DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0476

果蔬 LED 光调保鲜研究进展

张雪玉[1],王　峥[2],孙启颖[2],何　洁[3],刘　洋[1],李清明[2],王新惠[1],许亚良[2]

(1.成都大学食品与生物工程学院　成都　610106;　2.中国农业科学院都市农业研究所•国家成都农业科技中心　成都　610213;　3.新加坡南洋理工大学　新加坡　639798)

摘　要:新鲜果蔬含有大量水分和丰富的营养物质,在运输和贮藏过程中极易腐败变质,对其商品价值产生较大影响。传统的化学保鲜方法效果显著,但存在一定的安全隐患,且在操作上较为复杂,已不能满足日益增长的市场需求。LED(发光二极管)光调技术作为一种新型的绿色果蔬保鲜贮藏技术,已经在食品业引起广泛的关注。它能有效维持果蔬商品性外观,减缓采后品质下降,可在一定程度上提高果蔬营养价值,达到减少贮藏损失、延长果蔬货架期的目的。本文综述 LED 光调技术对果蔬色泽外观、营养品质和安全品质的影响,及其从抗氧化系统物质、抗病、酶活性等方面对果蔬代谢的影响,并对 LED 光调技术的应用现状和前景进行展望,以期为果蔬保鲜技术创新及产业发展提供新思路。

关键词:LED 光;果蔬;贮藏保鲜

中图分类号:S63　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1673-2871(2025)11-001-12

Research progress on LED light modulation for preservation of fruits and vegetables

ZHANG Xueyu[1], WANG Zheng[2], SUN Qiying[2], HE Jie[3], LIU Yang[1], LI Qingming[2], WANG Xinhui[1], XU Yaliang[2]

(*1. College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, Sichuan, China; 2. Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Chengdu Agricultural Science and Technology Center, Chengdu 610213, Sichuan, China; 3. Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore*)

Abstract: Fresh fruits and vegetables contain a large amount of water and rich nutrients, which are prone to spoilage during transportation and storage, greatly affecting their commercial value. The traditional chemical preservation methods have significant effects, but there are certain safety hazards, and its operation is relatively complex, and thus can no longer meet the growing market demand. LED(light emitting diode)dimming technology, as a new type of green fruit and vegetable preservation and storage technology, has attracted widespread attention in the food industry. It can effectively maintain the commercial appearance of fruits and vegetables, slow down the decline in post harvest quality, improve the nutritional value of fruits and vegetables to a certain extent, and achieve the goal of reducing storage losses and extending the shelf life of fruits and vegetables. This article reviews the impact of LED light modulation technology on the color, appearance, and nutritional quality of fruits and vegetables, as well as its effects on fruit and vegetable metabolism from monitoring the levels of antioxidant system, disease resistance, and enzyme activity. It also looks forward to the current application status and prospects of LED light modulation technology, in order to provide new ideas for innovation in fruit and vegetable preservation technology and industrial development.

Key words: LED light; Fruit and vegetable; Storage and preservation

收稿日期:2025-07-01;**修回日期:**2025-08-29

基金项目:四川省科技厅项目(2023ZYD0272,2024JDHJ0030,2024YFHZ0252,2024NSFSC0397);成都农业科技中心地方财政专项资金项目(NASC2022KR01,NASC2023ST06,NASCKR03,NASC2024KY36);中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-CAAS,34-IUA-03);中国农业科学院都市农业研究所青年创新专项(S2024003)

作者简介:张雪玉,女,在读硕士研究生,研究方向为果蔬 LED 保鲜。E-mail:1902227178@qq.com

通信作者:王新惠,女,教授,研究方向为食品加工、食品安全与控制及应用微生物。E-mail:wangxinhui19820319@163.com

许亚良,男,副研究员,研究方向为设施园艺光生物学。E-mail:xuyaliang@caas.cn

水果和蔬菜富含多种营养物质，如维生素、矿物质、植物化学物质和膳食纤维，是人们日常饮食中不可或缺的一部分，在维持健康方面发挥着关键作用[1]。果蔬收获后，伴随呼吸作用的进行及贮运、加工等过程，其外观形态不断发生变化且容易腐烂变质，失去果蔬的原有价值，商品性能逐渐下降。据统计，全球果蔬采后的损耗率居高不下，高达40%，其中发展中国家的损耗率更高[2]。因此对采后的果蔬开展保鲜处理是极其必要的，从而延长运输和贮藏时间，维持果蔬的外观和营养品质，减小果蔬在运输和贮藏期间因品质劣化造成的经济损失。

目前果蔬保鲜技术主要分为物理保鲜、化学保鲜和微生物保鲜。物理保鲜技术包括低温冷藏、气调贮藏和辐照保鲜等；化学保鲜有保鲜剂保鲜和涂膜保鲜；生物保鲜则是拮抗保鲜技术[3]。低温冷藏是通过降低温度来抑制果蔬呼吸作用和表面微生物活动，但温度过低会导致果蔬发生冷害现象，此外，温度波动也会加速腐烂[4]。气调贮藏、辐照保鲜等技术在保鲜方面效果显著，但技术优势和保鲜成本之间存在矛盾冲突，令一些中小企业和农户难以承担。果蔬品质与安全随着经济的发展越来越受重视，消费者对化学涂膜保鲜技术在果蔬上化学残留的担忧限制了其推广与应用。生物保鲜方法是从动植物体内提取的天然物质来抑制果蔬表面的腐败微生物生长，是一种天然健康的新型保鲜技术，大规模的生产成本较高和某些生物活性物质容易失活，目前仍处于探索阶段[5]。因此，为了降低果蔬损耗，选择一种安全无污染且令消费者接受的果蔬贮藏方法至关重要。近年来，发光二极管（LED）光调技术已被证实是一种果蔬采后贮藏保鲜的有效手段，可以在延长果蔬货架期的同时维持果蔬新鲜的品质[6]。与传统的化学试剂保鲜方法相比，LED 光调技术作为一种新型的物理保鲜方法，具有操作简单、成本低廉、环境友好等特点，并随着技术的发展和不断优化，未来在食品保鲜领域具有广阔的应用空间。

LED 光调控主要包括光质、光强、光周期等调控方式，因此笔者将围绕以上措施对果蔬色泽外观、营养品质、抗病性的影响，及其从抗氧化系统物质、抑菌、酶活性等方面对果蔬代谢的影响进行阐述，并对 LED 光调技术的应用现状和前景进行了展望，以期为果蔬保鲜技术创新及产业发展提供新思路。

1 LED 光调技术对果蔬外观性能的影响

果蔬的外观商品性能以颜色和硬度等物理特征为主，是判断其品质与成熟度的重要感官指标，直接影响消费者选择和购买决策。果蔬在采后衰老及成熟过程中外观颜色变化，主要与叶绿素、花青素和类胡萝卜素等色素物质密切相关。光是调控植物色素物质形成的重要环境信号因子，借助 LED 精准构建果蔬贮藏光照环境，可以对相关色素合成代谢通路进行调控[7]。光是叶绿素合成的必要条件，其中光质对叶绿素含量的调控影响显著。Lee 等[8]采用 LED 白光、绿光、蓝光和红光等光质照射卷心菜 18 d，发现仅有白光和绿光能使卷心菜的叶绿素含量提升，且二者对野生芝麻菜的叶绿素含量也有一定的提升效果[9]。甜椒经 LED 红光和蓝光照射处理后的叶绿素含量得到了维持[10]；绿芦笋尖经 LED 绿光、蓝光和红光处理后，叶绿素 a 和叶绿素 b 含量也有一定程度的提升[11]。除 LED 单色光外，组合光（白蓝光）照射也可以维持西蓝花叶绿素含量，延缓其降解[12-14]。但是 Liu 等[15]研究发现，经过红光和蓝光照射却降低了辣椒品种 Xinxiang-2 和 P1622 的叶绿素含量，与上述的研究结果相反。光强主要是通过剂量效应影响叶绿素合成。Zhou 等[16]采用低强度光（10 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）的 LED 白光照射，保持了小白菜较高的叶绿素和维生素 C 含量。虽然 LED 光调技术能够在一定程度上保持新鲜果蔬色泽，但高剂量长时间照射也可能使一些天然色素成分降解[12]。

