DOI:10.12441/spyswjs.20241210001 [文章编号] 1673-1689(2025)10-0010-09

光处理在果蔬采后保鲜中的研究进展

郑莉莉[1] 林 岳[2]

(1. 厦门城市职业学院人工智能学院,福建 厦门 361008; 2. 厦门大学电子科学与技术学院,福建 厦门 361100)

摘要:果蔬采后常面临衰老与病害问题,导致品质下降。传统保鲜技术虽应用广泛,但部分技术存在一定的健康风险。光处理技术作为新兴的无热无毒保鲜手段,主要基于光对植物生理和微生物生长的影响,助力维持果蔬新鲜度和市场价值,受到食品行业的广泛关注。光处理技术的光源主要包括发光二极管(LED)、紫外线(UV)、荧光灯(FL)和脉冲光(PL)等。作者综述了光处理技术在果蔬保鲜中的应用机理与效果,分析了光处理对果蔬营养价值、抗氧化成分和酶活性的影响,并讨论了该技术当前面临的挑战和未来发展方向。

关键词:光处理技术;果蔬保鲜;无热无毒

Research Progress in Light Treatment for Postharvest Preservation of Fruits and Vegetables

ZHENG Lili[1] *LIN Yue*[2]

(1. School of Artificial Intelligence, Xiamen City University, Xiamen 361008, China; 2. School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361100, China)

Abstract: Postharvest fruits and vegetables often face issues of senescence and diseases, which lead to a decline in quality. Although conventional preservation techniques are widely applied, some of them have certain health risks. Light treatment, as an emerging non-thermal and non-toxic preservation technology, has attracted attention in the food industry. On the basis of the impacts of light on plant physiology and microbial growth, light treatment helps to maintain the freshness and market value of fruits and vegetables. The light sources for light treatment mainly include light-emitting diodes (LED), ultraviolet (UV), fluorescent lamps (FL), and pulsed light (PL). This review explores the application mechanisms and effects of light treatment in the preservation of fruits and vegetables, analyzes the effects of light treatment on the nutritional value, antioxidant components, and enzyme activity of fruits and vegetables, and discusses the current challenges and future development directions of this technology.

Keywords: light treatment technology; preservation of fruit and vegetable; non-thermal and non-toxic

水果和蔬菜是日常饮食的重要组成部分,富含维生素、矿物质(如钾、镁、钙等)、植物化学物质(如类胡萝卜素、酚类、含氮化合物和生物碱等)和膳食纤维。这些营养素不仅能满足人体日常需求,还有助于促进骨骼健康、调节血脂与血压、改善心血管功能,并可能降低认知障碍的发病风险[1-2],对维持人体健康至关重要。因此,研究高效的保鲜技术,对保障食品安全、维持果蔬营养价值及满足消费者需求具有重要意义。

传统保鲜方法包括低温、气调、辐照等物理方法,以及使用防腐剂、臭氧等化学方法,但部分方法存在一定的负面影响,或对环境与人体健康构

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62374142);厦门市自然科学基金青年基金项目(3502Z202472051);福建省中青年教学科研项目(JAT231252)。

通信作者:郑莉莉(1992—),女,博士,讲师,主要从事植物照明和人工智能研究。E-mail:935681005@qq.com

收稿日期:2024-12-10 **修回日期:**2025-01-26

成潜在风险。因此，开发新型的物理保鲜技术，以满足消费者对安全、健康食品的需求变得尤为迫切。光处理技术作为一种新兴的保鲜手段，以其安全、高效、无污染的特点，在维持果蔬感官品质与营养价值的同时，能有效抑制微生物生长繁殖、延长货架期，展现出良好的应用潜力[3]。

作者聚焦LED、UV、FL和PL光源在果蔬采后保鲜领域的最新研究进展，深入分析了光处理对果蔬颜色、质地、呼吸、失重率、可溶性固形物含量、抗氧化能力及酶活性等关键品质指标的影响。通过综合考量这些因素，全面评估光处理技术在维持果蔬新鲜度、延长货架期方面的应用效果，并讨论了其安全性与成本效益问题，为该技术的实际应用提供理论支撑与实践指导。

1 果蔬采后贮藏面临的问题

1.1 采后生理变化与品质下降

果蔬采后仍维持活跃的生理代谢活动，通过呼吸作用消耗有机物产生能量，引发氧化褐变、组织软化、营养流失等一系列生化变化，直接影响产品品质和货架期。多酚氧化酶（PPO）会催化多酚与氧气发生反应，生成苯二酚并进一步形成黑色素，导致果蔬出现褐变现象。同时，叶绿素、花青素和类胡萝卜素含量会逐渐降低，进而影响果蔬的外观品质。果蔬软化主要与细胞壁结构变化相关，细胞壁由果胶、纤维素和半纤维素等多糖组成，其中果胶是维持结构稳定性的关键成分。多聚半乳糖醛酸酶、果胶甲酯酶和β-半乳糖苷酶等酶类会降解果胶，破坏细胞壁结构完整性，最终导致组织软化[4-5]。此外，果蔬采后无法获得营养补给，在贮藏及烹饪过程中，有机酸、维生素C、类胡萝卜素、酚类化合物和叶绿素等关键营养成分受酶的作用发生分解、转移或被呼吸代谢消耗，导致含量逐渐降低，进而导致果蔬营养价值与食用品质下降。

