

紫外线杀菌技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展

王佳宇¹, 胡文忠¹, 于皎雪¹, 管玉格², 赵曼如¹

(1.大连民族大学 生命科学学院, 辽宁 大连 116600;

2.大连理工大学 生命科学与技术学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 通过介绍紫外线杀菌技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展, 以期为其在鲜切果蔬保鲜中的进一步研究与应用提供参考。**方法** 综述国内外长波紫外线、中波紫外线和短波紫外线对鲜切果蔬品质、生理代谢相关酶活性以及微生物的影响。**结果** 紫外线杀菌技术作为一种绿色安全的鲜切果蔬保鲜技术, 可以有效抑制鲜切果蔬中微生物的生长繁殖, 减缓鲜切果蔬生理代谢, 防止褐变, 延迟衰老, 并延长鲜切果蔬货架期, 且不会对鲜切果蔬的风味和口感产生影响。**结论** 在目前重视食品快捷和安全的趋势下, 紫外线杀菌技术因其具有安全方便、对环境友好等特点, 现已在鲜切果蔬保鲜中得到广泛应用, 并具有重要的发展前景。

关键词: 紫外线杀菌; 鲜切果蔬; 保鲜

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)13-0085-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.13.011

Research Progress in the Development of Ultraviolet Sterilization Technology for Fresh-Cut Fruits and Vegetables

WANG Jia-yu¹, HU Wen-zhong¹, YU Jiao-xue¹, GUAN Yu-ge², ZHAO Man-ru¹

(1.College of Life Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China;

2.College of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: This work aims to provide a reference for further research and application in fresh cut fruits and vegetables by introducing the research progress in application of ultraviolet sterilization technology in fresh-cut fruits and vegetables. The effects of long-wave ultraviolet, medium-wave ultraviolet and short-wave ultraviolet on the quality of fresh-cut fruits and vegetables, enzyme activities related to physiological metabolism and microorganism are reviewed. As a green and safe fresh-cut fruits and vegetables preservation technology, ultraviolet sterilization technology can effectively inhibit the growth and reproduction of microorganism in fresh-cut fruits and vegetables, slow down the physiological metabolism of fresh-cut fruits and vegetables, prevent browning, delay aging, and prolong the shelf life. And ultraviolet sterilization technology has no influence on the flavor and taste of fresh-cut fruits and vegetables. Under the current trend of attaching importance to fast and safe food, ultraviolet sterilization technology has been widely used in fresh-cut fruits and vegetables preservation because of its safety, convenience and environmental friendliness, and has an important development prospect.

KEY WORDS: ultraviolet sterilization; fresh-cut fruits and vegetables; freshness

收稿日期: 2020-11-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0400903); 国家自然科学基金(31471923, 31172009)

作者简介: 王佳宇(1996—), 女, 大连民族大学硕士生, 主攻食品科学与工程。

通信作者: 胡文忠(1959—), 男, 博士, 大连民族大学教授, 主要研究方向为食品科学。

鲜切果蔬在保持自身新鲜度和风味的同时还兼具方便、快捷等优点,深受世界各地消费者的青睐。由于鲜切果蔬在加工过程中易受到机械损伤,会加剧代谢反应与呼吸作用,引发一系列生理生化变化,如导致细胞内溶物外流,增加果肉与空气的接触面积,腐败变质,促进细胞衰老及组织褐变等,大大降低其品质以及商品价值,缩短货架期^[1-4],因此如何延长鲜切果蔬货架期已成为当下国内外学者研究的热点。现有的鲜切果蔬保鲜技术主要有化学保鲜技术、物理保鲜技术和生物保鲜技术。其中,生物保鲜技术成本高,对大多数鲜切果蔬的应用还停留在理论阶段;化学保鲜技术的安全残留性问题尚未完全解决;物理保鲜技术因其安全、方便、实际应用性广泛等特点成为目前最为常用的鲜切果蔬保鲜方法^[5-8]。紫外线照射技术作为物理方法中的一类杀菌技术,因其杀菌效果好,且能够保留鲜切果蔬本身的口感和生理活性而受到广泛关注,并具有广阔的市场发展前景。

紫外线(Ultraviolet, UV)指电磁波谱中波长为10~400 nm光线的总称,根据自身波长的不同,可分为长波紫外线(Ultraviolet-A)、中波紫外线(Ultraviolet-B)和短波紫外线(Ultraviolet-C)等3类^[9-11]。有研究表明,紫外线照射可有效抑制鲜切果蔬中微生物菌群的生长,减缓营养成分的流失,避免褐变、腐烂变质等现象发生,有效提高鲜切果蔬在贮藏期间的品质^[12-13]。

1 长波紫外线(UV-A)在鲜切果蔬保鲜中的应用

长波紫外线(UV-A)是紫外辐射中危害最小的部分,其波长为315~400 nm,有研究表明,通过UV-A照射处理鲜切果蔬可以有效提高异香豆素和绿原酸等酚类物质的含量,还可对超氧化物歧化

