

短波紫外线法处理对鲜切果蔬抗氧化系统影响的研究进展

邓红军¹, 杨明飞¹, 刘伟¹, 敖红维¹, 杨小娥¹, 沈锐¹, 李光凤¹, 茅林春^{2*}
(1. 贵阳护理职业学院医学技术系, 贵阳 550081; 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 短波紫外线(ultraviolet-C, UV-C)作为一种绿色无污染的非热处理技术, 近年来在鲜切果蔬保鲜中的研究越来越多, 主要研究热点在 UV-C 对鲜切果蔬抗氧化系统的影响。鲜切加工、贮藏、运输、销售等过程会引发一系列的不利于果蔬贮藏的生理生化和品质特性改变, 导致其食用品质和商用价值下降, 带来重大的经济损失。鲜切果蔬抗氧化系统主要由酚类物质、黄酮类物质、维生素类等物质组成非酶抗氧化系统, 超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、抗坏血酸氧化酶等组成酶促抗氧化系统, 共同发挥对鲜切果蔬贮藏品质的调节作用。本文介绍了 UV-C 和鲜切果蔬的特点, 综述了 UV-C 对不同鲜切果蔬中非酶抗氧化系统和酶促抗氧化系统的影响, 并对未来研究前景进行了展望, 旨在为探究果蔬鲜切伤害条件下, UV-C 处理对果蔬抗氧化系统响应机制的影响和鲜切果蔬贮藏品质特性影响的机制, 并为 UV-C 在鲜切果蔬上的进一步推广、应用提供参考。

关键词: 短波紫外线; 鲜切果蔬; 非酶抗氧化系统; 酶促抗氧化系统

Research development on effects of ultraviolet-C treatment on antioxidant system of fresh-cut fruits and vegetables

DENG Hong-Jun¹, YANG Ming-Fei¹, LIU-Wei¹, AO Hong-Wei¹, YANG XIAO-E¹, SHEN-Rui¹, LI Guang-Feng¹, MAO Lin-Chun^{2*}

(1. Department of Medical Technology, Guiyang Nursing Vocational College, Guiyang 550081, China; 2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

ABSTRACT: As a green, pollution-free and non-heat treatment technology, short-wave ultraviolet-C (UV-C) irradiation has been used in fresh-cut fruits and vegetables preservation more and more in recent years. The main research focused on the effect of UV-C on the antioxidant system of fresh-cut fruits and vegetables. Fresh-cut processing, storage, transportation, marketing and other processes can lead to a series of physiological and biochemical, quality characteristics changes that are not conducive to the storage of fruits and vegetables, resulting in the decline of their edible quality and commercial value, bringing significant economic losses. The antioxidant system of fresh-cut fruits and vegetables is mainly composed of phenolic substances, flavonoids, vitamins, which

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972468)、遵义市科技计划项目(遵市科合成转 NS〔2021〕4号)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31972468), and the Science and Technology Planning Project of Zunyi (〔2021〕4)

*通信作者: 茅林春, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬贮藏保鲜生物技术。E-mail: linchun@zju.edu.cn

*Corresponding author: MAO Lin-Chun, Ph.D, Professor, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, No.866, Yuhangtang Road, Xihu District, Hangzhou 310058, China. E-mail: linchun@zju.edu.cn

composed a non-enzymatic antioxidant system, superoxide dismutase, catalase, peroxidase, ascorbate peroxidase which composed a enzymatic antioxidant system, which jointly play a regulatory role in the storage quality of fresh-cut fruits and vegetables. This paper introduced the characteristics of UV-C and fresh-cut fruits and vegetables, summarized the effects of UV-C on the non-enzymatic antioxidant system and enzymatic antioxidant system of different fresh-cut fruits and vegetables, and prospected the future research prospects, in order to explore the effect of UV-C treatment on the response mechanism of antioxidant system of fruits and vegetables under the condition of fresh-cut injury and the mechanism of the effect of UV-C treatment on the storage quality characteristics of fresh-cut fruits and vegetables, and to provide reference for the further promotion and application of UV-C in fresh-cut fruits and vegetables.

KEY WORDS: ultraviolet-C; fresh-cut fruits and vegetables; non-enzymatic antioxidant system; enzymatic antioxidant system

0 引言

鲜切果蔬具有食用便捷、营养、干净等优势,近年来深受各层次消费者喜爱。但鲜切操作、贮运、销售过程中均会发生一系列的生理生化和品质的变化,导致果蔬衰老进程加快、腐烂加剧等品质劣变现象^[1],其中鲜切果蔬的抗氧化系统在采后贮藏品质保持中发挥着重要作用。近年来,随着人们对食品消费安全的重视程度逐渐增加,短波紫外线(ultraviolet-C, UV-C) (波长为 200~280 nm)作为一种绿色无害的非热处理技术,因其操作便捷、安全无毒、无化学残留、无污染等诸多优点而受到工程研究人员的普遍关注^[2],随着研究的深入和扩展,人们已经从早期的对食品的杀菌消毒(致病微生物 DNA 的破坏)等安全性能评价转移到对食品品质控制、调节,贮藏保鲜等方面的研究^[3-4]。

