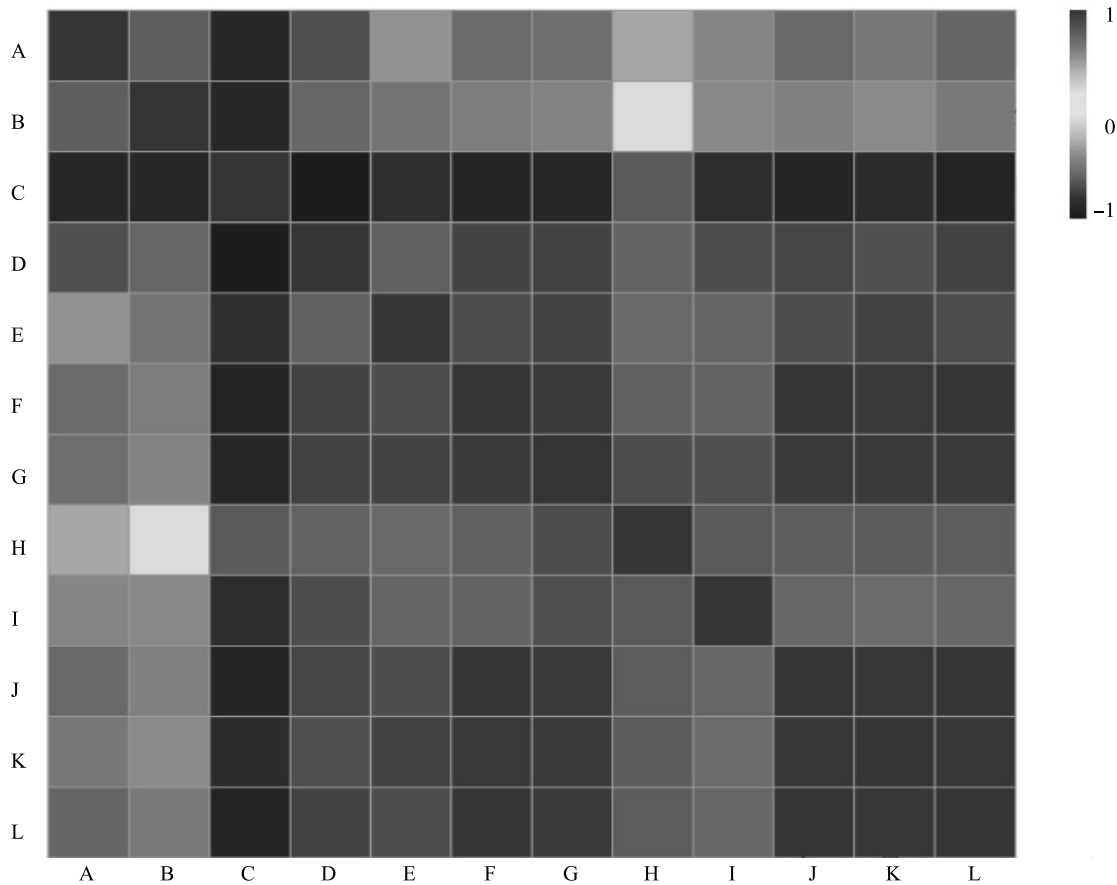
为了明确不同指标之间的相关性,对测得的香蕉果实的 12 个指标进行相关性分析。由图 10 可以看出,香蕉果实的腐烂率与失质量率、总叶绿素含量、纤维素酶活性、总黄酮含量、苯丙氨酸解氨酶 (*PAL*) 活性、ABTS 自由基清除率和 FRAP 值呈极显著相关; *MLR* 与 *DR*、TChl. 含量和 *CL* 活性呈极显著相关; TChl. 含量与其他指标呈极显著负相关 (除了与 *SOD* 活性呈显著负相关); *CL* 活性与 TF 含量、*PAL* 活性、ABTS 自由基清除率和 FRAP 值呈极显著强正相关^[37] (当 $r=0.90\sim1.00$ 时表示呈强正相关); TP 含量与 *PAL* 活性和 DPPH 自由基清除率呈极显著强正相关; TF 含量与 FRAP 值、ABTS 和 DPPH 自由基清除率、*PAL* 活性呈极显著强正相关; *PAL* 活性与 FRAP 值、DPPH 和 ABTS 自由基清除率、TF 含量、*CL* 活性、TP 含量呈极显著强正相关; *SOD* 活性与 *PAL* 活性、*POD* 活性、DPPH 和 ABTS 自由基清除率、FRAP 值呈极显著较强正相关 (当 $r=0.80\sim0.89$ 时表示呈较强正相关); *POD* 活性与 *CL*、*PAL*、*SOD* 活性呈极显著较强正相关。