酶(SOD)、过氧化物酶(POD)等氧化代谢相关酶活性有一定的增强作用^[14-15]。目前市场上长波紫外线的灯管材质多为LED灯珠,有寿命长、产热小、波长稳定、价格低廉等优点,具有极大的应用潜力^[16-17]。综上所述,目前UV-A照射技术已逐渐在鲜切果蔬保鲜行业中得到应用。

UV-A在鲜切果蔬保鲜中的应用见表1。研究表明,使用UV-A照射处理鲜切苹果可通过抑制其多酚氧化酶(PPO)活性使褐变率降低60%,色度减少比例为58%,有效抑制褐变发生^[18]。低强度UV-A循环照射鲜切菠菜可有效抑制总菌和假单胞菌的生长繁殖,同时还可通过调控SOD、POD和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等3种抗氧化酶的活性,来提高鲜切菠菜的抗氧化能力,减缓衰老进程,使货架期达12 d。近年来,郁杰等^[20]还重点开发了UV-A与其他制剂联合使用的保鲜技术,如用低强度UV-A光循环照射结合ε-聚赖氨酸(ε-PL)处理鲜切菠菜,不仅可以达到UV-A单独处理的保鲜效果,还可因ε-PL具有一定的成膜性,较好地抑制了鲜切菠菜中水分的损失。

2 中波紫外线(UV-B)在鲜切果蔬保鲜中的应用

中波紫外线(UV-B)指波长280~315 nm辐射的总称。有研究指出UV-B可以部分穿过大气层到达地面,容易被一些蛋白质、核酸等具有重要功能的大分子物质吸收,而引起植物产生一系列生理生化反应^[22-24]。目前,UV-B照射技术主要在采后果蔬保鲜中应用较多,而在鲜切果蔬保鲜中的研究还较少,还需要进一步研究与探索。

UV-B照射处理已在鲜切果蔬保鲜中的应用见表2。研究表明,UV-B照射处理鲜切菠菜可降低叶片的黄化程度,较好地维持鲜切菠菜的新鲜度,提高其外

表1 长波紫外线在鲜切果蔬保鲜中的应用

Tab.1 Application of ultraviolet A (UV-A) in preservation of fresh-cut fruits and vegetables

紫外线波长/ nm	鲜切果蔬 种类	处理条件	保鲜效果	参考文献
398	苹果	25 °C, 60 min, 剂量: $2.43 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$	PPO活性降低, 色度减少比例为58%, 褐变程度降低	[18]
	梨		PPO活性降低, 色度减少比例为25%, 褐变程度降低	
398	菠菜	420 s, 剂量: 1.764 kJ/m^2	抑制微生物生长, 提高抗氧化能力, 使 货架期达12 d	[19]
399	菠菜	0.05 g/L ε-聚赖氨酸, 140 s, 剂量: 0.588 kJ/m^2	抑制微生物生长, 提高抗氧化能力, 抑 制水分损失, 使货架期达12 d	[20]
365	莴苣	将大肠杆菌菌株DH5α接种于鲜 切莴苣后于UV-A照射处理	照射时间越长, 抑制腐败菌的效果越好	[21]

表 2 中波紫外线在鲜切果蔬保鲜中的应用
Tab.2 Application of ultraviolet B (UV-B) in preservation of fresh-cut fruits and vegetables

紫外线波长/nm	鲜切果蔬种类	处理条件	保鲜效果	参考文献
305	菠菜	360 s, 剂量: 0.9 kJ/m ²	降低叶片黄化程度, 提高外观品质	[25]
280~315	胡萝卜	14 s, 剂量: (20.1± 0.3) mW/cm ²	PAL 活性增加, 抗氧化能力提高	[26]
280~315	胡萝卜	162 s, UV-C, 剂量: 1.5. kJ/m ²	PAL 活性增加 760%, 酚类化合物含量增加 120%~140%, 抗氧化能力提高	[27]
280~315	莴苣	25 s, 剂量: 3.1 kJ/m ²	总酚含量增加 2.5 倍	[28]
	白萝卜	剂量: 1.3, 3.1, 5.9, 12.0 kJ/m ²	总酚含量在贮藏过程中基本不变	

观品质^[25]。Du 等^[26]研究表明, UV-B 照射鲜切胡萝卜, 可通过调节苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 的活性, 从而提高抗氧化性能力。Formica-oliveira 等^[27]同样研究发现, 经过 UV-B 照射处理可使鲜切胡萝卜 PAL 活性和酚类化合物含量分别增加 760%和 120%~140%, 且此处理不会对鲜切胡萝卜生物活性化合物的积累产生影响, 极大程度上保护了机体组织细胞免受外界损害。由于 UV-B 并不是照射处理所有果蔬都会使其总酚含量增加, 有学者就曾研究发现 UV-B 照射处理鲜切白萝卜后并不会提高其总酚含量, 故推断得出 UV-B 照射保鲜效果可能与果蔬种类有关^[28]。