果蔬中的酚类物质、黄酮类物质、维生素 C (vitamin C, VC)等均属于果蔬中的生物活性成分,在一定条件下,可对生物体内的活性氧自由基发挥调节作用,影响果蔬的抗氧化能力^[5-7]。在多种果蔬上的研究表明采后果蔬的抗氧化能力与酚类、黄酮类、VC 等的含量密切相关^[8-9],与抗氧化酶共同组成果蔬的抗氧化系统。因果蔬鲜切处理破坏了细胞结构的完整性,使酚类物质从果蔬细胞液泡内及细胞壁基质中释放,对果蔬酚类物质发挥抗氧化作用会产生影响^[10-11]。

采后鲜切果蔬的抗氧化系统主要分为酶促抗氧化系统和非酶抗氧化系统。UV-C 处理对采后鲜切果蔬中诸多生理生化和品质指标均产生不同程度的调节作用,因抗氧化系统对采后品质调控的重要地位,UV-C 对抗氧化系统的调控作用尤为值得关注。基于此,本文综述了近年来 UV-C 对鲜切果蔬酶促抗氧化系统和非酶抗氧化系统的调节作用及其机制的研究进展,旨在为探究 UV-C 处理对鲜切果蔬抗氧化系统的影响机制提供进一

步的参考。

1 UV-C 对酚类物质及黄酮类物质的影响

果蔬的抗氧化活性与酚类、类黄酮、类胡萝卜素等物质相关^[12]。采后果蔬仍然在进行正常的代谢活动,当遭受鲜切伤害后,通常会诱导产生次生代谢物质来提高防御性能,减轻伤害^[13],而 UV-C 处理可以对这种应激反应起到调节作用,进一步诱导果蔬组织内酚类和黄酮类等次生代谢物质的合成,从而增强自身抗氧化性能^[14],增加对伤害的防御能力,但 UV-C 处理对鲜切果蔬酚类物质代谢的调控效果受多种因素的影响。UV-C 处理对采后鲜切果蔬酚类和黄酮类物质含量的影响可能与切割部位、照射部位、贮藏条件、照射剂量和果蔬种类有关。

UV-C 处理对采后果蔬酚类和黄酮类物质含量的影响可能与鲜切和照射部位有关。RODONI 等^[15]通过用不同剂量的 UV-C 照射鲜切辣椒内部、外部、所有表面(内面和外面)发现,10 kJ/m²处理鲜切辣椒表面可以显著诱导酚类物质的积累,显著降低腐烂率,有利于保持采后品质。WU 等^[16]用 1.0 kJ/m² UV-C 处理不同蘑菇组织发现,UV-C 辐照增强了蘑菇内盖、菌柄、菌褶和整个蘑菇的酚类物质的含量,但却使蘑菇剥离表皮总酚含量减少。也可能与贮藏环境相关,MAGHOUMI 等^[17]对鲜切番石榴的研究发现,包装贮藏前用 4.54 kJ/m² UV-C 处理后置于 5 °C 黑暗环境中,可以使其保持更高的酚类物质含量。

不同剂量的 UV-C 处理对采后同一果蔬酚类和黄酮类物质含量的影响也不尽相同。赵磊等^[18]用不同剂量的 UV-C 处理鲜切黄瓜片,发现 UV-C 处理的鲜切黄瓜片在前 4 d 的总酚含量显著高于对照组,而后期总酚含量却显著低于对照组。解新方等^[19]用不同剂量的 UV-C 处理鲜切莲藕研究发现:5.0 kJ/m²的 UV-C 处理可以显著抑制儿茶酚的产生量,从而达到延缓鲜切莲藕褐变的效果。李静^[20]对鲜切茼蒿的研究发现,不同剂量的 UV-C 处理对鲜切茼蒿酚

类物质积累的影响不同, 1.0 kJ/m² 的 UV-C 处理可以有效提高鲜切莴苣中的酚类物质的积累, 进而增加其抗氧化性。陈晨^[21]对鲜切胡萝卜的研究发现: 0.86 kJ/m² 的 UV-C 处理对鲜切胡萝卜品质的保持作用效果最佳, 有效促进了总酚、总胡萝卜素含量的上升, 对酚类代谢产物绿原酸、咖啡酸等胡萝卜的次生代谢产物也有促进作用。HAN 等^[22]研究发现, 用 8 kJ/m² 的 UV-C 处理鲜切莴苣减少了酚类物质的积累, RTÉS-HERNÁNDEZ 等^[23]用 UV-C 预处理不同鲜切强度的西瓜发现, UV-C 照射处理后初始总酚含量降低, 而高强度切割处理组总酚含量降低的较少。AVALOS-LLANO 等^[24]用 5.8 kJ/m² 的 UV-C 单独及添加橙汁联合处理鲜切草莓发现, UV-C 单独处理组总酚和黄酮类物质的含量在贮藏期间都明显增加, 总酚增加 14%, 黄酮类物质增加 23%。