蔬菜的叶子黄化主要是叶绿素降解导致的表型现象[17]。叶绿素降解过程需要叶绿素酶（chlorophyllase，CLH）、镁脱螯合酶（mg-dechelatase，MDCase）、脱镁叶绿素酶（pheophytinase，PPH）和叶绿素过氧化物酶（chlorophyll peroxidase，Chl-POX）等酶的参与。研究表明，LED 光照射可以通过下调小白菜叶绿素降解基因（*BrChlase1*，*BrChlase2* 和 *BrPPH*）的表达来抑制叶绿素降解[16, 18]。LED 红蓝光处理菜心，相比于黑暗对照组，处理组菜心叶绿素降解相关酶（CLH、PPH、Chl-POX）的活性受到抑制，延缓了叶绿素降解[19]。

果实硬度也是果蔬的主要商品外观特性之一。果蔬采后伴随着呼吸作用而逐渐软化，但软化速度过快会导致货架期缩短，同时更易受到病原菌侵染，LED 光调技术对其也具有一定的调控作用。

番茄成熟后果实软化造成感官品质下降，但经过3种不同LED光（红光、白蓝光、紫外光）处理后，番茄硬度得到了保持[20]。不同光质对蓝莓果实品质的影响不同，其中蓝光增强蓝莓硬度的效果最好，有利于延长蓝莓的货架期[21]。采后蓝光照射也能提高草莓硬度，主要通过调控细胞壁降解酶的活性，降低了原果胶（PP）、纤维素（CEL）和半纤维素（HCEL）的降解速率，从而保持了细胞壁的结构完整性[22]。

2　LED光调技术对果蔬采后品质的影响

果蔬在收获贮藏期间仍在经历一系列的生理生化过程，会让果蔬加快衰老和品质劣变，包括呼吸代谢、失水软化、色素降解及营养成分的变化等，均对果蔬品质造成一定的影响[23]。因此采后贮藏保鲜的首要目的是延缓衰老，并在贮藏期间保持果蔬的品质，提高或维持有益化合物含量。光照对植物代谢产物的产生具有较大影响[24]，现有大量研究表明，LED光调技术可以有效改善果蔬品质，延缓叶绿素降解，提高目标营养物质的含量，然而不同LED波长的作用效应及不同果蔬品种的生理响应存在差异。

2.1　糖类

果蔬中的糖类主要是可溶性固形物中的可溶性糖，它是能溶于水和乙醇类的糖类物质。大量研究表明，LED单色光和复合光照射，对果蔬采后糖类代谢均有显著的调控作用，通过维持或提升糖类物质的含量，提高采后贮藏品质和经济价值。食叶类蔬菜本身糖含量较低，因此消费者对其甜度基本不作要求，其研究相对较少。不同光质对蔬菜的糖类含量均有调控作用，LED蓝光可提高生菜的总可溶性糖含量[25]；白光和红光能提高紫色羽衣甘蓝的总可溶性糖含量[26]。Hasperué等[14]用低强度20 μmol·m^{-2}·s^{-1} LED白蓝复合光持续照射西蓝花，在22 ℃时，只有葡萄糖、果糖和蔗糖含量增加，但在5 ℃时，白蓝复合光促进了总糖的积累。

消费者对水果的甜度要求相对要高，因此在水果方面的研究较多，主要集中在光质方面。LED绿光和蓝光在草莓贮藏期间都能使其总糖含量增高[27-28]。Feng等[29]采用LED红蓝复合光（红∶蓝=3∶1）处理“木瓜”杏时，发现红蓝光组合能使杏中的葡萄糖含量降低，果糖含量得到保持，并同时提高山梨醇含量。蓝、绿、红色LED均可减缓蓝莓果实采后贮藏期间可溶性固形物含量的大幅度下降[30]，此外，经LED光照射处理后的樱桃番茄[31]、香蕉[32]和桃[33]等果实中的可溶性固形物含量能够得到维持或提高，从而使果实保持一定的甜度。

当果蔬收获后，商品器官中积累的糖类物质含量主要是用于呼吸作用和其他生理活动，用以提供能量。西蓝花在LED照射时蔗糖含量升高，可能是由于LED促进与蔗糖合成相关的酶，如蔗糖磷酸合成酶（sucrose phosphate synthase，SPS）、蔗糖合成酶（sucrose synthase，SS）活性的提高[14]。另外一个原因可能是在冷藏期间由于果蔬生理活动减缓，所需能量较低，因此实现总糖含量的积累[12]。

2.2　蛋白质

果蔬中的蛋白质含量较低，但其提供的氨基酸也是人体日常膳食营养的重要组成部分[34]，LED光调技术对果蔬中的蛋白质含量也有一定的影响。Favre等[35]研究表明，白光和红光能维持西蓝花叶绿素a和可溶性蛋白含量；另外，蓝光处理也可延缓鲜切草莓中可溶性蛋白含量的下降[36]。Gao等[37]以白光为对照，探究不同光质组合（蓝白、绿白、黄白和红白光）对青葱营养物质含量的影响，发现不同光质组合对17种氨基酸含量均有显著影响，其中蓝白光显著提高了青葱中多种氨基酸含量，而绿白光和黄白光则降低了一些氨基酸含量。生菜中的总游离氨基酸含量在蓝光和红蓝光组合下最高，而红光和黄光下的总游离氨基酸含量与白光下没有显著差异，绿光则显著降低了总游离氨基酸含量[38]。辣椒中的必需氨基酸和芳香氨基酸含量经过LED白光和红光照射后也得到提升[15]。

2.3　花青素

不同波长的LED光能调控果蔬中的花青素含量，其中蓝光对花青素积累的效果最好。用光强为40 μmol·m^{-2}·s^{-1}的蓝光照射，可提高杨梅果实中总花色苷含量[39]，蓝光可以促进草莓中花青素的积累[27, 40]。LED蓝光、白光和红光处理蓝莓，只有蓝光能延缓花青素降解，而白光处理与黑暗对照组无显著差异[21]。Kokalj等[41]在LED蓝光照射处理甜樱桃时发现，甜樱桃中矢车菊素-3-芸香糖苷和矢车菊素-3-葡萄糖苷两种主要的花色苷含量分别提高了137%和246%，此外，还发现苯丙氨酸解氨酶活性与果实颜色变化相关。Arakawa等[42]在15~25 ℃下采用450 nm的蓝光进行照射处理，能使苹果产生大量的花青素，并呈现暗红色，即使在30 ℃高温下，也能产生少量的花青素。在猕猴桃中研究发现，红光能抑制一些与花青素合成有关基因的表达，而蓝