3 短波紫外线 (UV-C) 在鲜切果蔬保鲜中的应用

3.1 单独处理

短波紫外线 (UV-C) 指波长范围为 200 ~ 280 nm 的电磁辐射^[29]。UV-C 杀菌技术相较于 UV-A 和 UV-B 在鲜切果蔬保鲜中较为常用。研究表明, 适度剂量的 UV-C 不仅可以保持鲜切果蔬的品质, 还可以激发鲜切果蔬组织的应急防御反应, 促进多酚、类黄酮等次级代谢产物的合成, 增强抗氧化能力^[30-33]。以下详述 UV-C 杀菌技术对鲜切果蔬感官品质及营养成分、生理代谢相关酶活性和抑制微生物生长繁殖等 3 个方面的影响。短波紫外线 (UV-C) 单独处理在鲜切果蔬保鲜中的应用见表 3。

1) 对鲜切果蔬感官品质及营养成分的影响。赵磊等^[34]研究发现, UV-C 照射处理鲜切黄瓜片可使其保持良好的色泽, 增加总酚含量, 货架期延长约 2 d; UV-C 还可显著抑制鲜切菠萝可滴定酸和褐变度增加, 延缓机体衰老^[35]; 对于鲜切辣椒, UV-C 也可以起到良好的保鲜效果, 可有效地延缓果胶溶解和降低呼吸强度, 同时还可诱导酚类物质增加, 提高抗氧化能力, 推迟鲜切辣椒软化和腐烂变质发生^[36]; UV-C 照射处理可以有效提高鲜切果蔬感官品质及营养价

值的效果, 还体现在对鲜切西兰花^[37]、西瓜^[38]、莲藕^[39]以及胡萝卜^[40]等鲜切果蔬上。

2) 对鲜切果蔬生理代谢相关酶活性的影响。高梵等^[41]研究发现使用 UV-C 照射处理鲜切红心萝卜, 一方面可以通过提高 PAL 活性激活苯丙烷类代谢的途径, 促进黄酮和花青素等酚类物质的合成, 另一方面, 还可以通过对抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 进行调控而较好地控制抗坏血酸的分解速度, 以提高鲜切红心萝卜的抗氧化活性。周成敏等^[42]发现 UV-C 照射处理鲜切黄甜竹笋可以降低木质素合成相关酶的活性, 如多酚氧化酶 (PPO)、肉桂醇脱氢酶 (CAD)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 和过氧化物 (POD) 等, 从而抑制木质素积累, 延缓鲜切黄甜竹的木质化进程。此外, UV-C 照射处理还能提高鲜切草莓肉桂酸 4-羟基化酶 (C4H)、4-香豆酸辅酶 A 连接酶 (4CL) 和 PAL 等 3 种酶的基因表达和活性, 以此激活苯丙氨酸的代谢途径, 提高其防御反应, 能够较好地维持鲜切草莓在贮藏期间的品质^[43]。

3) 对抑制鲜切果蔬中微生物生长繁殖的影响。目前, 国内外学者已对短波紫外线的杀菌机理有了普遍认同, 认为 UV-C 可通过穿透微生物细胞膜使 DNA 链中相邻的胸腺嘧啶和胞嘧啶之间发生交联, 从而阻碍 DNA 复制和翻译, 导致细胞无法运行正常的功能, 最终使其死亡^[44]。有研究表明, 适度剂量的 UV-C 照射处理可使沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌和大肠杆菌的数量减少 5 lg(CFU/mL)以上^[45]; 在鲜切果蔬保鲜应用上, Martinez-hernandez 等^[46]曾发现低 UV-C 辐射剂量可有效降低鲜切西兰花表面大肠杆菌、肠炎链球菌和单核细胞增生李斯特菌的数量, 同时使鲜切西兰花的菌群在 5~10 ℃的货架期内保持稳定。Santo 等^[47]还发现使用 UV-C 照射处理鲜切水果 (“皇家嘎拉”苹果、“罗莎”梨和“蛙皮”甜瓜) 可对阪崎肠杆菌起到明显的抑制作用, 使其减少量高于 2 lg(CFU/g)。除此之外, UV-C 处理鲜切苹果^[48-49]、鲜切菠萝^[50]和鲜切胡萝卜^[51]后也同样起到了抑制微生物生长繁殖的作用。

表 3 短波紫外线在鲜切果蔬保鲜中的应用
Tab.3 Application of ultraviolet C (UV-C) in preservation of fresh-cut fruits and vegetables