UV-C 处理对采后果蔬黄酮类物质和总酚含量的影响与果蔬品种相关, 品种不同, 影响不同。高梵等^[25]用 1.0 kJ/m² 的 UV-C 处理鲜切红心萝卜发现, UV-C 处理促进了鲜切红心萝卜中黄酮类物质的增加, 诱导酚类物质的合成, 显著提升总抗氧化能力。LI 等^[26]用 4.0 kJ/m² 的 UV-C 处理鲜切草莓后于 4 °C 贮藏 7 d 发现, UV-C 处理可以显著提高草莓果实贮藏期间总酚、总花青素的含量, 进一步对具体的酚类物质和花青素物质研究发现: 鞣花酸、鞣花酸葡萄糖苷、槲皮素等 6 种酚类物质的含量显著增加, 诱导天竺葵素、矢车菊素 2 种花青素的量也显著增加。刘容等^[27]用 3.0 kJ/m² 的 UV-C 照射鲜切淮山发现, UV-C 处理可以促进酚类物质和黄酮类物质的积累, 保持较高的酚类和黄酮类物质的含量, 抑制过氧化损伤, 这可能与 UV-C 处理增强了 PAL 酶的活性, 促进了酚类物质和黄酮类物质的积累有关。

也有研究报道显示: UV-C 处理对鲜切果蔬酚类物质的产生量无影响。PARK 等^[28]用 1.2 kJ/m² UV-C 处理鲜切红甜菜 2 min 发现, 贮藏期间酚类物质含量无明显变化。CYRELYS 等^[29]用水辅助 UV-C 处理技术(a water-assisted UV-C technology)处理普通(非有机)鲜切西兰花发现, 贮藏期间总酚含量没有显著差异, 且维持在(77±12) mg/kg 的水平, 但总抗氧化能力(total antioxidant capacity, TAC)明显增强, 在 24 h 后比对照增加 42%。GINÉS 等^[30]用 6.0 kJ/m² UV-C 处理鲜切西兰花(kailan-hybrid broccoli)也发现贮藏期间未发现总酚含量有明显区别。WANG 等^[31]用不同剂量的 UV-C 处理鲜切莲藕发现, 所有处理组与对照组总酚含量之间均无显著差异。

综上所述, UV-C 对酚类物质和黄酮类物质的影响与果蔬品种、照射后贮藏条件、处理剂量、鲜切部位(形式)等相关, 当以上条件发生变化的时候, 处理效果会随之发生变化。值得关注的是研究发现 UV-C 处理对一些鲜切果蔬的酚类物质和黄酮类物质代谢无显著性影响, 而研

究人员并未做进一步研究, 阐明其中原因, 后期建议加强对这方面机制的研究。

2 UV-C 对鲜切果蔬维生素 C 的影响

VC 含量是衡量果蔬食用品质和商品价值的重要指标之一。VC 还原性强, 是鲜切果蔬中重要的抗氧化物质, 具有清除活性氧的能力, 减轻活性氧对鲜切果蔬的伤害。但当鲜切果蔬暴露在环境中, VC 易被氧化而发生损耗, 当果蔬中 VC 含量消耗增多, 低于一定程度时, 果蔬中自由基会大量积累, 加速果蔬细胞衰老, 腐烂加快, 缩短果蔬货架期^[32]。因此, 研究人员采用 UV-C 处理调节果蔬采后 VC 含量, 以期延长货架期提供理论支持。

UV-C 处理对果蔬维生素 C 含量的影响因果蔬品种不同而呈现不同的效果, 所需的有效作用剂量也不同。HAN 等^[22]研究发现, 8 kJ/m² 的 UV-C 处理减少了鲜切莴苣贮藏过程中维生素 C 的损失。黄镜如^[32]研究发现: 适宜剂量的 UV-C 处理可以有效延缓沙窝胡萝卜中 VC 含量的损耗速度, 从而保持鲜切沙窝萝卜的自由基清除能力, 减轻自由基对细胞组织的伤害。周琪等^[33]用 4.5 kJ/m² 的 UV-C 处理鲜切苹果发现, UV-C 处理组 VC 含量均显著高于对照组, 同时有效减少贮藏过程中 VC 的氧化损失, 更好地维持其抗氧化能力, 保护细胞组织免受氧化伤害, 延缓果实衰老。耿亚娟等^[34]对鲜切苹果的研究也发现相同结果。高梵等^[25]对鲜切胡萝卜的研究发现, 1.0 kJ/m² 的 UV-C 处理鲜切胡萝卜可以延缓贮藏期间 VC 含量的下降速度, 延长鲜切胡萝卜的贮藏期。陈晨^[21]的研究也发现: 4.2 kJ/m² 和 0.86 kJ/m² 的 UV-C 处理, 最有利于鲜切胡萝卜丝 VC 含量的保持。杨雪梅等^[35]研究发现: UV-C 处理有利于鲜切石榴籽粒 VC 含量维持在较稳定的水平。