光却能促进一些花青素合成相关基因的表达[43]。

LED 调节花青苷的生物合成过程主要是通过控制花青苷合成基因的表达来实现的。蓝光照射处理后，杨梅花青素含量升高，是 LED 光上调了花青素合成相关基因（*MrMYB1*、*MrANS*、*MrF3H* 和 *MrDFR1*）的表达[39]。Kim 等[28]采用 LED 蓝光、红光和绿光在 5 ℃照射未成熟草莓，发现花青素含量较未 LED 光处理提高了 21%，且花青素含量的提高与苯基苯乙烯酮异构酶、黄烷酮 3-羟化酶和花素苷合酶等酶活性有关，这 3 种酶的基因表达均处于上调状态。LED 蓝光使草莓中的花青素含量提高，是因为光敏色素（FaPHOT2）可能在草莓果实中感应蓝光并在花青素的合成中发挥作用[44]。

2.4 类胡萝卜素

果蔬中常见的类胡萝卜素主要有 *β*-胡萝卜素、番茄红素、叶黄素和辣椒红素。类胡萝卜素既有营养价值也对外观品质产生影响，如柑橘类水果随着果实的成熟，类胡萝卜素含量提高，果皮表现出橙黄色调[45]。LED 光对类胡萝卜素含量影响的研究也主要集中在红光和蓝光。Ma 等[46]在 20 ℃用 50 μmol·m^{-2}·s^{-1} 光强的红光（660 nm）和蓝光（470 nm）处理蜜橘，发现红光能使类胡萝卜素含量提高，尤其是 *β*-隐黄素，蓝光效果不明显。在樱桃番茄中也发现，蓝光能使绿色未成熟番茄的番茄红素和 *β*-胡萝卜素含量提高[31]，但也有研究表明，单色蓝光照射使番茄红素含量的增加减缓[47]。此外，在辣椒中，红光、蓝光还能不同程度地提高辣椒红素含量[48]。经光强为 100 μmol·m^{-2}·s^{-1} 的白光照射采摘的新鲜枸杞，能保持枸杞的色泽和总类胡萝卜素水平，并上调类胡萝卜素生物合成相关基因的表达[49]。

LED 光诱导蜜橘类胡萝卜素的合成，主要是通过提高类胡萝卜素合成相关基因的表达来实现的。在红光照射下，类胡萝卜素和 *β*-隐黄素含量提高与 *CitPSY*、*CitPDS*、*CitZDS*、*CitLCYb1*、*CitLCYb2*、*CitHYb* 和 *CitZEP* 等基因的表达量增加有关，而蓝光没有显著效果[44]。王晓芬等[48]用蓝光对采后辣椒进行照射处理，发现红、绿辣椒中控制辣椒果实变红的关键基因辣椒红素-辣椒玉红素合成酶基因（*Ccs*）的表达量和辣椒红素含量与对照组（避光处理）相比均成倍增加。蓝光和红光通过诱导调节番茄红素合成途径中的关键基因，比如红光增强红光受体光敏色素（PHY）活性，诱导八氢番茄红素合酶基因（*Psy*）表达上调，蓝光则显著上调关键基因的表达量，进而提高番茄果实中的番茄红素含量[50]。不同 LED 光质处理对不同果蔬营养物质含量的影响如表 1 所示。

3 LED 光调技术对果蔬抗氧化系统的影响

果蔬的衰老主要是活性氧（ROS）作用的结果，活性氧会引起植物细胞脂质和蛋白质的氧化损伤，因此控制 ROS 的产生是果蔬采后贮藏保鲜的重要途径[55]。果蔬的抗氧化主要是由抗氧化物质和抗氧化酶共同发挥作用的。果蔬体内含有维生素 C、多酚和类胡萝卜素等天然抗氧化剂，不仅作为人体营养的重要来源，同时与抗氧化酶共同作用来抑制果蔬贮存过程中 ROS 的积累。LED 光调技术能使果蔬中抗氧化成分发生不同变化，进而实现抗氧化能力和营养价值的提升。

3.1 维生素 C

维生素 C 是人体必需的营养物质，具有提高免疫力和治疗坏血病等作用[56]。LED 辐照能够有效改善果蔬中的维生素 C 代谢，甚至可提高维生素 C 含量。研究表明，LED 红光、蓝光和白光处理不同品种的辣椒，与对照组（黑暗）相比，白光会提高 Hangjiao-2 的维生素 C 含量，红光没有影响，而蓝光却使 3 个品种中的维生素 C 含量都下降[15]。Kim 等[28]用不同波长的光对未成熟草莓进行处理，发现红光处理降低了草莓的维生素 C 和可溶性蛋白的流失速度。此外，蔚磊等[34]采用蓝光处理鲜切草莓，发现蓝光也能有效延缓草莓中维生素 C 含量的下降。除了单色光外，复合 LED 光质对维生素 C 含量提升也有一定的效果，王美霞等[57]采用光强为 20 μmol·m^{-2}·s^{-1} 的 LED 红蓝复合光照射西蓝花，发现维生素 C 含量为对照组（黑暗）的 1.28 倍。此外，光照时间与圣女果品质也密切相关，光照 4 h+不光照 20 h 组合比光照 10 min+不光照 50 min 组合和不使用光照技术的对照组能更有效提升和维持其果实维生素 C 含量[58]。

维生素 C 合成的主要途径是 *L*-半乳糖途径，另外包括古洛糖途径、肌醇途径和半乳糖糖醛酸途径等 4 条植物体内公认的合成途径。用 LED 红蓝光照射生菜，发现连续光照及其光环境条件可不同程度地在酶活性和基因表达层面调控维生素 C 代谢的多个途径，从而调节生菜中的维生素 C 含量[59]。在西蓝花中，LED 光照可能通过影响维生素 C 生物合成相关基因（*BO-VTC2*、*BO-GLDH*）和再生相关基

表 1　LED 光质处理对不同果蔬中营养物质含量的影响

Table 1　Effects of LED light quality treatment on nutrient content in different fruits and vegetables