紫外线波长/nm	鲜切果蔬种类	处理条件	保鲜效果	参考文献
200~280	黄瓜	60 min, 剂量: 18.0 kJ/m ²	保持良好的色泽, 增加总酚含量, 将货架期延长约 2 d	[34]
200~280	菠萝	90 s, 剂量: 4.5 kJ/m ²	提高硬度、TSS 和还原糖, 降低可滴定酸和褐变度	[35]
254	辣椒	剂量: 10.0 kJ/m ²	诱导酚类物质增加, 降低辣椒软化和腐烂现象发生	[36]
200~280	西兰花	剂量: 4.5 kJ/m ²	总酚和羟基肉桂酸衍生物含量分别增加 0.25 倍和 4.8 倍, 延缓叶绿素降解的同时提高了总抗氧化能力值	[37]
200~280	西瓜	剂量: 1.6, 2.8 kJ/m ²	提高了总抗氧化能力, 可在 5 °C 下保存 11 d	[38]
200~280	莲藕	10 min, 剂量: 1.5~3.0 kJ/m ²	褐变程度明显降低	[39]
200~280	胡萝卜	剂量: (0.78 ± 0.36)kJ/m ²	可诱导酚类和类胡萝卜素的合成, 防止腐烂褐变, 提高外观质量	[40]
200~280	红心萝卜	剂量: 1.0 kJ/m ²	在一定时间内可以有效提高抗氧化酶类 (SOD、POD 和 CAT) 活性, 清除活性氧, 提高抗氧化能力	[41]
200~280	黄甜竹	剂量: 2.6 kJ/m ²	降低 POD、CAD、PPO 和 PAL 等木质素合成代谢相关酶活性, 以提高 SOD 和 CAT 的活性而抑制木质素的累积, 延缓了木质化进程	[42]
200~280	草莓	剂量: 4.0 kJ/m ²	提高 PAL、C4H 和 4CL 的基因表达和活性, 激活苯丙氨酸代谢途径, 提高防御反应	[43]
253.7	沙拉	剂量: 0.4 kJ/m ²	使接种的沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌和大肠杆菌数量减少 5 lg(CFU/mL)以上	[45]
200~280	西兰花	剂量: 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0 kJ/m ²	低 UV-C 辐射剂量有效降低了鲜切西兰花表面大肠杆菌、肠炎链球菌和单核细胞增生李斯特菌的数量	[46]
200~280	苹果			
200~280	梨	剂量: 7.5, 10.0 kJ/m ²	可使阪崎肠杆菌 (又称阪崎氏肠杆菌) 减少量高于 2 lg(CFU/g)	[47]
200~280	甜瓜			
200~280	苹果	双面, 剂量: 0.96 kJ/m ²	较好地抑制了沙门氏菌、霉菌和酵母菌的生长繁殖	[48—49]
254	菠萝	60 ~ 90 s	可杀灭大肠菌群, 显著抑制霉菌、酵母菌和菌落总数的生长	[50]
254	胡萝卜	剂量: 0.86 kJ/m ²	显著降低表面微生物的生长繁殖速率	[51]
200~280	甜瓜	剂量: 0, 1.2, 6.0, 12.0 kJ/m ²	活菌总数和肠杆菌科减少 2 lg(CFU/g)	[52]

3.2 复合其他保鲜技术

近年来, 一些学者还发现 UV-C 复合其他保鲜技术在鲜切果蔬保鲜中的应用同样可取得显著的保鲜效果。使用 UV-C 结合二氧化氯处理鲜切毛竹笋, 一方面可降低 POD、PPO 和 PAL 的活性, 另一方面也可降低木质素和丙二醛含量的积累, 极大程度上延缓了鲜切毛竹笋木质化进程, 保持了原有的新鲜度^[53]。姜丹等^[54]使用柠檬酸和 UV-C 联合处理鲜切苹果, 发

现此复合技术同样可降低 PPO、POD 和 PAL 的活性, 延缓了鲜切苹果褐变和果肉软化等现象发生。另外, 还有研究发现, 将水辅助 UV-C (WUV) 技术与过氧乙酸 (PAA) 联用应用于鲜切西兰花, 可降低需氧嗜温微生物的总数, 将总抗氧化能力 (TAC) 和萝卜硫素含量分别提高 0.9 倍和 4 倍, 有效保持鲜切西兰花品质的同时还提高了在贮藏期间的食品安全性^[55]。短波紫外线 (UV-C) 复合其他保鲜技术在鲜切果蔬保鲜中的应用见表 4。

表 4 短波紫外线复合其他保鲜技术在鲜切果蔬保鲜中的应用
Tab.4 Application of ultraviolet C (UV-C) combined with other fresh-keeping methods in preservation of fresh-cut fruits and vegetables