A: ABTS 自由基清除率; B: DPPH 自由基清除率; C: FRAP 值。ABTS: 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸; DPPH: 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼。* 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示对照与短波紫外线 (UV-C) 处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

图 9 短波紫外线 (UV-C) 处理对贮藏期间香蕉果实 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (ABTS) 自由基清除率、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 自由基清除率和 FRAP 值的影响

Fig.9 Effects of UV-C treatment on 2,2'-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) radical scavenging rate, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging rate and fenic reducing antioxidant power (FRAP) value of banana fruits during storage



A: 腐烂率; B: 失质量率; C: 总叶绿素含量; D: 纤维素酶活性; E: 总酚含量; F: 总黄酮含量; G: 苯丙氨酸解氨酶活性; H: 超氧化物歧化酶活性; I: 过氧化物酶活性; J: 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸自由基清除率; K: 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除率; L: 铁离子抗氧化能力。

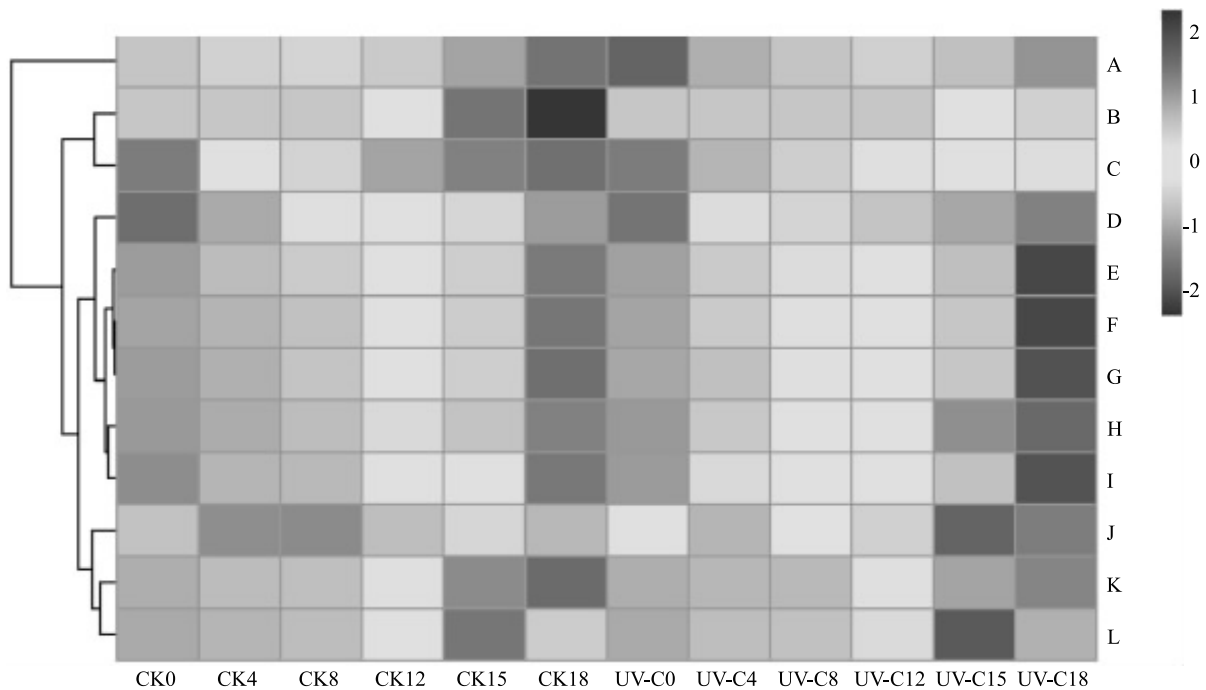
图 10 香蕉果实 12 个指标的相关性热图

Fig.10 Correlation heatmap of 12 indices of banana fruit

用不同采样时间对照、UV-C 处理香蕉果实对应的 12 个指标作聚类热图,探究样品与指标之间的总

体关联度。由图 11 可以看出,样品的 12 个指标可以归为 4 大类,第 1 类指标包含 TChl. 含量 1 个指标,能够反映香蕉果实的成熟度,该指标随着对照、UV-C 处理香蕉果实贮藏时间的增加而下降,并且 UV-C 处理的 TChl. 含量比对照高,表明用 UV-C 处理后,香蕉的总叶绿素含量相对较高,延缓了香蕉果实成熟;第 2 类指标包含 *DR*、*MLR*,能够反映香蕉果实的腐烂情况,对照 *DR*、*MLR* 均高于 UV-C 处理,表明 UV-C 处理后,香蕉的腐败程度受到抑制,从而维持了香蕉的品质;第 3 类指标包含 TP 含量、TF 含量、ABTS 自由基清除率、*FRAP* 值、*PAL* 活性、DPPH 自由基清除率,是植物类样品中评价抗氧化能力的相关指标,可以反映香蕉果实的抗氧化能力,UV-C 处理的这 6 个指标均