1.2 微生物污染与腐败

微生物是导致果蔬腐烂的关键要素。在包装、运输过程中，果蔬可能因遭受挤压、摩擦产生机械损伤，这为微生物繁殖提供了理想的营养条件与侵入通道。果蔬采摘后，其表面通常会附着一定数量的致腐微生物，因初期微生物数量较少，且果蔬表面具备天然防护层，腐烂现象并不明显。但随着时间的推移，微生物会持续增殖并逐渐侵入果蔬内部，最终导致果蔬腐败变质，尤其在果蔬存在机械损伤的情形下，腐败程度会更为严重。此外，果蔬采后易受青霉菌、曲霉菌等真菌侵染，这些病原体可能产生霉菌毒素，从而对果蔬品质及人体健康构成潜在威胁[6-7]。

1.3 果蔬贮藏技术的局限性

部分传统果蔬保鲜技术会对人体健康构成潜在风险，尤其是化学保鲜技术中使用的防腐剂等添加剂，可能存在残留问题，长期摄入这类化学物质会对消费者健康造成不良影响。同时，部分传统果蔬贮藏技术的保鲜效果存在局限性。例如，低温贮藏（包括冰温贮藏和过冷贮藏）技术虽能在一定程度上抑制果蔬呼吸作用与微生物生长，但温度过低可能导致果蔬发生冷害，破坏其组织结构，影响口感与营养价值[8]。气调包装技术通过调节贮藏环境中的气体浓度来延长保鲜期，但需精确控制氧气和二氧化碳浓度[9]；若氧气浓度过低或二氧化碳浓度过高，果蔬会发生无氧呼吸，产生乙醇等有害物质，既影响果蔬品质又可能危害人体健康。臭氧作为强氧化剂，若使用浓度或使用方法不当，易导致果蔬发生氧化损伤，影响其感官品质与营养价值。高压处理虽能较好地保持果蔬新鲜度，但可能无法完全维持果蔬色泽、香气等感官特性，限制了其在部分果蔬保鲜中的应用[10]。

2 光处理对果蔬的保鲜机制

2.1 抑制微生物生长

特定波长的光辐照（如405、460 nm的LED）能有效抑制并杀灭沙门氏菌、大肠杆菌、李斯特菌等多种食源性病原体，显著减少果蔬表面微生物数量，降低其对果蔬的腐败作用，还可削弱微生物的环境压力抗性。蓝光等光辐照可通过调节水果的抗氧化系统间接抑制微生物生长。UVC辐照能产生多种活性物质，改变微生物蛋白质结构并阻断脱氧核糖核酸（DNA）和核糖核酸（RNA）的正常功能，最终导致微生物死亡。PL则可结合紫外线的DNA损伤作用与可见光、红外线的热效应，破坏微生物细胞结构并使其失活，从而有效抑制微生物的生长[11-12]。

2.2 调节生理过程

LED光处理（尤其是440~450 nm的蓝光）能

有效延缓果实成熟与衰老进程，减少乙烯生成并提升果蔬的抗氧化能力，同时抑制多种水果表面的真菌生长；红光能降低组织的呼吸速率，减少细胞内糖类和有机物的消耗，从而减缓果实的代谢衰老和失水过程，最终表现为降低葡萄的失重率、延长保鲜期；蓝光主要被植物体内的隐花色素和向光素感知，其核心作用是控制植物的形态、引导运动，并激发次生代谢，能有效促进樱桃花青素、草莓花青素等抗氧化物质的积累，不仅使果实颜色更加艳丽，还可显著提升其营养价值；绿光通过调节光合作用等生理过程增加西蓝花营养成分；复合光（如白-蓝光）可综合调控生理活动，延长货架期并提升营养价值。此外，UVC、UVB 等 UV 光处理能调节果蔬色素含量，通过影响色素合成与分解相关酶的酶活性及基因表达，延缓果蔬的叶绿素降解，实现对果蔬采后保鲜的调控[13-14]。

2.3 影响营养成分合成与积累

不同波长的光对植物体内生物活性化合物的合成具有调控作用。例如，红-蓝光组合可促进果蔬中总多酚、花青素和类黄酮等生物活性物质的积累，其中红光对花青素合成的影响较大，蓝光则在激活酚类化合物合成的代谢途径中发挥重要作用。光处理还能调节果蔬中维生素 C、类胡萝卜素、总酚等营养成分的含量，实现果蔬营养品质的优化。此外，红色 LED 有助于维持果蔬组织水分、减少水分过快蒸发，既能提升果蔬的外观品质与市场接受度，也有利于维持营养成分的稳定性[15-16]。

