

光调控技术对番茄果实品质改善的研究进展

冯 丽, 张 莉, 胡志峰

(甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 光照作为一个关键的环境因子, 会对设施番茄的品质产生显著的影响。我们聚焦于补光技术对番茄果实品质调控的研究, 通过对大量相关文献的梳理归纳, 综合分析了不同补光灯类型、光质及配比、补光时间、光照强度和补光棚膜类型等在调控番茄果实色泽、风味品质和营养品质等方面的效果与差异, 概括了当前的研究成果和主要技术, 并对今后的研究方向进行了展望, 旨在为深入探究补光技术调控番茄果实品质提供综合性的理论依据和一定的应用指导。

关键词: 番茄; 光调控; 补光; 光质; 光强; 品质

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)05-0393-08

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.05.001

Research Progress on the Quality Improvement of Tomato Fruits by Light Supplementary Technology

FENG Li, ZHANG Li, HU Zhifeng

(Institute of Vegetable Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Light, as a key environmental factor, could significantly affect the quality of tomatoes in facilities. This paper focuses on the regulation of tomato fruit quality through light supplementary technology. By systematically reviewing and summarizing a large body of relevant literatures, we comprehensively analyzes the effects and differences of types of supplemental lighting, various light spectra, and ratio supplemental lighting durations, light intensities, and films on tomato fruit color, flavor quality, and nutritional quality. The current research outcomes and key technologies are summarized, and future research directions are discussed, aiming to provide a comprehensive theoretical basis and practical guidance for in-depth research on improving tomato fruit quality through light supplementary technology.

Key words: Tomato; Light regulation; Supplementary light; Light spectrum; Light intensity; Quality

近年来, 实现蔬菜周年供应的目标推动了设施反季节栽培的迅速发展。光照条件是制约设施蔬菜品质的重要因素之一。因此, 设施内人工补光技术成了当前设施蔬菜栽培中一个值得关注且亟须解决的问题。补光技术作为一种有效的人工干预手段, 可以通过调节光质、光照强度和光周期等参数来改善蔬菜的生长环境, 进而对品质起到积极的调控作用^[1]。

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)属茄科番茄属植物, 起源于南美洲热带、亚热带地区, 是世界

上重要的蔬菜作物之一, 因其营养物质丰富和酸甜的口感深受大众喜爱, 是最受欢迎的瓜果和蔬菜之一, 已成为日常餐桌上不可或缺的食材^[2-5]。随着生活水平的提升, 人们对番茄品质的要求不断提高, 从事番茄栽培的研究者和种植户也聚焦于探索各种提高番茄品质的方法^[6]。许多研究已经表明, 光调控在番茄品质形成过程中发挥着重要作用^[7-10], 但由于现有的补光类型和光质配比种类繁多, 不同补光技术对番茄品质的调控效果存在明显的差异, 鲜有相关文献对这些研

收稿日期: 2025-01-13; 修订日期: 2025-04-07

基金项目: 山东省技术创新引导计划项目(YDZX2023028); 甘肃省科技重大专项计划项目(24ZDNA005)。

作者简介: 冯 丽(1997—), 女, 甘肃清水人, 研究实习员, 硕士, 主要从事番茄育种及逆境生理研究工作。Email: 1654114573@qq.com。

通信作者: 胡志峰(1974—), 男, 甘肃陇南人, 研究员, 硕士, 主要从事番茄遗传育种与栽培等方面研究工作。Email: huzf@gsagr.cn。

究成果进行比较系统的总结与概述。因此,我们主要从补光灯类型、光质及配比、补光时间、光照强度和补光棚膜类型等方面归纳概括了光调控对番茄品质的影响,并在现有研究的基础上对今后研究进行了展望,以期为提高番茄品质提供一定的理论参考。

1 灯光补光对番茄品质的影响

1.1 不同补光灯类型

植物补光灯以其独特的光谱和照明特性,在现代园艺和农业生产中发挥着重要作用。目前,生产及试验中使用的补光灯类型包括发光二极管(LED灯)、高压钠灯(HPS)、激光植物生长灯、泛光灯、荧光灯和白炽灯^[7,11]。由于这几种补光灯在补光效率、波长和照射覆盖面积等方面存在差异,因此对番茄品质的调控效果各有不同。LED灯补光能提高番茄果实的可溶性糖、维生素C(Vc)、可溶性蛋白、游离氨基酸、番茄红素、花色苷、类黄酮和可溶性酚含量,进而有效提升了番茄的品质^[12-13]。HPS灯能增加番茄果实可溶性固形物和总糖含量,并促进初级代谢物的积累^[14]。泛光灯补光处理增加了番茄的单果重,但对品质没有显著改善作用^[5]。荧光灯补光能有效提高番茄果实中蛋白质的含量^[11]。