UV-C 与其他方法复合处理对采后果蔬维生素 C 含量的影响研究报道较少。AVALOS-LLANO 等^[24]研究发现, 用 5.8 kJ/m² 的 UV-C 单独及添加橙汁联合处理鲜切草莓后, UV-C 处理组中维生素 C 的含量明显高于其他处理组, 在贮藏 12 d 后维生素 C 含量比其他处理组高 10%。王娟等^[36]用复合涂膜结合 UV-C 处理鲜切木瓜, 前期 UV-C 处理组 VC 的含量显著大于对照组, 随着贮藏时间的延长, VC 含量逐渐减少, 但总体仍然显著高于对照组。

综合现有研究报道发现, UV-C 处理对鲜切果蔬中 VC 的影响与 UV-C 处理剂量和果蔬品种相关, 而对同一品种的研究也发现, 不同剂量的 UV-C 处理对鲜切果蔬中 VC 含量的影响也有较大的差异。UV-C 结合其他方法复合处理对鲜切果蔬 VC 含量的影响与单独用 UV-C 处理表现出不同的变化规律, 但目前研究报道的较少。由于 UV-C 单因素处理对采后鲜切果蔬 VC 变化规律的研究已经较为清

楚, 研究人员应加大对 UV-C 结合其他方法复合处理对鲜切果蔬 VC 的影响研究, 以探究比 UV-C 单因素处理效果更好的复合处理方法。

3 UV-C 对鲜切果蔬酶促抗氧化系统的影响

果蔬被鲜切损伤后, 会诱导自身防御酶的活性增强, 产生大量活性氧, 打破自由基的代谢平衡, 对果蔬细胞组织产生毒害作用。果蔬自身酶促抗氧化系统会做出相应的应激响应来减轻伤害, 提高多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、抗坏血酸过氧化酶(ascorbate peroxidase, APX)等抗氧化酶的活性来减轻伤害^[37-39], PPO、POD 是与鲜切果蔬组织褐变相关的关键酶, POD 的活性与果蔬损伤、外界刺激、酚类底物直接相关联, SOD 可将超氧阴离子自由基(O²⁻)转化成 H₂O₂, CAT 可以催化 H₂O₂ 反应生成 H₂O^[31,39-41], 从而减轻自由基对果蔬组织的伤害。

UV-C 处理对采后果蔬中抗氧化酶的影响因果蔬品种不同而不同, 同一种酶在不同的果蔬上呈现的效果可能相同也可能相反, 且影响效果会随着贮藏时间而发生变化。LI 等^[26]对鲜切草莓的研究发现, 贮藏期间 SOD 活性呈明显增加趋势, UV-C 处理组至贮藏结束时, SOD 活性增加了 80.3%, 对照组仅为 39.5%, 而 CAT 的活性在贮藏前 3 d 增加缓慢, 随后呈缓慢下降, 但 UV-C 处理显著增强了 1~5 d 的 CAT 活性, APX 活性在贮藏期间缓慢增加, 其中 3~7 d 显著高于对照组。GINÉS 等^[30]用 UV-C 处理鲜切西兰花发现, APX 活性升高, 而 SOD 的活性则相反。WANG 等^[31]研究发现, UV-C 处理鲜切莲藕 5 min 和 10 min 显著降低莲藕的褐变程度, 同时有效抑制了 PPO 和 POD 的活性。解新方等^[19]对鲜切莲藕的研究发现: UV-C 处理可以短期内抑制 PPO 的活性, 从而延缓鲜切莲藕的酶促褐变速度。在贮藏前期, 低剂量的 UV-C 处理可通过提高 SOD 的活性来抑制莲藕的褐变, 而随着贮藏时间的延长, UV-C 对 SOD 的促进作用不明显。周琪等^[33]对鲜切苹果贮藏过程中 SOD、CAT、APX 等的研究发现, UV-C 处理能够提高抗氧化酶的活力, 从而有助于及时清除因切割损伤和组织氧化产生的过量活性氧自由基(oxygen free radical, ROS), 对减轻鲜切苹果的切割损伤、氧化损伤、延缓组织褐变具有积极作用。MAGHOUMI 等^[17]对鲜切石榴籽的研究也发现类似结论。周成敏等^[37]将鲜切黄甜竹笋用 2.6 kJ/m² 的 UV-C 照射后, 于 6 °C、相对湿度为 85%~90% 的环境下贮藏 10 d 发现, UV-C 处理显著抑制了 POD、PPO 活性和竹笋切面的褐变, 同时提高了 SOD 和 CAT 的活性, 延缓竹笋木质化进程, 保持良好的食用品质。闰帅等^[38]对鲜切鸡毛菜的研究发现, UV-C 处理能有效维持鸡毛菜的 POD 活性, 使 POD

活性维持在较高的水平, 其中 UV-C 照射处理 6 min 和 9 min 对延长鸡毛菜的货架期效果最好。王梦茹等^[42]对鲜切马铃薯的研究发现, UV-C 处理在贮藏期间可以明显抑制 PPO 和 POD 的活性, 在贮藏后期对 PPO 活性的抑制作用效果更为明显, 从而延缓马铃薯的酶促褐变, 对马铃薯起到护色作用。