2.4 诱导植物防御反应

红光、蓝光和绿光等特定波长的光可诱导植物防御相关基因的表达，促使其合成白藜芦醇等植保素类物质，增强果蔬对病害的抵抗力，减少因病害导致的采后损失。如葡萄叶片经 LED 光处理后，对灰葡萄孢菌的侵染具有抑制作用，同时伴随防御相关基因的差异表达与植保素类物质的积累，显著提升了葡萄在采后贮藏中的抗病能力[17-18]。

3 果蔬采后贮藏采用的光源

目前果蔬采后贮藏中使用的光源主要包括 LED、UV、FL 和 PL，见图 1。这些光源通过抑制微生物生长、减缓果蔬采后有机物的分解、维持果蔬采后品质、延长货架期，从而提升果蔬保鲜效果。

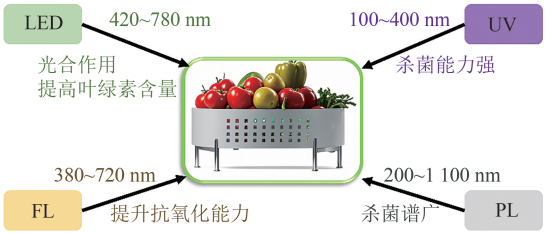


图 1 果蔬采后贮藏采用的光源

Fig. 1 Light sources used for postharvest storage of fruits and vegetables

3.1 LED

LED 是一种固态发光器件，波长范围为 420~780 nm，涵盖红、橙、黄、绿、蓝、紫 6 种光色。相较于传统光源，LED 具有光质纯净、节能环保、安全系数高等优势。红光（660 nm）和蓝光（420~450 nm）是最常用的 LED 光色，两者能显著提高果蔬中叶绿素含量，对光合作用至关重要。LED 光源既可单独以单色光形式使用，也可组合为复合光，以满足不同果蔬的保鲜需求。在果蔬保鲜领域，LED 通过维持果蔬感官品质、抑制微生物生长，可有效延长其货架期，为果蔬保鲜技术提供了创新解决方案。如红-蓝光组合的 LED 处理可显著延缓叶绿素和维生素 C 的降解，提升保鲜效果[19-20]。

3.2 UV

UV 是波长范围为 100~400 nm 的电磁波，属于电磁波谱的非电离区域，可细分为 UVA（315~400 nm）、UVB（280~315 nm）、UVC（200~280 nm）和 UVD（10~200 nm）。UV 是太阳光线的组成部分，其中 UVC 杀菌效果极强，能有效破坏微生物细胞结构，对细菌、真菌、藻类、病毒等多种类型的微生物均具有致死作用，因此在表面净化、空气消毒等领域得到广泛应用[21]。在食品工业中，UV 作为一种非热杀菌手段，被广泛应用于果汁、牛奶等液体食品的杀菌处理，同时在延长果蔬采后货架期方面也发挥着重要作用，为食品保鲜与安全保障提供了极具价值的技术途径[22]。

3.3 FL

FL 是一种低压低汞阴极放电灯具，灯管内壁涂覆荧光材料，内部充有汞与惰性气体。当气体电离放电时，会产生 UV，荧光材料将其转化为可

见光。在果蔬采后保鲜中，FL处理可提升西蓝花的抗氧化能力，增加总酚与维生素C含量，有助于维持果蔬品质。然而，FL存在易破碎、难以精准控制光质与光照强度等问题，且光照强度过高或过低均可能对果蔬组织造成损伤。近年来，FL逐渐被LED等新兴技术替代，原因在于LED具有更高的能效、更长的使用寿命及更好的安全性[23]。

3.4 PL

PL是一种前沿的非热杀菌技术，其工作原理是借助填充惰性气体（如氩、氪、氙等）的闪光灯管产生电击，并将其转化为辐射脉冲。其光谱特征与太阳光相似，波长为200~1 100 nm，涵盖UV、可见光及红外线等波段，且脉冲持续时间不超过2 ms。PL能在极短时间内将高压电脉冲作用于食品，在不影响食品品质的前提下，有效减少食品中的害虫数量、抑制腐败微生物滋生并杀灭各类病原体，因此极具潜力成为传统消毒与保鲜手段的替代方案[24-25]。

综上，不同光源在果蔬采后贮藏中各有优劣。LED能效高、寿命长、波长可调，兼具节能环保和安全性高的优点，但初期投入成本较高；UV杀菌能力强，可有效延长货架期，但可能会影响果蔬的营养成分；FL光谱范围广，但存在易碎、调控难度大、能效低等问题，目前正逐渐被LED替代；PL光谱覆盖广、脉冲持续时间短、热效应影响小，具有良好的替代潜力，但仍需开展更多研究验证其在不同果蔬中的保鲜效果，并进一步降低应用成本。在实际应用中，需结合具体的保鲜需求与成本效益综合选择适宜的光源。