补光灯补光延长了番茄光合作用时长,提升了光合效率,并增加了有机物积累,从而使果实长势快、产量高、品质好^[15]。有研究显示,HPS灯和LED灯的同时补光提升了番茄品质,增强了口感^[16]。此外,HPS灯处理下番茄果实总糖、番茄红素、 β -胡萝卜素含量显著高于LED灯处理^[17]。然而,LED灯比HPS灯更显著地促进了果实酚类化合物的积累,并提高了番茄红色品种中 β -胡萝卜素的含量^[16]。经过分析,认为这种差异是由于番茄品种和自然光之间存在差异所造成的。相反,LED灯处理下果实中钾、镁和钙含量比HPS灯处理增加了30%、70%和40%,且同一成熟阶段果实色泽和品质属性也较HPS灯处理突出^[17-18]。因此,在选择补光灯时,应根据番茄的种类、植株或果实的生长阶段、种植密度和自然光的可用性等因素进行综合考虑。

1.2 不同光质及配比

1.2.1 不同单色光 不同颜色的光具有独特的波长

和能量特性,在调控果实品质方面展现出不同的潜力。蓝色光质可以显著提升番茄果实总糖、还原性糖、可溶性糖、可溶性蛋白、Vc和可滴定酸含量,并降低硝酸盐的含量^[19-21]。同时,在番茄果实发育期补蓝光能够促进 PO_4^{3-} 与 K^+ 吸收,加快番茄果实发育与成熟,改善果实着色并缩短转色时间^[20,22]。这是因为增补蓝光可能通过诱导转运体基因参与番茄果实 K^+ 转运的调控,而 K^+ 的吸收速率与果实转色期的着色显著相关。此外,蓝光不仅对醇类物质的合成有促进作用,还对氨基酸和次生代谢物(番茄红素、酚类、类黄酮)的生物合成具有促进作用^[8,14,23]。

红光则会增加可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、番茄红素、Vc含量及糖酸比,降低硝酸盐含量^[20,23]。近年来,远红光也被逐渐应用于番茄补光生产中,例如,Kim等^[18]发现红光+远红光处理下番茄果实的感官属性(香气、甜度、酸度和质地)评分均高于红光单独处理。可见,红光和蓝光是影响番茄果实品质变化的主要光质,且二者的主要区别在分子水平上。转录组学分析显示,蓝光和红光处理的差异表达基因富集在次生代谢物生物合成、碳固定和甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸代谢途径中^[8]。基因组学分析表明,相较于蓝光,红光提高了果实中某些含铁离子物质的浓度,而金属离子结合蛋白、金属耐受蛋白和金属转运蛋白编码基因在蓝光和红光作用下表达水平的改变,是导致番茄果实离子谱变化的原因之一^[8]。

紫光处理增加了采后番茄果实中可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白、番茄红素和总酚的含量,从而提高了番茄的品质^[24]。白光和黄光对番茄品质没有显著的改善作用^[25-26]。然而,关于绿光对番茄品质的调控作用,目前的研究结果仍存在一定的争议。一方面,绿色光质能增加总糖、还原糖含量并增加芳香物质的种类^[23,27]。另一方面,也有研究认为绿光处理会使樱桃番茄品质下降^[20]。经过比较分析,认为这种差异可能是由不同补光周期、光强及品种所引起的。此外,不同研究对品质的评价方法也存在差异。综上所述,不同颜色的光质对番茄品质的调控作用还受到补光周期、光强及品种的影响,具体的作用机制仍有待进一步研究。

1.2.2 不同光质配比 与红光或蓝光单独处理相比, 红蓝组合光在提升番茄品质方面发挥的作用更为显著。1 : 1 的红蓝组合光增加了可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白、Vc、游离氨基酸、番茄红素、挥发性物质、类黄酮和花青素含量, 提高成熟期果实的酸性转化酶(AI)和中性转化酶(NI)活性^[28-31]。2.25 : 1 的红蓝组合光株间补光可以使番茄有机酸和 Vc 含量显著高于不补光区^[32]。而 3 : 1 的红蓝组合光处理不仅可显著提高番茄果实的可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白、Vc、番茄红素、类黄酮含量以及糖酸比, 而且显著提高了在转色期和成熟期对番茄风味有积极作用的乙醛、反式-2- 乙烯醛、 β - 紫罗兰酮、牻牛儿丙酮、6- 甲基-5- 庚烯-2- 酮、2- 苯乙醇和愈创木酚的含量, 降低了对风味有消极作用的水杨酸甲酯的含量^[11, 29, 33-35]。另一项研究显示 1 : 0.8 的红蓝组合光处理显著提高了番茄果实中果糖和葡萄糖的含量, 同时促进风味相关的挥发性物质合成基因(*SLAADC1a*)、风味调节基因(*SIGORKY*)、番茄红素合成基因(*SIPSY1*、*SIPDS*)以及乙烯合成相关基因(*SLACS2*、*SLACO2*) 的表达^[36]。此外, 4 : 1 的红蓝组合光可以使番茄果实的可溶性固形物、可溶性糖、Vc、VE、番茄红素和多酚含量及糖酸比均显著提高, 改善了番茄果实品质^[28, 37]。