高于对照,表明用 UV-C 处理采后香蕉果实,激活了香蕉果实的 *PAL* 活性,会诱导香蕉果实产生 TP、TF 等抗逆物质^[29],从而增强了香蕉的抗氧化能力;第 4 类指标包含 *SOD*、*CL*、*POD* 活性,能够反映香蕉果实的抗衰老能力,对比图 11 中的数值可以看出,UV-C 处理第 4 类指标中的 *SOD*、*POD* 活性相对较高,有利于 UV-C 处理香蕉果实清除在成熟、衰老过程中产生的过多自由基,避免其破坏细胞膜,从而维持细胞的完整性,而 *CL* 活性相对较低,也有利于 UV-C 处理香蕉果实维持细胞壁的固有状态。由此可见,经 UV-C 处理后,香蕉果实的抗衰老能力增强,品质也得到较好的维持。



A: 总叶绿素含量; B: 腐烂率; C: 失质量率; D: 总酚含量; E: 总黄酮含量; F: 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸自由基清除率; G: 铁离子抗氧化能力; H: 苯丙氨酸解氨酶活性; I: 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除率; J: 超氧化物歧化酶活性; K: 纤维素酶活性; L: 过氧化物酶活性。CK0: 贮藏起始阶段对照样品; CK4: 贮藏 4 d 对照样品; CK8: 贮藏 8 d 对照样品; CK12: 贮藏 12 d 对照样品; CK15: 贮藏 15 d 对照样品; CK18: 贮藏 18 d 对照样品; UV-C0: 贮藏起始阶段处理样品; UV-C4: 贮藏 4 d 处理样品; UV-C8: 贮藏 8 d 处理样品; UV-C12: 贮藏 12 d 处理样品; UV-C15: 贮藏 15 d 处理样品; UV-C18: 贮藏 18 d 处理样品。

图 11 基于短波紫外线 (UV-C) 处理前后香蕉样品的 12 个指标聚类热图

Fig.11 Clustered heatmap of 12 indices based on banana samples before and after UV-C treatment

此外,对 UV-C 处理采后香蕉果实的相关指标进行相关性分析可知,香蕉果实腐烂率与失质量率、TChl. 含量、*CL* 活性、TF 含量、*PAL* 活性呈极显著相关;*PAL* 活性与 *FRAP* 值、DPPH 和 ABTS 自由基清除率及 TF 含量、*CL* 活性、TP 含量这 6 个指标呈极

显著正相关,与 *SOD*、*POD* 活性这 2 个指标呈极显著正相关,与 TChl. 含量呈较强负相关。由聚类热图分析结果可知,UV-C 处理延缓了 TChl. 的分解,激活了 *PAL* 活性,可见 *PAL* 在香蕉的整个成熟、衰老和 UV-C 照射后的贮藏过程中起到了很关键的作用,

促进了 TP、TF 含量的增加,这与 González-Aguilar 等^[38]研究采后紫外线处理可诱导芒果 *PAL* 活性升高、总酚含量增加的结果一致,对降低香蕉果实腐烂率、增强其抗氧化能力和自由基清除率等都有效果。