4 不同光源在果蔬采后保鲜中的应用

4.1 抑制微生物生长

405 nm LED在4 ℃低温条件下，对单核细胞增生李斯特菌、大肠杆菌O157：H7、沙门氏菌等多种微生物具有显著抑制与杀灭效果。在鲜切芒果和木瓜试验中，经405 nm LED照射后，有害微生物数量显著降低，有效延长了果蔬保质期并提升了食用安全性[26]。460 nm LED在不同温度与辐照强度下均表现出抗菌活性，在鲜切菠萝和橙汁的测试中，可有效减少大肠杆菌、沙门氏菌等有害菌数量，提升食品卫生质量。其抗菌机制包括光动力灭活（PDI）及对微生物细胞结构与代谢过程的影响。405、433、460 nm等蓝光波长的LED能通过PDI抑制细菌活性，已在牛奶、苹果汁等食品中得到验证[27-29]。此外，460~470 nm波长的LED还能损伤微生物的RNA、肽聚糖合成系统和蛋白质等，破坏细胞膜与细胞质成分，从而达到杀菌目的[30]。

UV具有强效杀菌能力，尤其在254 nm处的微生物灭活效果最佳。其杀菌机制是通过产生活性物质（如过氧化氢、单线态氧、羟自由基）改变蛋白质结构并使其失活，同时UV可被微生物细胞核中的DNA和RNA吸收，阻断其正常功能，最终导致微生物死亡。在果蔬采后保鲜中，UV可杀死细菌、真菌、藻类和病毒，从而延长果蔬货架期。如UVC处理可抑制草莓微生物生长，维持菠菜采后品质[31-32]。除LED外，PL也被广泛应用于果蔬表面杀菌，其通过形成胸腺嘧啶二聚体损伤微生物DNA，或借助光热、光物理效应破坏细菌细胞膜，从而实现杀菌效果。但使用PL时需控制强度范围，以避免对果蔬外观造成损伤[33]。

不同光源在果蔬采后贮藏中抑制微生物生长的应用见表1。在果蔬采后贮藏领域，LED、UV和PL等多种光源已被用于抑制微生物生长，充分展现了非热杀菌技术在延长果蔬保质期、提升食用安全性方面的巨大潜力。这些研究为食品保鲜提

表1 不同光源在果蔬采后贮藏中抑制微生物生长的应用

Table 1 Application of different light sources in inhibiting the growth of microorganisms of fruits and vegetables during postharvest storage

光源	果蔬	贮藏温度/℃	贮藏时间/d	结果	参考文献
UVB	柠檬	25	30	UVB处理可控制约60%的青霉病发病率，但UVB需至少180 min照射才能完全抑制真菌生长	[34]
PL	草莓	6	8	可显著降低霉病发生率	[33]
UVC	草莓	5	12	在第9天和第12天，草莓灰霉病菌的菌斑直径分别比对照组减小了36.1%和24.2%	[31]
蓝色LED	柑橘	20	8	抑制指状青霉生长	[35]
PL	杏子	0	60	PL处理的杏子表皮细菌、真菌几乎全部消失	[36]

供了新思路，减少了化学防腐剂的使用，同时为食品质量管控提供了理论依据。研究人员通过可控试验模拟实际贮藏环境，获取了精准数据，然而，从实验室研究到实际应用，仍需进一步验证这些技术的效果稳定性与场景适用性，确保其在实际场景中可满足果蔬保鲜的产业需求，实现技术的有效转化。

4.2 调节生理过程

不同波长的光源对果蔬采后生理过程具有显著的调节作用。LED光源中，红光可降低葡萄失重率、抑制叶绿素降解、促进维生素C合成，对小白菜的采后保鲜效果显著[37]；蓝光能促进樱桃花青素积累，提高草莓营养价值，还可诱导桃子果实成熟[38-39]；绿光可增加西蓝花叶绿素与维生素C含量，延长货架期[40]；白-蓝光等复合光能延长西蓝花货架期，并促进糖积累[41]。UV光源方面，UVC可改变番茄颜色、调节色素含量，同时激活苯丙烷途径，诱导酚类物质积累[38]；UVB能延缓西蓝花叶绿素降解，抑制相关基因表达，且对微生物生长具有抑制作用[37]。PL处理可维持鲜切草莓与蓝莓的硬度、降低失重率、维持果蔬品质[42]。FL处理虽能在一定程度上提高西蓝花的抗氧化能力，但整体作用相对较弱[43]。

此外，不同光源对果实成熟与衰老的调控各具特色。红光可推迟西蓝花采后乙烯释放高峰，蓝光能促进桃果实乙烯生成，白光可提高小白菜抗氧化酶活性。LED处理还能增强多种蔬菜在贮藏期间的抗氧化活性，进而延缓果蔬的采后衰老进程。UV辐照对蓝莓成熟有促进作用，而UVC辐照可延缓番茄果实成熟，且效果与光强度相关。蓝光处理能延缓西红柿软化，减慢其成熟进程，同时减少果实表面真菌生长，间接延缓果实衰老。