光质 Light quality	种类 Variety	光照参数 Light parameters	试验条件 Experimental conditions	主要结果 Main results	参考文献 Reference
白蓝光 White blue light	西蓝花 Broccoli	连续照明，20 μmol·m^{-2}·s^{-1}，42 d Continuous lighting, 20 μmol·m^{-2}·s^{-1},42 d	5 ℃/22 ℃，（68±1）% RH	维持了较高的叶绿素/类胡萝卜素含量，22 ℃时葡萄糖、果糖和蔗糖含量增加，但在 5 ℃，促进了所有糖的含量积累 Maintaining high content of chlorophyll and carotenoid, glucose, fructose, and sucrose increased at 22 ℃, but promoted the accumulation of all sugar at 5 ℃	[14]
绿光 Green light	西蓝花 Broccoli	连续照明，24 μmol·m^{-2}·s^{-1} Continuous lighting, 24 μmol·m^{-2}·s^{-1}	（4±0.5）℃，（68±2）% RH	绿光增加了西蓝花的叶绿素含量 Green light increases the chlorophyll content of broccoli	[12]
红光 Red light	西蓝花 Broccoli	光照强度（100±5）lx Light intensity （100 ± 5）lx	5 ℃，RH＞95%	单色红光能够抑制西蓝花黄化，延缓叶绿素降解 Monochromatic red light can inhibit broccoli yellowing and delay chlorophyll degradation	[13]
白光、红光 White light, red light	西蓝花 Broccoli	2 h·d^{-1}，20~25 μmol·m^{-2}·s^{-1}，4 d	20 ℃	白光和红光处理降低了叶绿素 a 和蛋白质的降解 White and red light treatments reduced the degradation of chlorophyll a and proteins	[34]
白光、绿光 White light, green light	野生芝麻菜 Wild rocket	连续照明，（35±2.5）μmol·m^{-2}·s^{-1} Continuous lighting, （35±2.5）μmol·m^{-2}·s^{-1}	5 ℃，95% RH	绿光和白光能够抑制野生芝麻菜的叶绿素降解 Green and white light can inhibit chlorophyll degradation in wild arugula	[9]
红光 Red light	鲜切甜椒 Fresh cut pepper	8 h·d^{-1}，150 μmol·m^{-2}·s^{-1}	7 ℃，85% RH	促进鲜切甜椒中 β-胡萝卜素、番茄红素的合成，并保持叶绿素较高的含量 Promote the synthesis of β - carotene and lycopene in fresh cut sweet peppers, while main taining a high content of chlorophyll	[10]
蓝光 Blue light	鲜切甜椒 Fresh cut pepper	8 h·d^{-1}，100 μmol·m^{-2}·s^{-1}	7 ℃，85% RH	蓝光照射下的鲜切甜椒能保持番茄红素和叶绿素含量 The lycopene and chlorophyll content that fresh cut sweet peppers can maintain under blue light irradiation	[10]
红光 Red light	小白菜 Pakchoi	连续照明，65 μmol·m^{-2}·s^{-1}，5 d Continuous lighting, 65 μmol·m^{-2}·s^{-1},5 d	20 ℃	红光抑制了叶绿素降解，且效果比蓝光好 Red light inhibits chlorophyll degradation and has a better effect than blue light	[18]
白光 White light	小白菜 Pakchoi	连续照明，10 μmol·m^{-2}·s^{-1}，7 d Continuous lighting, 10 μmol·m^{-2}·s^{-1},7 d	20 ℃，90% RH	白光减缓了叶绿素的降解，调节叶绿素代谢基因表达和酶活性 White light slows down the degradation of chlorophyll, reg ulates the expression of chlorophyll metabolism genes and enzyme activity	[16]
蓝光、红光 Blue light, red light	塌棵菜 Tatsoi	16 h·d^{-1}，300 W·m^{-2}，2 d	21 ℃	两种处理都增加了叶绿素含量 Both treatments increased chlorophyll content	[51]
绿光、蓝光、红光 Green light, blue light, red light	绿芦笋尖 Green asparagus tip	8 h·d^{-1}，100、116、117 W·m^{-2}，9 d	4 ℃	都能增加叶绿素 a 和叶绿素 b、类胡罗卜素、花青素的含量 Both can increase the content of chlorophyll a and chloro phyll b, carotenoids, and anthocyanins	[24]
500 nm 绿光、530 nm 绿光 500 nm green light, 530 nm green light	生菜 Lettuce	12 h·d^{-1}，10 μmol·m^{-2}·s^{-1}，14 d	5 ℃	均可提高可溶性固形物含量，延缓叶绿素的降解 Both can increase the content of soluble solids and delay the degradation of chlorophyll	[52]
白光、红光 White light, red light	紫羽衣甘蓝 Purple collard cabbage	1 h·d^{-1}，20~25 μmol·m^{-2}·s^{-1}，3 d	20 ℃	白光和红光提高了叶绿素、蛋白质、可溶性糖含量和抗氧化能力，保持了花青素和类胡萝卜素含量 White and red light increased chlorophyll, protein, soluble sugar content and antioxidant capacity, while maintaining anthocyanin and carotenoid content	[26]

表 1 （续）
Table 1 （Continued）

光质 Light quality	种类 Variety	光照参数 Light parameters	试验条件 Experimental conditions	主要结果 Main results	参考文献 Reference
红蓝光 Red blue light	西芹 Parsley	连续照明，10 μmol·m^{-2}·s^{-1}，12 d Continuous lighting, 10 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 12 d	4 ℃	叶绿素含量损失率比黑暗对照组低 The loss rate of chlorophyll content is lower than that of the dark control group	[53]
蓝光 Blue light	杨梅 Arbutus	连续照明，40 μmol·m^{-2}·s^{-1}，8 d Continuous lighting, 40 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 8 d	10 ℃	增加了花色苷含量，在贮藏结束时为黑暗对照水果的 1.8 倍 Increased anthocyanin content by 1.8 times compared to the dark control fruit at the end of storage	[39]
蓝光 Blue light	草莓 Strawberry	连续照明，40 μmol·m^{-2}·s^{-1}，12 d Continuous lighting, 40 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 12 d	5 ℃	提高花青素含量，使总糖含量增加 Increase the content of anthocyanins to increase the total sugar content	[27]
蓝光、红光、白光 Blue light, red light, white light	蓝莓 Blueberry	连续照明，2.24 μmol·m^{-2}·s^{-1}，12 d Continuous lighting, 2.24 μmol·m^{-2}·s^{-1}，12 d	4 ℃	均可提高糖含量，但只有蓝光才能延迟花青素降解 Both can increase the sugar content, but only blue light can delay the degradation of anthocyanins	[21]
蓝光 Blue light	甜樱桃 Sweet cherry	连续照明，3.6 W·m^{-2}，10 d Continuous lighting, 3.6 W·m^{-2}, 10 d	0.5 ℃，80%~85% RH	能使甜樱桃中两种花色苷（Cy-3-r 和 Cy-3-Glu）含量增加 Can increase the content of two anthocyanins（Cy-3-r and Cy-3-Glu）in sweet cherries	[41]
蓝光 Blue light	苹果 Apple	8.0 W·m^{-2}	15~25 ℃	450 nm 的蓝色 LED 光刺激了苹果花青素的积累 450 nm blue LED light stimulates the accumulation of anthocyanins in apples	[42]
白光、红光、蓝光 White light, red light, blue light	猕猴桃 Kiwifruit	12 h·d^{-1}	25 ℃	红光抑制了花青素合成基因的表达，蓝光却能促进 Red light inhibits the expression of anthocyanin synthesis genes, while blue light can promote	[43]
红光、蓝光 Red light, blue light	蜜橘 Mandarin orange	50 μmol·m^{-2}·s^{-1}，6 d	20 ℃	有效提高类胡萝卜素含量，尤其是 β-隐黄素含量 Effectively increase the content of carotenoids, especially β - cryptoxanthin content	[54]
红光、蓝光 Red light, blue light	樱桃番茄 Cherry tomato	118 μmol·m^{-2}·s^{-1}，21 d	（21±1）℃	红光、蓝光使番茄红素、β-胡萝卜素和可溶性固形物含量增加，而不会显著影响果实的质量和硬度 Red and blue light increase the content of lycopene, β- carotene, and soluble solids in tomatoes without significantly affecting the quality and hardness of the fruit	[31]
蓝光、白光 Blue light, white light	鲜切番茄 Fresh cut tomato	连续照明，7 d Continuous lighting，7 d	（4±1）℃，60%~80% RH	单一的蓝光照明延缓了番茄红素含量的增加 Single blue light illumination delays the increase in lycopene content	[47]
蓝光 Blue light	辣椒 Pepper	14 μmol·m^{-2}·s^{-1}，8 d	25 ℃，80% RH	蓝光处理第 8 天测得辣椒红素含量与 CK 组对比有效增高 On the 8th day of blue light treatment, the effective increase in capsaicin content was measured compared to the CK group	[48]
蓝光、红光 Blue light, red light	辣椒 Pepper	连续照明，50 μmol·m^{-2}·s^{-1} Continuous lighting，50 μmol·m^{-2}·s^{-1}	24 ℃，（75±3）% RH	都增加了辣椒素含量，红光降低了叶绿素含量 Both increased the content of capsaicin, while red light decreased the chlorophyll content	[15]
绿光 Green light	红甜菜 Red beet	连续照明，（35±2.5）μmol·m^{-2}·s^{-1}，10 d Continuous lighting，（35±2.5）μmol·m^{-2}·s^{-1}，10 d	5 ℃，85% RH	绿光增加了类胡萝卜素含量 Green light increases the content of carotenoids	[9]