3 结论

本研究结果表明,0.02 kJ/m² UV-C 为处理采后香蕉的最佳剂量,采用该剂量照射采后香蕉,分析贮藏期香蕉果实品质的变化,对处理、对照香蕉果实的 12 个生理生化指标进行评价,结合相关性分析和聚类热图整体分析得出,采用合适剂量的 UV-C 处理采后香蕉果实,可以延缓香蕉果实中叶绿素的分解,抑制 *CL* 活性,较好地维持香蕉果实的硬度,激活 *PAL* 活性,诱导 TP、TF 含量提升和抗病相关酶 (*SOD*、*POD*) 活性升高,显著降低香蕉的超氧阴离子自由基和 H₂O₂ 的积累,提高 ABTS、DPPH 自由基清除率与 *FRAP* 值,增强香蕉果实的抗氧化能力,从而延缓香蕉的成熟,对降低香蕉果实的腐烂率、失质量率均有良好效果,较好地维持了香蕉的贮藏品质。由此可见,合适剂量的 UV-C 处理可以降低贮藏期香蕉的腐烂率,延缓香蕉品质的下降,使香蕉在贮藏期间维持较高的品质和抗氧化能力,达到保鲜效果,从而延长香蕉的货架期,为香蕉采后贮藏保鲜和品质评价提供理论参考和借鉴。

参考文献:

- [1] DALE J, PAUL J Y, DUGDALE B, et al. Modifying bananas: from transgenics to organics? [J]. Sustainability, 2017, 9(3): 333.
- [2] 洪佳敏,何炎森,郑云云,等. 香蕉成分及其保健功能研究进展 [J]. 中国农学通报, 2016,32(10):176-181.
- [3] SINGH B, SINGH J P, KAUR A, et al. Bioactive compounds in banana and their associated health benefits-a review [J]. Food Chemistry, 2016,206:1-11.
- [4] PEREIRA A, MARASCHIN M. Banana (*Musa* spp) from peel to pulp: ethnopharmacology, source of bioactive compounds and its relevance for human health [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2015,160:149-163.
- [5] HUANG H, JIAN Q J, JIANG Y M, et al. Enhanced chilling tolerance of banana fruit treated with malic acid prior to low-temperature storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016,111: 209-213.
- [6] WANG Y S, LUO Z S, MAO L C, et al. Contribution of polyamines metabolism and GABA shunt to chilling tolerance induced by nitric oxide in cold-stored banana fruit [J]. Food Chemistry, 2016,197:333-339.
- [7] HAO J S, LI X, XU G Z, et al. Exogenous progesterone treatment alleviates chilling injury in postharvest banana fruit associated with induction of alternative oxidase and antioxidant defense [J]. Food Chemistry, 2019,286: 329-337.
- [8] ZHU X Y, LIN S, FU D, et al. Effects of the combination treatment of 1-MCP and ethylene on the ripening of harvested banana fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015,107:23-32.
- [9] SUSENO N, SAVITRI E, SAPEI L, et al. Improving shelf-life of Cavendish banana using chitosan edible coating [J]. Procedia Chemistry, 2014,9:113-120.
- [10] XU Y Q, CHARLES M T, LUO Z S, et al. Preharvest UV-C treatment affected postharvest senescence and phytochemicals alternation of strawberry fruit with the possible involvement of abscisic acid regulation [J]. Food Chemistry, 2019,299:125138.
- [11] ESUA O J, CHIN N L, YUSOF Y A, et al. Effects of simultaneous UV-C radiation and ultrasonic energy postharvest treatment on bioactive compounds and antioxidant activity of tomatoes during storage [J]. Food Chemistry, 2019,270:113-122.
- [12] JIN P, WANG H Y, ZHANG Y, et al. UV-C enhances resistance against gray mold decay caused by *Botrytis cinerea* in strawberry fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 225:106-111.
- [13] ZHOU D D, SUN Y, LI M Y, et al. Postharvest hot air and UV-C treatments enhance aroma-related volatiles by simulating the lipoxygenase pathway in peaches during cold storage [J]. Food Chemistry, 2019, 292:294-303.
- [14] PINTO E P, PERIN E C, SCHOTT I B, et al. The effect of postharvest application of UV-C radiation on the phenolic compounds of conventional and organic grapes (*Vitis labrusca* cv. 'Concord') [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016,120:84-91.
- [15] ZHANG W L, JIANG W B. UV treatment improved the quality of postharvest fruits and vegetables by inducing resistance [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 92(3):71-80.
- [16] DING P, LING Y S. Browning assessment methods and polyphenol oxidase in UV-C irradiated Berangan banana fruit [J]. International Food Research Journal, 2014,21(4):1667-1674.
- [17] PONGPRASERT N, SEKOZAWA Y, SUGAYA S, et al. A novel postharvest UV-C treatment to reduce chilling injury (membrane damage, browning and chlorophyll degradation) in banana peel [J]. Scientia Horticulturae, 2011,130(1):73-77.
- [18] 王甲水,贾彩红,张建斌,等. 香蕉果实乙烯释放量 GC 的测定方法及其不同处理下的变化趋势 [J]. 热带作物学报, 2013, 34(6):1188-1191.
- [19] 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.
- [20] SILVA K D R R, SIRASA M S F. Antioxidant properties of selected fruit cultivars grown in Sri Lanka [J]. Food Chemistry, 2018, 238:203-208.
- [21] KHALIQ G, MUDA MOHAMED M T, GHAZALI H M, et al. Influence of gum arabic coating enriched with calcium chloride on