不同光源在果蔬采后贮藏中调节生理过程的应用见表2。研究者通过精准控制光照条件并实时监测果蔬生理变化，发现不同波长的光源会显著影响果蔬的失重率、叶绿素降解、维生素C合成和花青素积累。该研究揭示了光照与果蔬生理过程的直接关联，既为光照保鲜技术提供了科学依据，也为特定果蔬品种的保鲜实践提供了针对性解决方案，具有重要的理论与实践意义。

表2 不同光源在果蔬采后贮藏中调节生理过程的应用

Table 2 Application of different light sources in regulating physiological processes of fruits and vegetables during postharvest storage

光源	果蔬	贮藏温度/℃	贮藏时间/d	结果	参考文献
FL	西蓝花	7	10	FL使西蓝花抗氧化能力较黑暗条件提高了6%~31%，总酚水平显著提高，维生素C水平较黑暗条件提高了12%~21%	[43]
蓝光 LED	桃果实	10	15	促进软化	[44-45]
PL	番茄	5	18	番茄的番茄红素和总酚含量分别增加了约20 mg/kg和10 mg/kg，而维生素C含量显著降低	[45]
红光 LED	油菜	20	5	延缓油菜的衰老	[46]
远红外光 LED	油菜	20	5	促进油菜的衰老	[46]
UVC	梨	24	10	UVC照射提高了抗氧化酶活性及多酚和黄酮类物质含量	[47]

4.3 影响果蔬营养成分合成与积累

不同光源对果蔬营养成分的合成与积累具有显著影响，这一结论已在多项研究中得到验证。LED光源凭借其可调节光谱的特性，成为该领域的研究热点。蓝光在调节草莓采后抗氧化系统、促进樱桃花青素积累方面表现突出，有助于提高果蔬营养价值[44,48]；红光能促进小白菜中维生素C的合成，以及番茄中番茄红素、β-胡萝卜素等营养成分的积累；绿光可促进西蓝花营养成分合成，增加其叶绿素、维生素C和可溶性蛋白含量[40]；白-蓝光等复合光则有利于西蓝花中糖类、类胡萝卜素和维生素C等营养成分的合成与积累[41]。

除LED光源外，UV光源在果蔬营养成分的合成中也发挥着重要作用。UVC处理能激活苯丙烷途径，促进酚类物质积累，对菠菜、草莓、梨等果蔬的营养成分维持具有积极作用[32,49]；UVB有助于保持西蓝花中叶绿素含量，延缓其降解与变黄进程[50]。PL作为一种新兴的光处理技术，在果蔬

营养成分合成中展现出巨大潜力。PL处理采后西红柿可增加番茄红素和总酚含量，处理苹果则可使总黄酮含量达到峰值，同时维持维生素C含量至少2周。这些结果表明，PL对果蔬中多种营养成分的合成与积累具有积极影响[42,51]。相比之下，FL在促进果蔬营养成分合成方面的作用相对较弱，但仍能在一定程度上提高部分果蔬的营养成分含量，如促进苹果中花青素的积累。

不同光源对果蔬采后贮藏中营养成分合成与积累的影响见表3。特定波长的光源对果蔬营养成分（如花青素、维生素C和番茄红素等）的合成与积累影响显著。光照在果蔬营养成分合成中占据关键地位，但不同研究结果存在差异，这与果蔬种类、光源参数（波长、强度）及贮藏条件（温度、湿度等）等密切相关。如LED红-蓝光组合可延缓叶绿素和维生素C的降解，且不同果蔬存在最佳光处理方案。此外，光照技术虽能有效延长果蔬保鲜期，但其保鲜机理尚不明确，实际应用中需结合果蔬具体品种和贮藏要求进行针对性调控。

表3 不同光源对果蔬采后贮藏中营养成分合成与积累的影响

Table 3 Effects of different light sources on the synthesis and accumulation of nutritional components in fruits and vegetables during postharvest storage

光源	果蔬	贮藏温度/℃	贮藏时间/d	结果	参考文献
PL	鲜切西红柿	5	18	维持抗氧化能力	[42]
UV	甜橙	20	6	提高甜橙中可溶性糖、有机酸含量	[51]
绿光LED	西蓝花	4.0±0.5	20	绿光LED提高了西蓝花中叶绿素、维生素C和可溶性蛋白含量	[40]
红光LED	小白菜	24	1	抑制叶绿素降解和衰老相关基因的表达，促进维生素C生物合成基因的表达，且每天照射8 h对延缓叶片衰老效果最佳	[46]
PL	西蓝花	20	4	延缓了西蓝花叶绿体的变化和*BoSAG12*基因的诱导表达	[52]
UVC	樱桃	25	6	提高樱桃中总酚和类黄酮含量	[53]