因（*BO-MDAR1*、*BO-MDAR2*）的表达，从而延缓贮藏过程中维生素C的降解[54]。

3.2　酚类

酚类化合物是果蔬中的重要抗氧化物质，也是主要营养物质，不仅对人体健康有益，而且在植物生长发育过程中发挥重要作用[60]。LED光调技术可以作为一种物理方式诱导采后果蔬酚类物质积累，以提高果蔬营养品质。Pérez-romero等[61]采用不同波长LED对草莓果实进行照射，发现红光、远红光和蓝光等能有效提高总酚含量和总多酚含量，其中红光相比其他处理组对酚类物质含量提升的效果更明显。此外，番茄在20 ℃下经过红光照射20 d后，酚类物质含量也得到大幅提高[62]。绿光照射花椰菜，在光照后第20天，总酚类化合物含量相比于对照组（黑暗）显著提高[13]，经绿光处理后的生菜总酚含量也得到了显著提升[52]。除绿光和红光外，蓝光和蓝白复合光也能提高果蔬中酚类物质的积累，如卷心菜[8]、野生芝麻菜[9]、甜椒[10]和辣椒[15]等。

植物中酚类物质的合成是苯丙氨酸在苯丙氨酸解氨酶（PAL）的作用下生成肉桂酸的代谢途径和衍生分支，酚类物质降解是在多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO）和过氧化物酶（peroxidase，POD）的催化氧化下进行的[63]。蓝光在水果中酚类化合物的生物合成途径中发挥着重要作用，通过增强与次级代谢物合成和积累相关酶（如PAL）的活性来提高水果中的抗氧化次生代谢物含量[64]。

3.3　抗氧化酶活性

抗氧化酶活性是抗氧化系统的核心指标，主要用于衡量自由基清除和有害氧化物分解的效率。果蔬中的过氧化氢酶（catalase，CAT）、过氧化物酶（POD）和抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）是催化H_2O_2分解和消除过量H_2O_2的主要抗氧化酶[65]。Jiang等[66]在20 ℃时用红光处理西蓝花5 d，发现在保持西蓝花外观的同时还可提高POD、CAT和APX活性。此外，经LED红光照射采后6 d的葡萄，能增强葡萄中的抗氧化酶活性，并保持较高水平的酚类化合物[67]。在LED处理绿葱的试验中，蓝白LED光处理的葱叶片超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、POD和CAT活性都比对照组（黑暗）高，并提升了大葱的抗氧化水平[37]。复合光红紫光LED（660 nm和405 nm）也能保持鲜切白菜中较高的POD和SOD活性[68]。不同LED光质处理对不同果蔬抗氧化系统的影响如表2所示。

表2　LED光质处理对抗氧化成分的影响

Table 2　Effects of LED light quality treatment on antioxidant components

光质 Light quality	种类 Variety	光照参数 Light parameters	试验条件 Experimental conditions	主要结果 Main results	参考文献 Reference
白蓝光 White blue light	西蓝花 Broccoli	连续照明，20 μmol·m^{-2}·s^{-1}，42 d Continuous lighting, 20 μmol·m^{-2}·s^{-1},42 d	5 ℃	维生素C含量高于对照组 The content of vitamin C is higher than that of the control group	[14]
白蓝光 White blue light	西蓝花 Broccoli	20 μmol·m^{-2}·s^{-1}	4 ℃，90% RH	维生素C含量为对照组的1.28倍 The vitamin C content is 1.28 times that of the control group	[57]
白光、蓝光 White light，blue light	卷心菜 Cabbage	连续照明 Continuous lighting	4～5 ℃，95% RH	都增加了叶绿素、总酚、和维生素C含量，其中蓝光对维生素含量增加最有效 All increased the content of chlorophyll, total phenols, and vitamin C, with blue light being the most effective in increasing vitamin content	[8]
蓝光 Blue light	甜椒 Sweet peppe	8 h·d^{-1}，100 μmol·m^{-2}·s^{-1}	7 ℃，85% RH	维持了营养品质，增加了酚类和抗坏血酸含量 Maintained nutritional quality and increased the content of phenols and ascorbic acid	[10]
红光 Red light	小白菜 Pakchoi	连续照明，65 μmol·m^{-2}·s^{-1}，5 d Continuous lighting, 65 μmol·m^{-2}·s^{-1},5 d	20 ℃	抑制了维生C和可溶性蛋白损失 Inhibited the loss of vitamin C and soluble protein	[18]
蓝光 Blue light	草莓 Strawberry	连续照明，40 μmol·m^{-2}·s^{-1}，12 d Continuous lighting, 40 μmol·m^{-2}·s^{-1},12 d	5 ℃	维生素C含量提高 Increased vitamin C content	[27]

表 2 （续）
Table 2 （Continued）

光质 Light quality	种类 Variety	光照参数 Light parameters	试验条件 Experimental conditions	主要结果 Main results	参考文献 Reference
白光、蓝光、红光 White light, blue light, red light	辣椒 Pepper	连续照明，50 μmol·m^{-2}·s^{-1} Continuous lighting, 50 μmol·m^{-2}·s^{-1}	24 ℃，(75±3)% RH	白光增加 Hangjiao-2 的维生素 C 含量，红光对维生素 C 积累无影响，而蓝光降低 3 个品种中的维生素 C 含量 White light increases the vitamin C content of Hangjiao-2, red light has no effect on vitamin C accumulation, while blue light reduces the vitamin C content in the three varieties	[15]
蓝光 Blue light	鲜切草莓 Fresh cut strawberry	连续照明，36 μmol·m^{-2}·s^{-1}，36 h Continuous lighting, 36 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 36 h	（4±1）℃，85%~90% RH	蓝光能够延缓草莓维生素 C 降解，提高总酚含量和 POD 活性，抑制了 PPO 活性的上升 Blue light can delay the degradation of vitamin C in strawberries, increase the content of total phenols and POD enzyme activity, and inhibit the increase of PPO enzyme activity	[35]
蓝光、绿光、红光 Blue light, green light, red light	香蕉 Banana	连续照明，8 d Continuous lighting, 8 d	（20±2）℃，85%~90% RH	促进了香蕉果实中抗坏血酸和总酚的积累 Promoted the accumulation of ascorbic acid and total phenols in banana fruits	[32]
蓝光 Blue light	芝麻菜 Arugula	连续照明，35 μmol·m^{-2}·s^{-1} Continuous lighting, 35 μmol·m^{-2}·s^{-1}	5 ℃，95% RH	蓝光促进野生芝麻菜合成总酚 Blue light promotes the synthesis of total phenols in wild arugula	[9]
500 nm 绿光、530 nm 绿光 500 nm green light, 530 nm green light	生菜 Lettuce	12 h·d^{-1}，10 μmol·m^{-2}·s^{-1}，14 d	5 ℃	在 530 nm 和 500 nm 的绿色 LED 中，总酚含量显著提升 In green LEDs at 530 nm and 500 nm, the total phenolic content significantly increased	[52]
蓝光、红光、白光 Blue light, red light, white light	蓝莓 Blueberry	连续照明，2.241 μmol·m^{-2}·s^{-1}，12 d Continuous lighting, 2.241 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 12 d	4 ℃	蓝、红光照辐射可显著抑制 PPO、POD 活性 Blue and red light irradiation can significantly inhibit PPO and POD activity	[21]
白光 White light	小白菜 Pakchoi	连续照明，10 μmol·m^{-2}·s^{-1}，7 d Continuous lighting, 10 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 7 d	20 ℃，90% RH	POD、CAT、APX 抗氧化酶活性和相对基因表达量均高于对照样品 The enzyme activities and relative gene expression levels of POD, CAT, and APX antioxidant enzymes were higher than those of the control samples	[16]
红光 Red light	西蓝花 Broccoli	40 μmol·m^{-2}·s^{-1}，5 d	（20±1）℃，90% RH	POD、CAT 和 APX 的活性增强 Enhanced activity of POD, CAT, and APX	[66]