紫外线波长/nm	鲜切果蔬种类	复合保鲜技术	处理条件	保鲜效果	参考文献
200~280	毛竹笋	100 mg/L ClO ₂	剂量: 6.0 kJ/m ²	降低 PAL、PPO 和 POD 活性, 降低木质素合成和丙二醛积累, 减缓木质化进程	[53]
254	苹果	体积分数为 0.5%的柠檬酸(CA)	5 min/面	降低 POD、PAL 和 PPO 活性, 抑制鲜切苹果褐变、果肉软化等现象的发生	[54]
200~280	西兰花	50 mg/L 过氧乙酸(PAA)	剂量: 0.5 kJ/m ²	可降低需氧嗜温微生物的总数, TAC 和萝卜硫素含量分别提高 90%和 4 倍, 提高了在贮藏期间的食品安全性	[55]
253.7	苹果	体积分数为 0.5%的柠檬酸(CA)	5 min/面	有效维持了酚类物质含量, 减少了褐变反应发生, 使贮藏过程中细菌总数减少了 2.6 lg(CFU/g)	[56]
200~280	苹果	体积分数为 1%的柠檬酸(CA) 质量分数为 3%的壳聚糖(CS)	10 min/面	褐变度和失重率分别降低至 0.386 和 2.76%, 有害物质 MDA 减少, 并且降低了微生物的繁殖速度, 降低了菌落总数	[57]
200~280	西兰花	中性电解水(NEW) 超高压 O ₂ 包装(HO)	剂量: 6.0 kJ/m ²	丙氨酸 (ALA) 和硬脂酸 (SA) 含量分别降低了 27%~44%和 31%~61%, 且在货架期内总酚含量和抗氧化能力保持稳定	[58]
254	西兰花	结合水洗(WUV)	剂量: 0.5 kJ/m ²	可使单核细胞增生李斯特菌的初始菌落总数减少 2.4 lg(CFU/g)	[59]
253.7	淮山	质量分数为 1%的壳聚糖(CS)	剂量: 3.0 kJ/m ²	可使呼吸强度和菌落总数分别降低 23.6%和 30.8%, 使总酚含量和抗氧化能力分别提高 22.2%和 20.2%	[60]

4 结语

随着鲜切果蔬受到越来越多消费者的喜爱, 保鲜技术也逐渐成为学者们关注的热点。紫外线杀菌技术作为一种简单易操作、安全的物理保鲜技术, 具有杀菌效果强、可以有效抑制致腐微生物生长繁殖、在保持品质的同时且不会影响鲜切果蔬的口感和风味等优点, 现在鲜切果蔬保鲜技术中占有重要地位。此技术也存在些许弊端, 如紫外线的穿透力较低, 容易受到鲜切果蔬表面水分以及其他因素的影响, 故一般情况下会通过提高紫外线剂量或与一些保鲜剂复合使用来提高杀菌能力; 且使用时应该避免光源直接照射人体, 以免引起损伤。此外, 现在的紫外线照射设备并不能完全使鲜切果蔬均匀受照, 此技术今后可以在设备上进一步优化, 为其更好地商业应用奠定基础。总之, 紫外线尤其是短波紫外线作为一种非热力的杀菌手段, 具有对环境友好和良好的杀菌与抑菌活性等特点, 在目前重视食品营养、安全和方便快捷的趋势下, 在鲜切果蔬保鲜乃至整个食品保鲜领域已日益受

到重视, 具有重要的发展前景。

参考文献:

[1] OLIVEIRA M, ABADIAS M, USALL J, et al. Application of Modified Atmosphere Packaging as a Safety Approach to Fresh-Cut Fruits and Vegetables-A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015(46): 13—26.

[2] YOUSUF B, QADRI O S, SRIVASTAVA A K. Recent Developments in Shelf-Life Extension of Fresh-Cut Fruits and Vegetables by Application of Different Edible Coatings: a Review[J]. LWT, 2018: 198—209.

[3] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent Developments in Novel Shelf Life Extension Technologies of Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. Trends in Food Ence & Technology, 2017(64): 23—38.

[4] 韩再阳. 鲜切果蔬加工及质量安全控制[J]. 农家参谋, 2019(6): 60.

HAN Zai-yang. Processing and Quality Safety Control of Fresh Cut Fruits and Vegetables[J]. The Farmers Consultant, 2019(6): 60.