5 展望

光处理技术在果蔬保鲜中潜力巨大，既能保持果蔬的组织结构与营养水平，维持绿叶蔬菜的色泽和叶绿素含量，提高植物营养素水平、增强营养价值；又能调控果蔬成熟和衰老进程，延缓成熟速度，延长保鲜期与货架期。作为绿色环保的保鲜技术，光处理技术比化学保鲜剂更具环保优势，契合市场对无添加食品的需求。它还可与冷链物流结合，保障果蔬贮藏品质，同时诱导植物防御反应，增强抗病害能力，降低采后损失。在控制微生物生长方面，光处理技术可通过光动力灭活等机制，有效抑制采后腐败微生物生长，保障贮藏安全。此外，光处理技术能调控维生素C、类胡萝卜素和总酚等营养成分合成，从而进一步提高果蔬营养价值。综上，光处理技术可减少微生物污染、延缓衰老、提升采后品质，为果蔬产业可持续发展提供了新方向。

光处理技术虽在果蔬保鲜领域展现出应用潜力，但也面临诸多挑战。其保鲜效果受光照强度、处理时间和果蔬品种等因素影响，需精准把控光剂量与时间，否则易导致光损伤或保鲜效果不佳。如UV虽杀菌效果突出，却可能损伤果蔬品质。在安全性方面，业界对光处理技术长期应用的潜在影响尚未达成共识。LED和PL属于非电离辐射，通常认为对人体无害，但长期照射是否会促使果蔬生成有害物质或改变其营养成分，仍需进一步研究。从效益角度来看，光处理技术设备投入和运行成本较高，对小型种植户和保鲜企业而言负担较重，且设备寿命与维修情况也会直接影响整体成本效益。此外，消费者对光处理技术的认知度较低，也限制了该技术的推广应用，需加强相关科普宣传。

尽管面临上述挑战，但随着科技的进步与创新，光处理技术在果蔬采后贮藏领域的应用前景依然广阔。未来，该技术将通过智能化设备应用、光参数优化、与其他保鲜技术协同应用实现技术升级；同时将针对不同果蔬品种开展个性化研究，开发专属保鲜方案，并通过地区差异化推广与专业人才培养推动技术落地。此外，与电商、冷链物流的深度合作，将进一步拓展光处理技术的应用场景，提升果蔬供应链的整体保鲜效果，减少流通

损耗，助力产业进步。这些发展方向将推动光处理技术在满足市场需求的同时，实现果蔬采后保鲜的高效与可持续发展。

参考文献

[1] PALMER B F，CLEGG D J. Cardiovascular benefits of a diet enriched in fruits and vegetables[J]. American Journal of Nephrology，2019，49(6)：435-437.

[2] ALI S，NAWAZ A，EJAZ S，et al. Effects of hydrogen sulfide on postharvest physiology of fruits and vegetables：an overview[J]. Scientia Horticulturae，2019，243：290-299.

[3] 张憨，冯彦君. 果蔬生物保鲜新技术及其研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(5)：449-455.
ZHANG M，FENG Y J. New bio-preservation technology of fruits & vegetables and its research progress[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2017，36(5)：449-455.(in Chinese)

[4] 任洁，李晓雪，郑璞帆，等. 鲜食葡萄采后保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工，2024，24(12)：148-156.
REN J，LI X X，ZHENG P F，et al. Research process on post-harvest preservation technology of table grapes[J]. Storage and Process，2024，24(12)：148-156.(in Chinese)

[5] 荣培秀，何晓琴，王金秋，等. 植物精油的功能特性及在果蔬保鲜中的应用[J]. 食品与机械，2022，38(5)：226-233，240.
RONG P X，HE X Q，WANG J Q，et al. Research progress on functional properties of plant essential oils and their applications in fresh keeping of fruits and vegetables[J]. Food and Machinery，2022，38(5)：226-233，240.(in Chinese)

[6] CHEN Y，XING M Y，CHEN T，et al. Effects and mechanisms of plant bioactive compounds in preventing fungal spoilage and mycotoxin contamination in postharvest fruits：a review[J]. Food Chemistry，2023，415：135787.

[7] 张乐乐，刘紫薇，任雨洁，等. 机械损伤对果蔬采后品质的影响及其控制方法[J]. 食品研究与开发，2024，45(11)：195-201.
ZHANG L L，LIU Z W，REN Y J，et al. Effect and control methods of mechanical damage on postharvest quality of fruits and vegetables[J]. Food Research and Development，2024，45(11)：195-201.(in Chinese)

[8] 付越. 果蔬食品过冷态储存技术研究进展[J]. 食品安全导刊，2021(16)：21.
FU Y. Research Progress on supercooled storage technology of fruits and vegetables[J]. China Food Safety Magazine，2021(16)：21.(in Chinese)

[9] LIU D K，XU C C，GUO C X，et al. Sub-zero temperature preservation of fruits and vegetables：a review[J]. Journal of Food Engineering，2020，275：109881.

[10] 朱嘉琳，张惠敏，王慧颖，等. 高压静电场技术在果蔬保鲜方面的应用综述[J]. 安徽农学通报，2024，30(17)：93-95.
ZHU J L，ZHANG H M，WANG H Y，et al. A review of the application of high-voltage electrostatic field technology in fruit and vegetable preservation[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin，2024，30(17)：93-95.(in Chinese)

[11] SRIMAGAL A，RAMESH T，SAHU J K. Effect of light emitting diode treatment on inactivation of *Escherichia coli* in milk[J]. LWT-Food Science and Technology，2016，71：378-385.