4 LED光调技术对果蔬抗病性的影响

果蔬的抗病性与食品安全密切相关，为了减少食品安全风险的源头，需从种植、采收和贮存等环节防控[69]。果蔬经采后包装、运输和贮存等过程，易因挤压损坏而遭受微生物感染入侵，果蔬本身富含大量的水分和营养物质，也会加速微生物生长繁殖。且采后的果蔬表面本身也携带一定的微生物，其生理活动会造成果蔬腐烂[70]。病原菌以细菌和真菌为主，可致果蔬表面出现黑斑病、软腐病、灰霉病、炭疽病等病害[71]。目前研究发现，LED 光调技术对果蔬抗病性的影响主要有两种，一种是通过特定光谱设定来直接对果蔬采后表面微生物进行抑制，属于物理的非热果蔬杀菌方式[72]；另一种是通过光信号诱导果蔬自身的抗病性提升，比如提高抗氧化酶活性，增加抗氧化物质的积累，以及强化自身结构，如提高细胞壁的组成成分木质素含量等[22]。

现有研究表明，可见光波长的LED能作为紫外光的替代品，其中蓝光是主要的LED抑菌光质。Kim等[73]采用波长（405±5）nm的蓝光处理，发现在保持鲜切芒果原有品质的同时，能有效抑制微生物生长，减少食源性疾病的侵染，蓝光对芒果表面大肠杆菌O157:H7、李斯特菌和沙门氏菌都有不同程度的抑制作用，与低温条件结合，灭活率更是达到了97%。蓝光照射采后苹果，通过破坏其表面扩展青霉菌（*Penicillium expansum*）菌丝体形态变化、细胞膜完整性和潜在的线粒体膜来抑制病原菌生长。此外，光照强度也对抑菌有一定的影响，当光强低于120 μmol·m^{-2}·s^{-1}时，未观察到对苹果果实品质的显著影响[74]。

光信号能诱导果蔬自身的抗病性提升，如樱桃番茄水分含量高、外果皮薄，很容易出现灰霉病菌感染引起的采后腐烂，Sun等[75]采用40 W·m^{-2}的4种光质处理樱桃番茄，3 d后樱桃番茄灰葡萄孢病斑直径减小，其中蓝光（470 nm）的效果最佳，LED光通过增强其防御酶活性和防御相关基因的表达来增强抗病力。此外，蓝光抑制阳光玫瑰葡萄表面的炭黑曲霉菌孢子的生长，主要是通过激活相关抗病酶的基因，进而促进抗病相关物质的合成，如木质素、多酚和谷胱甘肽等，从而提高葡萄的抗病力[76]。指状青霉能够引起柑橘感染绿色霉菌，而蓝光可以通过诱导磷脂酶A2基因的表达来促进植物与病原菌的相互作用，进而抑制真菌生长繁殖[77]。研究表明，蓝光光强为50 μmol·m^{-2}·s^{-1}只能诱导类胡萝卜素大量合成，只有高强度150~200 μmol·m^{-2}·s^{-1}才能真正杀灭病菌，并提高防御酶和抗氧化酶活性[78]。Pham等[79]采用405 nm的LED蓝光照射采后葡萄，发现光照周期越长灭菌效果越好，但是24 h照射处理的葡萄质量损失小于48 h，适合短期贮藏。

5　展　望

随着人们生活水平的不断提高，新鲜、营养、安全的果蔬商品性能是最受消费者青睐的，因此新型绿色的果蔬贮藏保鲜技术在未来食品行业有良好的商业应用发展前景。新鲜的果蔬水分含量高，新陈代谢快，保存不当容易腐败变质，降低果蔬的食用价值和商品价值。LED光调保鲜技术作为一种物理的安全绿色的保鲜方法，可以减少微生物污染，延缓果蔬衰老，保持和改善果蔬品质，在采后果蔬的保鲜中占有重要地位。但是从实验室到具体的实际应用中，形成规模和产业化还需探索。为了更好地将LED光调技术应用于实际或商业中，还需要进行更深入的研究[80]，例如深入探索LED保鲜的机制，不局限于果蔬的感官、营养品质和抗氧化能力，还可以找出LED光调对果蔬潜在的不利影响以及如何避免不利影响的方法等。

单一的LED光调技术对果蔬保鲜存在一定局限性。长时间LED辐照处理，或采用蓝光等高能量光谱作为处理手段时，会加速果蔬水分流失[67]。因此如何在达到良好保鲜效果的同时避免水分流失过多，是LED光调技术的创新方向。另外，LED光调技术与其他保鲜手段的有机结合，例如LED蓝光与气调保鲜，通过技术特点互补建立一个安全有效的保鲜系统，在保持果蔬品质的同时彻底灭活病原菌等微生物[81]。LED光调技术与气调包装和冷链结合，在秋葵的冷链运输中可以更有效地延缓品质劣变[82]。因此，多种保鲜技术的协同作用，打破单一技术的局限性，能够更好地维持果蔬的品质和延缓衰老。

参考文献

[1] LIU R H. Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet[J]. Advances in Nutrition, 2013, 4(3): 384-392.

[2] 潘治利. 果蔬的贮藏保鲜与加工技术[J]. 农村·农业·农民, 2024(14): 13-14.

[3] 任宇聪, 苏志涵, 王兆然, 等. 果蔬保鲜技术发展现状探析[J]. 农产品加工, 2024(4): 93-96.

[4] 烟小霞, 康宁波, 鲁玲, 等. 果蔬采后冷害及调控技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(8): 325-334.

[5] 尉磊, 王云香, 朱璇, 等. LED光处理对鲜切果蔬品质影响的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(6): 102-108.

[6] PINELA J, FERREIRA I C F R. Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(10): 2095-2111.

[7] 杨娟, 周婷婷, 邓庆, 等. 天然食用色素在食品中的应用及其稳定性探讨[J]. 食品安全导刊, 2024(36): 134-136.