也有研究发现 UV-C 对同一果蔬的非酶抗氧化系统有调节作用, 而对酶促抗氧化系统则无显著调节作用。HAN 等^[22]研究发现, 8 kJ/m² 的 UV-C 处理鲜切莴苣后, 对非酶抗氧化系统有明显的调节作用, 而对 PPO 和 POD 的活性则无明显调节作用。

UV-C 处理对鲜切果蔬抗氧化酶活性的影响除了与 UV-C 剂量、果蔬品种相关外, 在不同的贮藏时间影响也不同, UV-C 处理在贮藏前期对抗氧化酶的活性具有积极的影响, 而随着时间的逐渐延长, 这种作用逐渐减弱, 在贮藏后期甚至产生抑制作用, 对鲜切果蔬贮藏品质在不同时间和不同剂量条件下也有不同的影响。UV-C 处理对 SOD、POD、PPO、APX、CAT 等不同抗氧化酶在鲜切果蔬上的影响机制也不相同。

4 展望

鲜切果蔬抗氧化系统对采后果蔬贮藏品质有着重要的影响。UV-C 通过对鲜切果蔬非酶和酶促抗氧化系统的积极调节作用, 延缓成熟衰老和品质劣变进程, 延长货架期, 提高食用和商品价值^[43-45]。但 UV-C 处理对采后果蔬非酶和酶促抗氧化系统的影响因果蔬品种、成熟度、贮藏条件、辐照剂量、辐照部位、鲜切部位、贮藏时间等因素而不同^[46], 后续应继续加大研究。目前国内外研究人员已经对 UV-C 处理对鲜切果蔬抗氧化系统的影响有一定的研究, 主要集中在报道了 UV-C 照射对抗氧化活性物质影响的初步原因, 但研究还不够系统深入, 如 UV-C 处理对 SOD、CAT、POD、PPO、APX 等抗氧化酶系统产生影响的深层次机制^[47-48], UV-C 对酚类、黄酮类、维生素 C 等非酶抗氧化系统无调节作用的根本原因尚未阐明^[48-49]。未来建议从以下几个方面考虑: (1) UV-C 对鲜切果蔬抗氧化活性物质变化的影响机制, 尤其对酶促抗氧化物质变化的影响机制。(2) UV-C 对鲜切果蔬抗氧化系统的调节作用, 对果蔬其他品质特性带来的影响, 特别是次生代谢物质的影响。(3) UV-C 与臭氧、高压、热处理^[50]等物理方法及 1-MCP^[51-53]、壳聚糖^[24,54-55]、生物保鲜剂^[56-57]等其他方法联合处理对鲜切果蔬抗氧化系统及其品质的影响规律。(4) 除生理生化角度研究外, 应加强从分子水平探讨 UV-C 对鲜切果蔬抗氧化系统及贮藏品质的影响机制及其调控途径的研究。