[12] TAULAVUORI E，TAULAVUORI K，HOLOPAINEN J K，et al. Targeted use of LEDs in improvement of production efficiency through phytochemical enrichment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2017，97(15)：5059-5064.

[13] LIU Y，SCHOUTEN R E，TIKUNOV Y，et al. Blue light increases anthocyanin content and delays fruit ripening in purple pepper fruit[J]. Postharvest Biology and Technology，2022，192：112024.

[14] 张雨宸，谢晶. LED光照灭菌技术在果蔬保鲜加工中的应用及其研究[J]. 食品与机械，2019，35(8)：155-160.
ZHANG Y C，XIE J. Application and research progress of LED light sterilization technology in fresh-keeping processing of fruit and vegetables[J]. Food & Machinery，2019，35(8)：155-160.(in Chinese)

[15] RUFYIKIRI A S，ADDO P W，WU B S，et al. The use of LEDs for the stomatal response，light compensation points，and storage of spinach and kale[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B：Biology，2024，257：112959.

[16] KANG C H，YOON E K，MUTHUSAMY M，et al. Blue LED light irradiation enhances *L*-ascorbic acid content while reducing reactive oxygen species accumulation in Chinese cabbage seedlings[J]. Scientia Horticulturae，2020，261：108924.

[17] AHN S Y，KIM S A，YUN H K. Inhibition of *Botrytis cinerea* and accumulation of stilbene compounds by light-emitting diodes of grapevine leaves and differential expression of defense-related genes[J]. European Journal of Plant Pathology，2015，143(4)：753-765.

[18] LIU H K，CHEN Y Y，HU T T，et al. The influence of light-emitting diodes on the phenolic compounds and antioxidant activities in pea sprouts[J]. Journal of Functional Foods，2016，25：459-465.

[19] 廖兴展，郑利明，谢桂勉．基于LED光谱技术的果蔬保鲜方法研究[J]．轻工科技，2021，37(6)：5-7.
LIAO X Z，ZHENG L M，XIE G M．Study on fresh-keeping methods of fruits and vegetables based on LED spectrum technology[J]．Light Industry Science and Technology，2021，37(6)：5-7.(in Chinese)

[20] HYUN J E，LEE S Y．Blue light-emitting diodes as eco-friendly non-thermal technology in food preservation[J]．Trends in Food Science & Technology，2020，105：284-295.

[21] 张伟，李晓宁，林佳艺，等．一种LED紫外线消毒柜的消毒效果初步研究[J]．中国消毒学杂志，2024，41(12)：881-884.
ZHANG W，LI X N，LIN J Y，et al．Preliminary study on the disinfection effect of a LED UV disinfection cabinet[J]．Chinese Journal of Disinfection，2024，41(12)：881-884.(in Chinese)

[22] YEMMIREDDY V，ADHIKARI A，MOREIRA J．Effect of ultraviolet light treatment on microbiological safety and quality of fresh produce：an overview[J]．Frontiers in Nutrition，2022，9：871243.

[23] 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.

[24] MENGARDA BUOSI D T，DE MORAES J O，CHENG Y F，et al．Effective pulsed light treatments for inactivating *Salmonella enterica* serotypes[J]．Food Control，2022，135：108776.

[25] 冯悦，尚久舒．脉冲强光技术在果蔬储藏及微生物安全中的应用[J]．新农业，2023(10)：49-50.
FENG Y，SHANG J S．Application of pulsed intense light technology in fruit and vegetable storage and microbial safety[J]．Modern Agriculture，2023(10)：49-50.(in Chinese)

[26] KIM M J，HWA T，SUK B，et al．Antibacterial effect of 405±5 nm light emitting diode illumination against *Escherichia coli* O157：H7，*Listeria monocytogenes*，and *Salmonella* on the surface of fresh-cut mango and its influence on fruit quality[J]．International Journal of Food Microbiology，2017，244：82-89.

[27] GHATE V，KUMAR A，KIM M J，et al．Effect of 460 nm light emitting diode illumination on survival of *Salmonella* spp．on fresh-cut pineapples at different irradiances and temperatures[J]．Journal of Food Engineering，2017，196：130-138.

[28] GHATE V，KUMAR A，ZHOU W B，et al．Irradiance and temperature influence the bactericidal effect of 460-nanometer light-emitting diodes on *Salmonella* in orange juice[J]．Journal of Food Protection，2016，79(4)：553-560.

[29] GHATE V，KUMAR A，ZHOU W B，et al．Effect of organic acids on the photodynamic inactivation of selected foodborne pathogens using 461 nm LEDs[J]．Food Control，2015，57：333-340.

[30] HYUN J E，MOON S K，LEE S Y．Antibacterial activity and mechanism of 460-470 nm light-emitting diodes against pathogenic bacteria and spoilage bacteria at different temperatures[J]．Food Control，2021，123：107721.

[31] 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.