- physiological, biochemical and quality responses of mango (*Mangifera indica* L.) fruit stored under low temperature stress[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016,111:362-369.
- [22] 孙丹,黄士淇,蔡圣宝. 不同加工方式对苦荞中总酚、总黄酮及抗氧化性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016,42(1):141-147.
- [23] THAIPONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006,19(6/7):669-675.
- [24] WU L C, HSU H W, CHEN Y C, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya[J]. *Food Chemistry*, 2006,95(2):319-327.
- [25] 王馨悦,姜爱丽,胡文忠,等. 乳酸钙处理对采后蓝莓品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2019,35(7):47-54.
- [26] 连政,黄圆博,贾佳林,等. 不同采收期对软枣猕猴桃采后品质和细胞壁降解的影响[J]. *中国果树*, 2019(4):69-71.
- [27] SHARAF A, SHARAF O A, HEGAZI S M, et al. Chemical and biological studies on banana fruit[J]. *Zeitschrift für Ernährungswissenschaft*, 1979,18(1):8-15.
- [28] VU H T, SCARLETT C J, VUONG Q V. Phenolic compounds within banana peel and their potential uses: a review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018,40:238-248.
- [29] LIU C H, ZHENG H H, SHENG K L, et al. Effects of postharvest UV-C irradiation on phenolic acids, flavonoids, and key phenylpropanoid pathway genes in tomato fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018,241:107-114.
- [30] LI M L, LI X A, HAN C, et al. UV-C treatment maintains quality and enhances antioxidant capacity of fresh-cut strawberries[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019,156:110945.
- [31] KONDAPALLI N, SADINENI V, VARIYAR P S, et al. Impact of γ -irradiation on antioxidant capacity of mango (*Mangifera indica* L.) wine from eight Indian cultivars and the protection of mango wine against DNA damage caused by irradiation[J]. *Process Biochemistry*, 2014,49(11):1819-1830.
- [32] 焦中高,刘杰超,刘慧,等. 短波紫外线辐照处理对采后甜樱桃果实营养品质和抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2017,17(1):170-178.
- [33] WANG Y, CHEN J Y, JIANG Y M, et al. Cloning and expression analysis of phenylalanine ammonia-lyase in relation to chilling tolerance in harvested banana fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007,44(1):34-41.
- [34] HUYSKENS-KEIL S, EICHHOLZ-DÜNDAR I, HASSENBERG K, et al. Impact of light quality (white, red, blue light and UV-C irradiation) on changes in anthocyanin content and dynamics of *PAL* and *POD* activities in apical and basal spear sections of white asparagus after harvest[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020,161:111069.
- [35] ZHOU H W, YUAN B, CHEN W, et al. Effect of monooxygenase purified from *Mycobacterium* JS60 combined with sodium alginate on the preservation of banana[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020,161:111079.
- [36] LO'AY A A, EL-KHATEEB A Y. Antioxidant enzyme activities and exogenous ascorbic acid treatment of 'Williams' banana during long-term cold storage stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018,234:210-219.
- [37] 罗钦,李冬梅,黄敏敏,等. 不同生长阶段墨瑞鳕脂肪酸组成及主成分分析[J]. *核农学报*, 2020,34(4):788-795.
- [38] GONZÁLEZ-AGUILAR G A, ZAVALA-GATICA R, TIZNADO-HERNÁNDEZ M E. Improving postharvest quality of mango 'Haden' by UV-C treatment[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007,45(1):108-116.

(责任编辑:徐艳)