- [5] CACACE J E, DELAQUIS P J, MAZZA G. Effect of Chemical Inhibitors and Storage Temperature on the Quality of Fresh-Cut Potatoes[J]. *Journal of Food Quality*, 2010, 25(3): 181—195.
- [6] 程丽林, 吴波, 袁海君, 等. 鲜切果蔬贮藏保鲜技术研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(1): 147—152.
CHENG Li-lin, WU Bo, YUAN Hai-jun, et al. Research Progress in Storage and Preservation Technologies of Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. *Storage and Process*, 2019, 19(1): 147—152.
- [7] 梅桂斌. 鲜切果蔬保鲜技术及研究进展[J]. *现代食品*, 2017(13): 75—78.
MEI Gui-bin. Fresh-Keeping Technology of Fresh-Cut Fruits and Vegetables and Its Research Progress[J]. *Modern Food*, 2017(13): 75—78.
- [8] 纪懿芳, 胡文忠, 姜爱丽. 应用于鲜切果蔬中的保鲜技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(7): 2403—2408.
JI Yi-fang, HU Wen-zhong, JIANG Ai-li. Application of Preservation Technologies in Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, 6(7): 2403—2408.
- [9] 张红, 李晴晴, 许庆龙, 等. 紫外线与保鲜膜对蓝莓冷藏保鲜效果的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 314—318.
ZHANG Hong, LI Qing-qing, XU Qing-long, et al. Effects of Ultraviolet and Plastic Film on Preservation of Blueberry During Cold Storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(9): 314—318.
- [10] 王中元, 王展, 李雯, 等. 短波紫外线处理对木薯保鲜效果及生理指标的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(2): 256—260.
WANG Zhong-yuan, WANG Zhan, LI Wen, et al. Effects of Ultraviolet-C Treatment on Postharvest Physiology and Storage Quality of Cassava Tubers[J]. *Food Science*, 2016, 37(2): 256—260.
- [11] 阎瑞香, 张娜, 关文强. 短波紫外线在果蔬采后保鲜中的应用研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2011, 11(5): 1—5.
YAN Rui-xiang, ZHANG Na, GUAN Wen-qiang. Advance of Research and Application of Ultraviolet-C Light in Fruits and Vegetables after Harvest[J]. *Storage and Process*, 2011, 11(5): 1—5.
- [12] 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, 36(4): 50—52.
HONG Ya-min, ZHU Qing-qing, LIU Qing, et al. Research Progress of Ultraviolet Radiation in Fruits and Vegetables[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2017, 36(4): 50—52.
- [13] 梁惜雯, 顾思彤, 姜爱丽, 等. 自发气调在鲜切果蔬包装中的应用研究进展[J]. *包装工程*, 2020, 41(15): 8—13.
LIANG Xi-wen, GU Si-tong, JIANG Ai-li, et al. Research Progress in Application of Modified Atmosphere Packaging in Fresh-Cut Fruits and Vegetables[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(15): 8—13.
- [14] HOLLÓSY F. Effects of Ultraviolet Radiation on Plant Cells[J]. *Micron*, 2002, 33(2): 179—197.
- [15] SURJADINATA B B, JACOBO-VELÁZQUEZ D A, CISNEROS-ZEVALLOS L. UV-A, UV-B and UV-C Light Enhances the Biosynthesis of Phenolic Antioxidants in Fresh-Cut Carrot Through a Synergistic Effect with Wounding[J]. *Molecules*, 2017, 22(4): 668.
- [16] 靳志强, 王顺喜. 微波、紫外线与臭氧组合技术对霉菌及其毒素的协同影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4): 147—154.
JIN Zhi-qiang, WANG Shun-xi. Synergistic Effects of Microwave, Ultraviolet and Ozone Combination on Mold Spores and Aflatoxin[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(4): 147—154.
- [17] 孙卫东. 浅谈 LED 照明现状与未来的展望[J]. *科技展望*, 2016, 26(15): 311.
SUN Wei-dong. The Present Situation and Future Prospect of LED Lighting[J]. *Science and Technology*, 2016, 26(15): 311.
- [18] LANTE A, TINELLO F, NICOLETTO M. UV-A Light Treatment for Controlling Enzymatic Browning of Fresh-Cut Fruits[J]. *Innovative Food Ence & Emerging Technologies*, 2016, 34(6): 141—147.
- [19] 郁杰, 张雨宸, 谢晶. 低强度 UV-A 光循环辐照对 4 °C 下鲜切菠菜品质及抗氧化能力的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(21): 139—146.
YU Jie, ZHANG Yu-chen, XIE Jing. The Effect of Cyclic Irradiation of Low Intensity UV-A on Quality and Antioxidant Capacity of Fresh-Cut Spinach at 4 °C[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(21): 139—146.
- [20] 郁杰, 张雨宸, 谢晶. 低强度 UV-A 光循环照射结合 ϵ -聚赖氨酸处理对 4 °C 下鲜切菠菜保鲜效果的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(18): 154—160.
YU Jie, ZHANG Yu-chen, XIE Jing. The Effect of Cyclic Irradiation of Low-Intensity UV-A Combined with ϵ -Polylysine on the Preservation of Fresh-Cut Spinach at 4 °C[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(18): 154—160.
- [21] AIHARA M, LIAN X, SHIMOHATA T, et al. Vegetable Surface Sterilization System Using UV-A Light-Emitting Diodes[J]. *J Med Invest*, 2014, 61(3): 285—290.
- [22] 王瀚博. UV-B 辐照对绿豆芽苗蔬菜品质和保鲜效果的影响[D]. 新乡: 河南师范大学, 2017: 17—52.
WANG Han-bo. Effects of Ultraviolet-B Irradiation on the Quality and Storage of Mung Bean Sprouts[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2017: 17—52.
- [23] 郑剑. 中短波紫外辐照和草酸处理对去壳竹笋冷藏下的保鲜效果及其机制研究[D]. 杭州: 浙江工商大