[32] LIAO C L，LIU X B，GAO A L，et al．Maintaining postharvest qualities of three leaf vegetables to enhance their shelf lives by multiple ultraviolet-C treatment[J]．LWT-Food Science and Technology，2016，73：1-5.

[33] DUARTE-MOLINA F，GÓMEZ P L，CASTRO M A，et al．Storage quality of strawberry fruit treated by pulsed light：fungal decay，water loss and mechanical properties[J]．Innovative Food Science & Emerging Technologies，2016，34：267-274.

[34] RUIZ V E，INTERDONATO R，CERIONI L，et al．Short-term UV-B exposure induces metabolic and anatomical changes in peel of harvested lemons contributing in fruit protection against green mold[J]．Journal of Photochemistry and Photobiology B：Biology，2016，159：59-65.

[35] LAFUENTE M T，ALFÉREZ F，GONZÁLEZ-CANDELAS L．Light-emitting diode blue light alters the ability of *Penicillium digitatum* to infect citrus fruits[J]．Photochemistry and Photobiology，2018，94(5)：1003-1009.

[36] HUA X W，LI T T，WU C E，et al．Novel physical treatments（pulsed light and cold plasma）improve the quality of postharvest apricots after long-distance simulated transportation[J]．Postharvest Biology and Technology，2022，194：112098.

[37] JIANG A L，ZUO J H，ZHENG Q L，et al．Red LED irradiation maintains the postharvest quality of broccoli by elevating antioxidant enzyme activity and reducing the expression of senescence-related genes[J]．Scientia Horticulturae，2019，251：73-79.

[38] KOKALJ D，ZLATIĆ E，CIGIĆ B，et al．Postharvest flavonol and anthocyanin accumulation in three apple

cultivars in response to blue-light-emitting diode light[J]. Scientia Horticulturae,2019,257:108711.

[39] KOKALJ D, ZLATIĆ E, CIGIĆ B, et al. Postharvest light-emitting diode irradiation of sweet cherries (*Prunus avium* L.) promotes accumulation of anthocyanins[J]. Postharvest Biology and Technology,2019,148:192-199.

[40] LOI M,LIUZZI V C,FANELLI F,et al. Effect of different light-emitting diode (LED) irradiation on the shelf life and phytonutrient content of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*)[J]. Food Chemistry,2019,283:206-214.

[41] HASPERUÉ J H, GUARDIANELLI L, RODONI L M, et al. Continuous white-blue LED light exposition delays postharvest senescence of broccoli [J]. LWT-Food Science and Technology,2016,65:495-502.

[42] VALDIVIA-NÁJAR C G, MARTÍN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R. Kinetics of the changes in the antioxidant potential of fresh-cut tomatoes as affected by pulsed light treatments and storage time[J]. Journal of Food Engineering,2018,237:146-153.

[43] YAO J H,CHEN W J,FAN K. Recent advances in light irradiation for improving the preservation of fruits and vegetables:a review[J]. Food Bioscience,2023,56:103206.

[44] GONG D D,CAO S F,SHENG T,et al. Effect of blue light on ethylene biosynthesis, signalling and fruit ripening in postharvest peaches[J]. Scientia Horticulturae,2015, 197:657-664.

[45] VALDIVIA-NÁJAR C G, MARTÍN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R. Impact of pulsed light treatments and storage time on the texture quality of fresh-cut tomatoes [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2018,45:29-35.

[46] SONG Y, QIU K, GAO J, et al. Molecular and physiological analyses of the effects of red and blue LED light irradiation on postharvest senescence of pak choi[J]. Postharvest Biology and Technology,2020,164:111155.

[47] SUN T R,OUYANG H,SUN P C,et al. Postharvest UV-C irradiation inhibits blackhead disease by inducing disease resistance and reducing mycotoxin production in 'Korla' fragrant pear (*Pyrus sinkiangensis*)[J]. International Journal of Food Microbiology,2022,362:109485.

[48] XU F, SHI L Y, CHEN W, et al. Effect of blue light treatment on fruit quality, antioxidant enzymes and radical-scavenging activity in strawberry fruit [J]. Scientia Horticulturae,2014,175:181-186.

[49] 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.

[50] AIAMLA-OR S, SHIGYO M, YAMAUCHI N. UV-B treatment controls chlorophyll degradation and related gene expression in broccoli (*Brassica oleracea* L. *Italica* Group) florets during storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019,243:524-527.

[51] HU L P, YANG C, ZHANG L N, et al. Effect of light-emitting diodes and ultraviolet irradiation on the soluble sugar, organic acid, and carotenoid content of postharvest sweet oranges (*Citrus sinensis* (L.) osbeck) [J]. Molecules,2019,24(19):3440.

[52] BÁRCENA A, BAHIMA J V, CASAJÚS V, et al. The degradation of chloroplast components during postharvest senescence of broccoli florets is delayed by low-intensity visible light pulses [J]. Postharvest Biology and Technology,2020,168:111249.

[53] ZHANG Q, YANG W B, LIU J C, 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.

(责任编辑:刘冬梅)