蓝光比例较高的红蓝组合光处理下番茄果实中可溶性糖、游离氨基酸和 Vc 含量及糖酸比最高, 而可溶性蛋白含量较低^[29]。此外, 陈田甜^[28]发现蓝光比例增大可提高果实的可溶性糖、游离氨基酸和类黄酮含量。6 : 1 的红蓝组合光处理和 1 : 5 的红白组合光处理下番茄可溶性糖、Vc 和有机酸含量均比自然光照下呈不同比例的增加^[38]。同时, 7 : 3 的红蓝组合光对番茄果实可溶性固形物、可溶性蛋白和 Vc 含量促进作用最大; 而 8 : 2 的红蓝的组合光对可溶性糖和总酚含量的促进作用最大^[39]。6 : 3 : 1 的红蓝黄组合光下番茄蛋白质含量最高^[14]。可见, 尽管不同比例红蓝组合光均能提升番茄果实的品质, 但它们之间仍存在一定的差异。这可能与番茄的品种、补光时长以及栽培季节自然光的强弱等因素也有一定的关系。因此, 在选择光质组合配比时, 应根据具体的实际情况进行综合考量。

1.3 不同补光时间和光照强度

补光时间和补光强度对番茄品质的影响因番茄品种、生长阶段以及具体的补光条件而异。有研究显示, 补光 6 h 显著提高了番茄可溶性固形物、总酸、可溶性糖和可溶性蛋白的含量, 而补光 5 h 对 Vc 和番茄红素的促进作用最大^[40]。另一项研究发现 9 h 补光处理下番茄果实品质最佳、产量最大、采收期提前时间最长, 表明补光有效增加了番茄果实的口感风味, 随着补光时间的延长, 其促进作用可能越大^[41]。然而, 7 : 2 的红蓝组合光补光 3 h 也能够显著提高番茄 Vc 和可溶性糖含量及糖酸比, 且早晨补光 3 h 可提高番茄果实的营养品质, 而夜间补光 3 h 能提高番茄果实的风味物质^[9, 42]。此外, 在 7.4×10^3 lux 光照强度补光 2 h 的处理下番茄可溶性糖、Vc 和番茄红素的含量显著高于对照自然光处理^[43]。用 5 : 1 的红蓝组合光在光照强度分别为 100、200、300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的处理下, 越冬番茄果实 Vc、番茄红素和有机酸含量均得到了显著的改善, 且随着光强增加, 糖酸比逐渐提高, 改善效果也越明显^[44]。可见, 补光时间对番茄品质的调控不是绝对的, 还可能与光质和光照强度紧密相关。

早晨揭帘前进行一定程度的补光可以有效地增加光照强度, 对植物光合作用和果实品质起到一定的调控作用。例如, 揭帘前补光 5 h 可显著增加番茄果实中可溶性固形物、可溶性糖、总糖、可溶性蛋白、Vc 和番茄红素的质量分数及糖酸比, 进而提高番茄营养与风味品质^[45-46]。揭帘前与盖帘后 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 间歇补光处理也可提高番茄果实可溶性固形物、总酸、可溶性蛋白、Vc、番茄红素和挥发性物质含量及糖酸比^[47]。此外, 补 30 min 停 8 min 间歇式补光能显著提高果实可溶性糖、Vc、可溶性蛋白和类黄酮含量, 促进番茄果实的抗氧化水平, 进而提升了果实的营养品质^[48]。总之, 补光时间和强度对番茄品质的影响是多方面的, 需要根据具体的番茄品种、生长阶段以及环境条件进行优化调整。

光环境调控是影响番茄品质形成的关键因素, 在灯光补光过程中, 光质、补光时间和光照强度之间存在复杂的交互作用, 共同调控番茄果实的外观品质、营养品质和风味品质^[49]。例如, Zushi