[8] LEE Y J, HA J Y, OH J E, et al. The effect of LED irradiation on the quality of cabbage stored at a low temperature[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(4): 1087-1093.

[9] PENNISI G, ORSINI F, CASTILLEJO N, et al. Spectral composition from led lighting during storage affects nutraceuticals and safety attributes of fresh-cut red chard (*Beta vulgaris*) and rocket (*Diplotaxis tenuifolia*) leaves [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 175: 111500.

[10] MAROGA G M, SOUNDY P, SIVAKUMAR D. Different postharvest responses of fresh-cut sweet peppers related to quality and antioxidant and phenylalanine ammonia lyase activities during exposure to light-emitting diode treatments[J]. Foods, 2019, 8(9): 359.

[11] MASTROPASQUA L，TANZARELLA P，PACIOLLA C. Effects of postharvest light spectra on quality and health-related parameters in green *Asparagus officinalis* L.[J]. Postharvest Biology and Technology，2016，112：143-151.

[12] 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.

[13] 张娜，阎瑞香，关文强，等. LED单色红光对西蓝花采后黄化抑制效果的影响[J]. 光谱学与光谱分析，2016，36（4）：955-959.

[14] HASPERUE 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.

[15] LIU C C，WAN H J，YANG Y X，et al. Post-harvest LED light irradiation affects firmness，bioactive substances，and amino acid compositions in chili pepper（*Capsicum annum* L.）[J]. Foods，2022，11（17）：2712.

[16] ZHOU F H，ZUO J H，XU D Y，et al. Low intensity white light-emitting diodes（LED）application to delay senescence and maintain quality of postharvest pakchoi（*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*（L.）Makino var. *communis* Tsen et Lee）[J]. Scientia Horticulturae，2020，262：109060.

[17] KAEWSUKSAENG S. Chlorophyll degradation in horticultural crops[J]. Walailak Journal of Science and Technology，2011，8（1）：9-19.

[18] 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 pakchoi[J]. Postharvest Biology and Technology，2020，164：111155.

[19] 罗政，许超群，陈飞平，等. LED光照对气调保鲜菜心叶绿素合成代谢的影响[J]. 保鲜与加工，2021，21（7）：8-16.

[20] MEIRAMKULOVA K，DEVRISHOV D，ADYLBEK Z，et al. The impact of various led light spectra on tomato preservation[J]. Sustainability，2023，15（2）：1111.

[21] 李洋，袁迪，陈丰. 不同波长LED光源照射对采后冷藏蓝莓理化品质的影响[J]. 现代食品科技，2024，40（5）：119-126.

[22] LU W，LI W Q，ZHAO K K，et al. Blue light irradiation combined with low-temperature storage further enhances postharvest quality of strawberries through improving antioxidant defense and cell wall metabolic activities[J]. Food Chemistry-X，2025，25：102115.

[23] 张鹏，郝聪聪，薛友林，等. 蔬菜贮藏保鲜技术研究进展[J]. 包装工程，2023，44（5）：111-120.

[24] OTTOSEN C O，ROSENQVIST E，OUZOUNIS T. Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism：A review[J]. Hortscience，2015，50（8）：1128-1135.

[25] KASIM M U，KASIM R. While continuous white LED lighting increases chlorophyll content（SPAD），green LED light reduces the infection rate of lettuce during storage and shelf-life conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2017，41（6）：e13266.

[26] BARCENA A，MARTINEZ G，COSTA L. Low intensity light treatment improves purple kale（*Brassica oleracea* var. *sabellica*）postharvest preservation at room temperature[J]. Heliyon，2019，5（9）：e02467.

[27] XU F，CAO S F，SHI L Y，et al. Blue light irradiation affects anthocyanin content and enzyme activities involved in postharvest strawberry fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2014，62（20）：4778-4783.

[28] KIM B S，LEE H O，KIM J Y，et al. An effect of light emitting diode（LED）irradiation treatment on the amplification of functional components of immature strawberry[J]. Horticulture Environment and Biotechnology，2011，52（1）：35-39.

[29] FENG X，LI Y，WU D Z，et al. Enhancement of antioxidant capacity and preservation of quality in postharvest apricots through LED light quality treatment[J]. Horticulture Environment and Biotechnology，2025，66（2）：253-268.

[30] 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.

[31] NGCOBO B L，BERTLING I，CLULOW A D. Post-harvest alterations in quality and health-related parameters of cherry tomatoes at different maturity stages following irradiation with red and blue LED lights[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology，2021，96（3）：383-391.

[32] HUANG J Y，XU F Y，ZHOU W B. Effect of LED irradiation on the ripening and nutritional quality of postharvest banana fruit [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2018，98（14）：5486-5493.

[33] 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.

[34] DU J，SHU S，SHAO Q，et al. Mitigative effects of spermidine on photosynthesis and carbon-nitrogen balance of cucumber seedlings under $Ca(NO_3)_2$ stress[J]. Journal of Plant Research，2016，129（1）：79-91.

[35] FAVRE N，BARCENA A，VERA BAHIMA J，et al. Pulses of low intensity light as promising technology to delay postharvest senescence of broccoli[J]. Postharvest Biology and Technology，2018，142：107-114.

[36] 尉磊，王云香，王宝刚，等. LED蓝光处理对鲜切草莓贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技，2025，41（1）：123-129.

[37] GAO S，KONG Y W，LV Y，et al. Effect of different LED light quality combination on the content of vitamin C，soluble sugar，organic acids，amino acids，antioxidant capacity and mineral elements in green onion（*Allium fistulosum* L.）[J]. Food Research International，2022，156：111329.

[38] ZHANG T，SHI Y Y，PIAO F Z，et al. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture，2018，134（2）：231-240.

[39] SHI L Y，CAO S F，CHEN W，et al. Blue light induced anthocy-

anin accumulation and expression of associated genes in Chinese bayberry fruit[J]. Scientia Horticulturae，2014，179：98-102.

[40] KADOMURA-ISHIKAWA Y，MIYAWAKI K，NOJI S，et al. Phototropin 2 is involved in blue light-induced anthocyanin accumulation in *Fragaria x ananassa* fruits[J]. Journal of Plant Research，2013，126（6）：847-857.

[41] KOKALJ D，ZLATIC E，CIGIC 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.

[42] ARAKAWA O，KIKUYA S，PUNGPOMIN P，et al. Accumulation of anthocyanin in apples in response to blue light at 450 nm：Recommendations for producing quality fruit color under global warming[J]. European Journal of Horticultural Science，2016，81（6）：297-302.

[43] 解潇冬，刘晓莹，汪文杰，等.光质对红阳猕猴桃愈伤组织生长速度和花青素合成的影响[J].山西农业科学，2021，49（10）：1166-1172.

[44] AZUMA A，YAKUSHIJI H，KOSHITA Y，et al. Flavonoid biosynthesis-related genes in grape skin are differentially regulated by temperature and light conditions[J]. Planta，2012，236（4）：1067-1080.

[45] 马亚丹，张翠翠，李林杰，等.荧光和发光二极管辐射技术调控果蔬采后抗氧化活性及其机制研究进展 [J].食品科学，2019，40（5）：276-281.

[46] MA G，ZHANG L C，KATO M，et al. Effect of blue and red LED light irradiation on *β*-cryptoxanthin accumulation in the flavedo of citrus fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2012，60（1）：197-201.