- 学, 2018: 22—75.
- ZHENG Jian. Effect of UV-B/C or Oxalic Acid Treatment on Improving Quality in Bamboo Shoots (*Phyllostachys Prominens* or *Bambusa Oldhami*) without Sheaths and Its Involved Mechanism During Cold Storage[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018: 22—75.
- [24] 辛鑫. UV-B 辐照对萝卜芽苗菜形态、营养品质及采后贮藏品质的影响[D]. 新乡: 河南师范大学, 2018: 20—43.
- XIN Xin. Effects of UV-B Irradiation on Morphology, Nutritional Quality and Postharvest Storage Quality of Radish Sprouts[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2017: 20—43.
- [25] KASM M U, KASM R. Yellowing of Fresh-Cut Spinach (*Spinacia Oleracea* L) Leaves Delayed by UV-B Applications[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(3): 214—219.
- [26] DU W X, AVENA-BUSTILLOS R J, III A P B, et al. Effect of UV-B Light and Different Cutting Styles on Antioxidant Enhancement of Commercial Fresh-Cut Carrot Products[J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 1862—1869.
- [27] FORMICA-OLIVEIRA A C, MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ G B, DÍAZ-LÓPEZ V, et al. Effects of UV-B and UV-C Combination on Phenolic Compounds Biosynthesis in Fresh-Cut Carrots[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017(127): 99—104.
- [28] DU W X, AVENA-BUSTILLOS R J, BREKSA A P, et al. UV-B Light as a Factor Affecting Total Soluble Phenolic Contents of Various Whole and Fresh-Cut Specialty Crops[J]. Postharvest Biology & Technology, 2014(93): 72—82.
- [29] 李静. 切割方式和UV-C处理对鲜切莴苣品质及抗氧化活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017: 17—40.
- LI Jing. Effect of Cutting Styles and UV-C Treatment on Quality and Antioctoant Activity of Fresh-Cut Lettuce[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017: 17—40.
- [30] 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 Zhi-min, ZHU Xiang, XIE Rong-qian, et al. Effect of Postharvest UV-C Treatment on Storage and Preservation of Raspberry[J]. Storage and Process, 2020, 20(1): 48—52.
- [31] ERKAN M, WANG S Y, WANG C Y. Effect of UV Treatment on Antioxidant Capacity, Antioxidant Enzyme Activity and Decay in Strawberry Fruit[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 48(2): 163—171.
- [32] GONZÁLEZ-AGUILAR G A, VILLEGAS-OCHOA M A, MARTÍNEZ-TÉLLEZ M A, et al. Improving Antioxidant Capacity of Fresh-Cut Mangoes Treated with UV-C[J]. Journal of Food Ence, 2007, 72(3): 197—202.
- [33] Jagadeesh S L, Charles M T, Gariepy Y, et al. Influence of Postharvest UV-C Hormesis on the Bioactive Components of Tomato During Post-Treatment Handling[J]. Food & Bioprocess Technology, 2011, 4(8): 1463—1472.
- [34] 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 Lei, WANG Dan, MA Yue, et al. Effect of Ultraviolet C Irradiation on the Quality of Fresh Cut Cucumber Slices[J]. The Food Industry, 2019, 40(5): 205—209.
- [35] PAN Y G, ZU H. Effect of UV-C Radiation on the Quality of Fresh-Cut Pineapples[J]. Procedia Engineering, 2012(37): 113—119.
- [36] RODONI L M, ZARO M J, HASPERUE J H, 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 Science and Technology, 2015, 63(1): 408—414.
- [37] MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ G B, GÓMEZ P A, PRADAS I, et al. Moderate UV-C Pretreatment as a Quality Enhancement Tool in Fresh-Cut Bimi® broccoli[J]. Postharvest Biology & Technology, 2011, 62(3): 327—337.
- [38] ARTÉS-HERNÁNDEZ F, ROBLES P A, GÓMEZ P A, et al. Low UV-C Illumination for Keeping Overall Quality of Fresh-Cut Watermelon[J]. Postharvest Biology & Technology, 2010, 55(2): 114—120.
- [39] WANG D, CHEN L, MA Y, et al. Effect of UV-C Treatment on the Quality of Fresh-Cut Lotus (*Nelumbo Nucifera Gaertn*) Root[J]. Food Chemistry, 2018(278): 659—664.
- [40] ALEGRIA C, PINHEIRO J, DUTHOIT M, et al. Fresh-Cut Carrot (cv. Nantes) Quality as Affected by Abiotic Stress (Heat Shock and UV-C Irradiation) Pre-Treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48(2): 197—203.
- [41] 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 Fan, LONG Qing-hong, HAN Cong, et al. Effect of UV-C Treatment on Antioxidant Activity of Fresh-Cut Red-Fleshed Radish[J]. Food Science, 2016, 37(11): 12—17.
- [42] 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 Cheng-min, YE Xiu-ping, WANG Bing-hua, et al. Effects of UV-C Treatment on the Quality of Fresh-Cut Bamboo Shoots (*Acidosasa Edulis*) During Cold Storage[J]. Food Research and Development, 2018, 39(16): 178—184.