参考文献

- [1] 陈晨, 姜爱丽, 刘程惠, 等. UV-C 处理对鲜切'皇冠'梨褐变的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(24): 5081-5090.
CHEN C, JIANG AL, LIU CH, *et al.* Effect of UV-C on the browning of fresh-cut huangguanpear [J]. *Sci Agric Sin*, 2020, 53(24): 5081-5090.
- [2] IGNA TA, MANZOCC OL, BARTOLOMEOL II, *et al.* Minimization of water consumption in fresh-cut salad washing by UV-C light [J]. *Food Control*, 2015, 50(2): 491-496.
- [3] MARICEL K, ILZE A, MÜLLER, *et al.* Ultraviolet radiation as a non-thermal treatment for the inactivation of microorganisms in fruit juice [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2008, 9(3): 348-354.
- [4] 方晓彤, 陶永霞, 沈琦, 等. 短波紫外线处理对鲜切果蔬品质及抗氧化活性的影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 344-349.
FANG XT, TAO YX, SHEN Q, *et al.* Research development of shortwave ultraviolet treatment on the quality and antioxidant activity of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(10): 344-349.
- [5] COKLAR H, AKBULUT M. Changes in phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, and antioxidant activities of Mahonia aquifolium berries during fruit development and elucidation of the phenolic biosynthetic pathway [J]. *Hortic Environ Biotechnol*, 2021, DOI: 10.1007/s13580-021-00348-9
- [6] SINGH V, CHAHAL TS, GREWAL SK, *et al.* Effect of fruit development stages on antioxidant properties and bioactive compounds in peel, pulp and juice of grapefruit varieties [J]. *Food Meas*, 2021, 15: 2531-2539.
- [7] GARCÍA-VICO L, SÁNCHEZ R, FERNÁNDEZ G, *et al.* Study of the olive β -glucosidase gene family putatively involved in the synthesis of phenolic compounds of virgin olive oil [J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 3: 11189.
- [8] 罗牡康, 贾棚超, 张瑞芬, 等. 杨桃的酚类成分含量及其生物可及性与抗氧化活性[J]. 中国农业科学, 2020, 53(7): 1459-1472.
LUO MK, JIA XC, ZHANG RF, *et al.* Phenolic content, bioavailability and antioxidant activity of carambola [J]. *Sci Agric Sin*, 2020, 53(7): 1459-1472.
- [9] 王丹, 王智能, 董丽红, 等. 灭菌和贮藏温度对荔枝汁中多酚化合物组成、含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 275-280.
WANG D, WANG ZN, DONG LH, *et al.* Effect of sterilization and storage temperature on the composition, content and antioxidant activity of polyphenol compounds in lychee juice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(11): 275-280.
- [10] 易建勇, 赵圆圆, 毕金峰, 等. 细胞壁多糖与酚类物质相互作用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 269-275.
YI JY, ZHAO YY, BI JF, *et al.* A review of interactions between cell wall polysaccharides and polyphenols in fruits and vegetables [J]. *Food Sci*, 2020, 41(9): 269-275.
- [11] 徐灼辉, 曾庆祝, 苏东晓, 等. 不同品种荔枝果皮酚类物质组成及其抗氧化活性比较[J]. 热带作物学报, 2020, 41(3): 564-571.
XUE ZH, ZENG QZ, SHU DX, *et al.* Comparison of phenolic composition and antioxidant activity in pericarp of different lychee varieties [J]. *Chin J Trop Crops*, 2020, 41(3): 564-571.
- [12] 沈妍. 宽皮柑橘采收酚类物质与抗氧化活性变化规律的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
SHEN Y. Changes in phenolic compounds and antioxidant capacity of mandarin fruit during storage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [13] 马杰, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬活性氧产生和抗氧化体系代谢的研究进展[J]. 食品科学, 2013, (7): 316-320.
MA J, HU WZ, BI Y, *et al.* Advances in active oxygen generation and antioxidant system of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Food Sci*, 2013, (7): 316-320.
- [14] 马杰, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬苯丙烷代谢的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15): 391-393.
MA J, HU WZ, BI Y, *et al.* Advances on benzene propane metabolism of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(15): 391-393.
- [15] RODONI LM, ZARO MJ, HASPERUE JH, *et al.* UV-C treatments extend the shelf life of fresh-cut peppers by delaying pectin solubilization and inducing local accumulation of phenolics [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2015, 63(1): 408-414.
- [16] WU XL, WENQIANG G, RUIXIANG Y, *et al.* Effects of UV-C on antioxidant activity, total phenolics and main phenolic compounds of the melanin biosynthesis pathway in different tissues of button mushroom [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2016, 118: 51-58.
- [17] MAGHOUMI M, GÓMEZ PA, MOSTOFI Y, *et al.* Combined effect of heat treatment, UV-C and superatmospheric oxygen packing on phenolics and browning related enzymes of fresh-cut pomegranate arils [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2013, 54(2): 389-396.
- [18] 赵磊, 王丹, 马越, 等. 短波紫外线照射对鲜切黄瓜片品质的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 205-209.
ZHAO L, WANG D, MA Y, *et al.* Effect of ultraviolet-c irradiation on the quality of fresh-cut cucumber slices [J]. *Food Ind*, 2019, 40(5): 205-209.
- [19] 解新方, 王晓萍, 王志东, 等. 短波紫外线处理对鲜切莲藕酶促褐变的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 274-278.
XIE DF, WANG XP, WANG ZD, *et al.* Effects of ultraviolet-C (UV-C) radiation on enzymatic browning of fresh-cut lotus root [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(17): 274-278.
- [20] 李静. 切割方式和 UV-C 处理对鲜切茼蒿品质及抗氧化活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
LI J. Effect of cutting styles and UV-C treatment on quality and antioxidant activity of fresh-cut lettuce [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [21] 陈晨. UV-C 处理对鲜切胡萝卜品质和抗氧化活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
CHEN C. Effects of UV-C treatment on quality on maintenance and antioxidant capacity in fresh-cut carrot [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [22] HAN C, ZHEN WN, CHEN QM, *et al.* UV-C irradiation inhibits surface discoloration and delays quality degradation of fresh-cut stem lettuce [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 147(32-33): 111533.
- [23] RTÉS-HERNÁNDEZ F, ROBLES PA, GÓMEZ PA, *et al.* Quality changes of fresh-cut watermelon during storage as affected by cut intensity and UV-C pre-treatment [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2021, 14: 505-517.
- [24] AVALOS-LLANO KR, MOLINA RS, SGROPPO SC. UV-C treatment applied alone or combined with orange juice to improve the bioactive properties, microbiological, and sensory quality of fresh-cut strawberries [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2020, 13(6): 1528-1543.
- [25] 高梵, 龙清红, 韩聪, 等. UV-C 处理对鲜切红心萝卜抗氧化活性的影