[47] 孔得慧，赵文婷，马越，等.LED光照处理对鲜切番茄冷藏期间品质和抗氧化能力的影响[J].食品科技，2021，46（5）：45-52.

[48] 王晓芬，郜海燕，吴伟杰，等.LED蓝光对辣椒采后色泽及品质的影响[J].核农学报，2019，33（1）：112-119.

[49] YAN Z C，LI Y F，LI T T，et al. Exploring the effects of white LED irradiation on postharvest quality and carotenoid biosynthesis in fresh goji berries：Insights from physiological and transcriptomic analyses[J]. Plant Physiology and Biochemistry，2025，228：110254.

[50] XIE B X，WEI J J，ZHANG Y T，et al. Supplemental blue and red light promote lycopene synthesis in tomato fruits[J]. Journal of Integrative Agriculture，2019，18（3）：590-598.

[51] VIRSILE A，BRAZAITYTE A，VASTAKAITE-KAIRIENE V，et al. Nitrate，nitrite，protein，amino acid contents，and photosynthetic and growth characteristics of tatsoi cultivated under various photon flux densities and spectral light compositions[J]. Scientia Horticulturae，2019，258：108781.

[52] SALEHINIA S，DIDARAN F，ALINIAEIFARD S，et al. Green light enhances the phytochemical preservation of lettuce during postharvest cold storage[J]. PLoS One，2024，19（11）：e0311100.

[53] 王超，刘斌，张娜，等.LED红蓝光照射对采后西芹保鲜效果的影响[J].保鲜与加工，2016，16（1）：31-34.

[54] MA G，ZHANG L，SETIAWAN C K，et al. Effect of red and blue LED light irradiation on ascorbate content and expression of genes related to ascorbate metabolism in postharvest broccoli[J]. Postharvest Biology and Technology，2014，94：97-103.

[55] GONZALEZ C V，FANZONE M L，CORTES L E，et al. Fruit-localized photoreceptors increase phenolic compounds in berry skins of field-grown *Vitis vinifera* L. cv. Malbec[J]. Phytochemistry，2015，110：46-57.

[56] 胡武静，张潇雪，龙应根，等.柑橘中类黄酮、维生素C的研究进展 [J].南方农机，2024，55（19）：46-51.

[57] 王美霞，刘斌，关文强，等.LED红蓝光照射强度对采后西蓝花保鲜品质的影响 [J].食品科技，2017，42（6）：42-46.

[58] 牛梦迪，周新，王喆，等.不同LED光照模式对圣女果在低温贮藏过程中品质的影响[J/OL].食品工业科技：1-12[2025-04-07]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024120322.

[59] 查凌雁.LED红蓝光连续光照调控生菜抗坏血酸代谢的机理研究[D].北京：中国农业科学院，2020.

[60] GUPTA S D，KUMAR A，AGARWAL A. Impact of light-emitting diodes（LEDs）on the growth and morphogenesis of encapsulated shoot buds of Curculigo orchioides Gaertn.，an endangered medicinal herb[J]. Acta Physiologiae Plantarum，2019，41（4）：41-50.

[61] PEREZ-ROMERO L F，STIRLING P J，HANCOCK R D. Light-emitting diodes improve yield，quality and inhibitory effects on digestive enzymes of strawberry[J]. Scientia Horticulturae，2024，332：113192.

[62] PANJAI L，NOGA G，HUNSCHE M，et al. Optimal red light irradiation time to increase health-promoting compounds in tomato fruit postharvest[J]. Scientia Horticulturae，2019，251：189-196.

[63] 牛梦迪，刘好，孙瑞琪，等.冷藏过程中LED光对果蔬营养品质的影响研究进展 [J].食品与发酵工业，2025，51（16）：394-402.

[64] WANG S Y，CHEN C T，WANG C Y. The influence of light and maturity on fruit quality and flavonoid content of red raspberries[J]. Food Chemistry，2009，112（3）：676-684.

[65] PERERA W P T D，NAVARATNE S，WICKRAMASINGHE I. Impact of spectral composition of light from light-emitting diodes（LEDs）on postharvest quality of vegetables：A review[J]. Postharvest Biology and Technology，2022，191（5）：111955.

[66] JIANG A，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.

[67] NASSARAWA S S，BELWAL T，JAVED M，et al. Influence of the red leds light irradiation on the quality and chemical attributes of postharvest table grape（*Vitis vinifera* L.）during storage[J]. Food and Bioprocess Technology，2022，15（6）：1436-1447.

[68] ZHANG Y C，XIE J. The effect of red and violet light emitting diode（LED）treatments on the postharvest quality and biodiver-

sity of fresh-cut pakchoi (*Brassica rapa* L. *chinensis*)[J]. Food Science and Technology International, 2022, 28(4): 297-308.

[69] GHATE V, YEW I, ZHOU W B, et al. Influence of temperature and relative humidity on the antifungal effect of 405 nm LEDs against *Botrytis cinerea* and *Rhizopus stolonifer* and their inactivation on strawberries and tomatoes [J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 359: 109427.

[70] 杨双艳，林玲莉，胡术月，等. 新型非热处理技术在果蔬保鲜技术中的应用及深入研究进展[C]//健康食品研发与产业技术创新高峰论坛暨 2022 年广东省食品学会年会，潮州市第二届食品产业技术高峰论坛，2023.

[71] 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.

[72] KEBBI Y, MUHAMMAD A I, SANT'ANA A S, et al. Recent advances on the application of UV-LED technology for microbial inactivation: Progress and mechanism[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19 (6): 3501-3527.

[73] KIM M J, TANG C H, BANG W S, 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.

[74] ZHU R Y, WANG W L, LUO Z S, et al. Blue LED light treatment inhibits virulence and patulin biosynthesis in *Penicillium expansum*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 200: 112340.

[75] SUN J Y, TAN X H, LIU B J, et al. Blue light inhibits gray mold infection by inducing disease resistance in cherry tomato[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 215: 113006.

[76] HUO X H, TIAN X L, LIU Z F, et al. Combination of LED blue light with peppermint essential oil emulsion for the postharvest storage of Shine Muscat grape to control *Aspergillus carbonarius*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 218: 113175.

[77] ALFEREZ F, LIAO H L, BURNS J K. Blue light alters infection by *Penicillium digitatum* in tangerines [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 63(1): 11-15.

[78] DU Y J, SUN J C, TIAN Z H, et al. Effect of blue light treatments on *Geotrichum citri-aurantii* and the corresponding physiological mechanisms of citrus[J]. Food Control, 2023, 145: 109468.

[79] PHAM T T, NGUYEN T N H, LE N T, et al. Post-harvest preservation of green grapes utilizing 405 nm light emitting diode[J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2023, 8: 100463.

[80] BHAVYA M L, SHEWALE S R, RAJORIYA D, et al. Impact of blue LED illumination and natural photosensitizer on bacterial pathogens, enzyme activity and quality attributes of fresh-cut pineapple slices[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14 (2): 1-11.

[81] 曹婷婷，曾凯芳，邓丽莉. 光照技术在果蔬采后贮藏保鲜中的应用研究进展 [J]. 食品与发酵工业，2022，48(10)：314-320.

[82] HUANG J J, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Synergistic effect of red-white LED and modified atmosphere packaging on okra quality maintenance and its mechanism in simulated cold chain logistics[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 216: 113059.