- [43] 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.
- [44] 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: 11—20.
HUANG Jing-ru. Study on Storage Quality of Fresh-Cut Radish Treated with Ultraviolet and Coated Film[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019: 11—20.
- [45] IGNAT A, MANZOCCO L, BARTOLOMEOLI I, et al. Minimization of Water Consumption in Fresh-Cut Salad Washing by UV-C Light[J]. *Food Control*, 2015(50): 491—496.
- [46] MARTINEZ-HERNANDEZ G B, HUERTAS J P, NAVARRO-RICO J, et al. Inactivation Kinetics of Foodborne Pathogens by UV-C Radiation and Its Subsequent Growth in Fresh-Cut Kailan-Hybrid Broccoli[J]. *Food Microbiology*, 2015, 46(4): 263—271.
- [47] SANTO D, GRAA A, NUNES C, et al. Survival and Growth of *Cronobacter Sakazakii* on Fresh-Cut Fruit and the Effect of UV-C Illumination and Electrolyzed Water in the Reduction of Its Population[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016(231): 10—15.
- [48] 陈敏, 兰维杰, 罗惟, 等. 双面紫外照射对鲜切苹果表面微生物及品质的影响[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(9): 3660—3666.
CHEN Min, LAN Wei-jie, LUO Wei. The Influence of Double-Sided UV Irradiation on the Surface Microorganism and Quality of Fresh-Cut Apple[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(9): 3660—3666.
- [49] MANZOCCO L, PIEVE S D, BERTOLINI A, et al. Surface Decontamination of Fresh-Cut Apple by UV-C Light Exposure: Effects on Structure, Colour and Sensory Properties[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 61(2): 165—171.
- [50] 祖鹤, 潘永贵, 陈维信, 等. 短波紫外线照射对鲜切菠萝微生物的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(17): 67—69.
ZU He, PAN Yong-gui, CHEN Wei-xin, et al. Effect of UV-C Irradiation on Microbial Indexes of Fresh-Cut Pineapples[J]. *Food Science*, 2009, 30(17): 67—69.
- [51] 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: 19—40.
CHEN Chen. Effects of UV-C Treatment on Quality Maintenance and Antioxidant Capacity in Fresh-Cut Carrot[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015: 19—40.
- [52] MANZOCCO L, PIEVE S D, MAIFRENI M. Impact of UV-C Light on Safety and Quality of Fresh-Cut Melon[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2011, 12(1): 10—17.
- [53] 黄程前, 姚熔燕, 杨虎清, 等. UV-C 结合 ClO_2 处理对鲜切毛竹笋的保鲜作用[J]. *安徽业科学*, 2013, 41(28): 11506—11508.
HUANG Cheng-qian, YAO Rong-yan, YANG Hu-qing, et al. Fresh-Keeping Effect of UV-C Combined with ClO_2 on Fresh-Cut Bamboo Shoots[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(28): 11506—11508.
- [54] 姜丹, 胡文忠, 姜爱丽. 紫外线照射与柠檬酸处理对鲜切苹果的保鲜作用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015(7): 2482—2488.
JIANG Dan, HU Wen-zhong, JIANG Ai-li. Effects of Ultraviolet Irradiation and Citric Acid Treatment on Fresh-Cut Apples[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015(7): 2482—2488.
- [55] CYRELYS C, TOMÁS L, INGRID A A, et al. Decontamination of Fresh-Cut Broccoli with a Qater-Assisted UV-C Technology and Its Combination with Peroxyacetic Acid[J]. *Food Control*, 2018(93): 92—100.
- [56] CHEN C, HU W, HE Y, et al. Effect of Citric Acid Combined with UV-C on the Quality of Fresh-Cut Apples[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2016(111): 126—131.
- [57] 丁真真, 刘飞, 张甜, 等. UV-C 辐照结合涂膜处理对鲜切苹果贮藏品质的影响[J]. *中国果菜*, 2020, 40(7): 1—6.
DING Zhen-zhen, LIU Fei, ZHANG Tian, et al. Effect of UV-C Irradiation Combined with Film Treatment on the Quality of Fresh-Cut Apple During Storage Period[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2020, 40(7): 1—6.
- [58] MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ G B, ARTÉS-HERNÁNDEZ F, GÓMEZ P A, et al. Combination of Electrolysed Water, UV-C and Superatmospheric O_2 Packaging for Improving Fresh-Cut Broccoli Quality[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2013(76): 125—134.
- [59] COLLAZO C, CHARLES F, INGRID A A, et al. Decontamination of *Listeria Innocua* from Fresh-cut Broccoli using UV-C Applied in Water or Peroxyacetic Acid, and Dry-Pulsed Light[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019(52): 438—449.
- [60] 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]. *食品科学*, 2021, 42(3): 289—295.
LIU Rong, CUI Yuan-yuan. The Preservation Effect of Fresh-Cut Chinese Yam by UV-C Irradiation and Chitosan Coating[J]. *Food Science*, 2021, 42(3): 289—295.