- 响[J]. 食品科学, 2016, 37(11): 12-17.
- GAO F, LONG QH, HAN C, *et al.* Effect of UV-C treatment on antioxidant activity of fresh-cut red-fleshed radish [J]. Food Sci, 2016, 37(11): 12-17.
- [26] LI M, LI X, HAN C, *et al.* UV-C treatment maintains quality and enhances antioxidant capacity of fresh-cut strawberries [J]. Postharvest Biol Technol, 2019, 156: 110945.
- [27] 刘容, 崔媛媛. UV-C 照射与壳聚糖涂膜对鲜切淮山的保鲜效果[J/OL]. 食品科学, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200601.1400.046.html>
- LIU R, CUI YY. The preservation effect of fresh-cut Chinese yam by UV-C irradiation and chitosan coating [J]. Food Sci, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200601.1400.046.html>
- [28] PARK JB, KANG JH, SONG KB. Combined treatment of cinnamon bark oil emulsion washing and ultraviolet-C irradiation improves microbial safety of fresh-cut red chard [J]. LWT-Food Sci Technol, 2018, 93: 109-115.
- [29] CYRELYS C, LAFARGA T, AGUILÓ-AGUAYO I, *et al.* Decontamination of fresh-cut broccoli with a water-assisted UV-C technology and its combination with peroxyacetic acid [J]. Food Control, 2018, 93: 92-100.
- [30] GINÉS BM, FRANCISCO A, PERLA A, *et al.* Combination of electrolysed water, UV-C and superatmospheric O₂ packaging for improving fresh-cut broccoli quality [J]. Postharvest Biol Technol, 2013, 76: 125-134.
- [31] WANG D, CHEN L, MA Y, *et al.* Effect of UV-C treatment on the quality of fresh-cut lotus (*Nelumbonuciferagera*rtm.) root [J]. Food Chem, 2019, 278(25): 659-664.
- [32] 黄镜如. 紫外线结合涂膜处理对鲜切萝卜贮藏品质的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019.
- HUANG JR. Study on storage quality of fresh-cut radish treated with ultraviolet and coated film [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019.
- [33] 周琪, 陈晨, 周福慧, 等. 短波紫外线控制鲜切苹果褐变与其活性氧代谢的相关性[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 110-117.
- ZHOU Q, CHEN C, ZHOU FH, *et al.* Correlation between enzymatic browning inhibition by UV-C treatment and reactive oxygen species metabolism of fresh-cut apples [J]. Food Sci, 2019, 40(5): 110-117.
- [34] 耿亚娟, 王艳颖, 齐海洋, 等. 紫外照射对鲜切苹果营养品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(1): 331-333, 337.
- GENG YJ, WANG YY, QI HP, *et al.* Effect of ultraviolet irradiation on the nutritional quality of fresh-cut apples [J]. Food Ind, 2016, 37(1): 331-333, 337.
- [35] 杨雪梅, 冯立娟, 尹燕雷, 等. 紫外及微波处理对鲜切石榴籽粒保鲜品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 260-265.
- YANG XM, FENG LJ, YI YL, *et al.* Effects of UV and microwave treatment on the preservation quality of fresh-cut pomegranates [J]. Food Sci, 2016, 37(8): 260-265.
- [36] 王娟, 陈平生, 孟祥春. 复合涂膜结合紫外处理对鲜切木瓜冷藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 273-278.
- WANG J, CHEN PS, MENG XC. Effects of compound coating combined with ultraviolet treatment on quality of cold storage fresh-cut papaya [J]. Tran Chin Soc Agric Eng, 2012, 28(2): 273-278.
- [37] 周成敏, 叶秀萍, 王炳华, 等. UV-C 辐照处理对冷藏鲜切黄甜竹笋品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 178-184.
- ZHOU CM, YE XP, WANG BH, *et al.* Effects of UV-C treatment on the quality of fresh-cut bamboo shoots (*acidosadedulis*) during cold storage [J]. Food Res Dev, 2018, 39(16): 178-184.
- [38] 闫帅, 刘贤金, 梁颖, 等. 紫外线照射对鲜切鸡毛菜品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 189-193.
- YAN S, LIU XJ, LIANG Y, *et al.* Effect of UV -C radiation on quality of fresh-cut brassica chinensis [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2014, 30(1): 189-193.
- [39] HUANG R, XIA R, HU L, *et al.* Antioxidant activity and oxygen-scavenging system in orange pulp during fruit ripening and maturation [J]. Sci Hort, 2007, 113(2): 166-172.
- [40] 杨舒怡, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5): 481-489.
- YANG SY, CHEN XY, HUI WK, *et al.* Research progress of antioxidant enzyme system response in plants under stress [J]. J Fujian Agri cForestry Univ (Nat Sci Ed), 2016, 45(5): 481-489.
- [41] HO-MIN K, SALTVEIT ME. Activity of enzymatic antioxidant defense systems in chilled and heat shocked cucumber seedling radicles [J]. Physiol Plantarum, 2010, 113(4): 548-556.
- [42] 王梦茹, 张芳, 贾玉, 等. 短波紫外线处理对贮藏期鲜切马铃薯的护色作用[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 26-31.
- WANG MR, ZHANG F, JIA Y, *et al.* Color-protecting effect of ultraviolet-c treatment on fresh-cut potatoes during storage [J]. Food Res Dev, 2021, 42(5): 26-31.
- [43] 张越, 胡文忠, 管玉格, 等. 鲜切果蔬抗氧化物质生物合成机制的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(4): 240-245.
- ZAHNG Y, HU WZ, GUAN YG, *et al.* Research progress on the mechanism of bio-synthesizing antioxidants substances in fresh-cut fruits and vegetables [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(4): 240-245.
- [44] 胡叶静, 李保国, 石茂占, 等. 鲜切即食果蔬冷杀菌技术研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 52-58.
- HU YJ, LI BG, SHI MZ, *et al.* Research progress of cold sterilization technology of fresh-cut Ready-to-eat fruits and vegetables [J]. Packag Eng, 2020, 41(7): 52-58.
- [45] 胡叶静, 李保国, 张敏, 等. 鲜切果蔬保鲜技术及方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 280-285.
- HU WJ, LI BG, ZHANG M, *et al.* Progresses on fresh-keeping techniques and methods of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(22): 280-285.
- [46] 路媛媛. UV-C 和高 CO₂ 处理对双孢蘑菇采后生理及抗氧化品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- LU YY. Effects of UV-C and high CO₂ treatment on postharvest physiology and antioxidant quality of *Agaricusbisporus* [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [47] 马丽丽, 左进华, 王清, 等. UV-C 处理对青椒色泽和生理品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 281-288.
- MA LL, ZUO JH, WANG Q, *et al.* Effect of UV-C treatment on color and physiological quality of green bell peppers [J]. Food Sci, 2021, 42(3): 281-288.
- [48] 钱书意, 张红颖, 张洋洋, 等. 短波紫外线照射对白玉菇采后贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(2): 25-30.
- QIAN SY, ZHANG HY, ZHANG YY, *et al.* Effect of UV-C irradiation on

- postharvest quality of white *Hypsizygusmaroreus* [J]. *Stor Proc*, 2018, 18(2): 25–30.
- [49] 张志敏, 朱祥, 谢榕倩, 等. 采后 UV-C 处理对树莓贮藏保鲜效果的影响[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(1): 48–52.
ZHANG ZM, ZHU X, XIE RQ, *et al.* Effect of postharvest UV-C treatment on storage and preservation of raspberry [J]. *Stor Proc*, 2020, 20(1): 48–52.
- [50] 张娜, 农绍庄, 李春媛, 等. UV-C 复合热处理或 1-MCP 处理对西兰花保鲜效果的研究[J]. *保鲜与加工*, 2013, 13(2): 9–12.
ZHANG N, NONG SZ, LI CY, *et al.* Study of UV-C combined with heat treatment or 1-MCP treatment on the preservation effects of broccoli [J]. *Storage Process*, 2013, 13(2): 9–12.
- [51] 阚娟, 火统斌, 谢王晶, 等. 1-MCP 和 UV-C 处理对采后苹果抗氧化活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(3): 281–285.
KAN J, HUO TB, XIE WJ *et al.* Effects of 1-MCP and UV-C on antioxidant capacity in apple (*Maluspumila* Mil.) fruit during storage [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2019, 40(3): 281–285.
- [52] FANG XX, SHI YL. Control of postharvest quality in blueberry fruit by combined 1-methylcyclopropene (1-mcp) and uv-c irradiation [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2017, 10: 1695–1703.
- [53] PRISTIJONO P, BOWYER MC, SCARLETT CJ. *et al.* Combined postharvest UV-C and 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment, followed by storage continuously in low level of ethylene atmosphere improves the quality of Tahitian limes [J]. *J Food Sci Technol*, 2018, 55: 2467–2475.
- [54] 刘容, 韦云伊, 孙卫东, 等. UV-C 照射与壳聚糖涂膜保鲜处理对鲜切淮山营养品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(5): 65–70.
LIU R, WEI YY, SUN WD, *et al.* Influence on the nutritional quality of fresh-cut Chinese yam with preservation process by UV-C irradiation and chitosan coating [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(5): 65–70.
- [55] 王涛, 郝利平, 李月圆, 等. 壳聚糖及 UV-C 处理对长山药冷害和品质的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(4): 732–738.
WANG T, HAO LP, LI YT, *et al.* Effects of chitosan and UV-C treatment on the chilling injury and quality of yam [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2019, 33(4): 732–738.
- [56] 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): 61–67.
LI XY, DU XL, LIU Y, *et al.* Effect of UV-C combined with new biological preservation paper on storage quality of honey peaches at room temperature [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(6): 61–67.
- [57] 张艳珍, 李建龙, 李卉, 等. UV-C 结合生物保鲜剂处理对水蜜桃常温保鲜与贮藏效果研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(6): 144–150.
ZHANG WZ, LI JL, LI H, *et al.* Effects of UV-C treatment combine with fresh-keeping agent on quality of normal temperature stored honey peach fruit [J]. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2016, 31(6): 144–150.

(责任编辑: 王欣 韩晓红)

作者简介



邓红军, 硕士, 主要研究方向为果蔬采后贮藏与保鲜。

E-mail: denghjun06@163.com



茅林春, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬贮藏保鲜生物技术。

E-mail: linchun@zju.edu.cn