等^[50]的研究结果表明光对番茄果实中 Vc 含量的影响取决于光照强度和光质。此外,在光周期(16 h 光和 8 h 暗)条件下,红蓝(1:8)光质在促进番茄光合作用和提高果实品质方面表现出优异的效果,这表明该光周期配置对番茄品质提升有促进作用^[36]。总之,灯光补光对番茄品质的调控效果依光质、光照强度和补光时间交互作用而存在差异,在实际应用中要注意精准调控各项补光要素(表1)。

2 不同类型棚膜对番茄品质的影响

2.1 转光膜

转光膜是通过在普通农用塑料薄膜中添加转光剂的方法,研发的一种可将紫外光或植物利用较少的黄绿光转换为对光合作用有利的蓝紫光和红橙光的棚膜^[51]。已有的研究发现,转光棚膜不仅能明显提高番茄的产量,且适宜光谱比率的转光棚膜覆盖能显著增加番茄果实可溶性糖、可溶性蛋白、Vc 和番茄红素含量以及糖酸比^[52]。温室

表 1 不同补光要素对番茄品质的调控作用

光质配比	光照强度 /[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	补光时间	补光效果
红:蓝=1:0.8	200	每天 12 h	提高果糖和葡萄糖含量;促进风味相关的挥发性物质合成基因、风味调节基因、番茄红素合成基因和乙烯合成相关基因的表达 ^[36]
红:蓝=1:1	300	每天 06:00—17:00 时	提高番茄红素、可溶性固形物、蔗糖、可溶性蛋白、游离氨基酸、维生素 C、花青素含量;降低可滴定酸含量 ^[29]
		每天 08:00—20:00 时	提高可溶性蛋白、游离氨基酸、类黄酮含量 ^[28]
		每天 12 h	增加果糖和葡萄糖含量;提高酸性转化酶和中性转化酶活性 ^[31]
红:蓝=1:3	未明确	每天 17:30—19:30 时	提高可溶性固形物、维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量;降低有机酸含量 ^[33]
	300	每天 06:00—17:00 时	提高类黄酮含量 ^[29]
	(200±10)	每天 12 h	提高可溶性蛋白、维生素 C 和番茄红素含量 ^[30]
红:蓝=2:1	300	每天 06:00—17:00 时	提高可溶性糖含量 ^[29]
红:蓝=2:3	87.75	每天 00:30—11:30 时	提高有机酸和维生素 C 含量 ^[32]
红:蓝=2.25:1		14:30—16:30 时	
红:蓝=3:1	300	每天 12 h	提高乙醛、反式-2-乙烯醛、 β -紫罗兰酮、牻牛儿丙酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮、2-苯乙醇等对风味有积极作用物质的含量 ^[35]
	300	每天 12 h	提高可溶性糖含量和糖酸比;降低可滴定酸含量 ^[21]
	22	每天 4 h	提高维生素 C、可溶性糖和可溶性固形物含量 ^[11]
红:蓝=4:1	未明确	每天 00:00—07:00 时	提高可溶性固形物、可溶性糖、维生素 C、维生素 E 含量及糖酸比 ^[37]
	300	每天 08:00—20:00 时	提高糖、番茄红素、多酚含量及 DPPH 自由基清除率 ^[28]
	15	每天 4 h	提高维生素 C、可溶性糖、可溶性固形物及可滴定酸含量 ^[11]
红:蓝=5:1	300	早晚开棚前 3 h 和闭棚后 3 h	提高维生素 C、番茄红素和有机酸含量 ^[44]
红:蓝=6:1	100	每天 5 h	提高维生素 C、有机酸和可溶性糖含量 ^[38]
红:蓝=7:2	未明确	每天揭帘前 5 h	提高总糖、可溶性固形物、可溶性糖、有机酸、可溶性蛋白、维生素 C、番茄红素含量和糖酸比 ^[45-46]
红:蓝=7:3	未明确	23:00 时至翌日 05:00 时	提高可溶性固形物、可溶性蛋白和维生素 C 含量 ^[39]
红:蓝=8:2	未明确	23:00 时至翌日 05:00 时	提高可溶性糖和总酚含量 ^[39]
红:白=1:5	100	每天 5 h	提高维生素 C、有机酸和可溶性糖含量 ^[38]
红:蓝:白=1:2:3	200	每天 08:00—22:00 时	提高可溶性固形物、总酸、可溶性蛋白、维生素 C、番茄红素和挥发性物质含量及糖酸比 ^[47]
红:蓝:黄=6:3:1	50	每天 18:00—21:00 时	提高可溶性蛋白含量 ^[11]

覆盖添加绿光转红光、紫外光转蓝光转光剂的棚膜能够显著提高膜下蓝光透过比率, 使番茄增产 12.3%; 而覆盖绿光转红光、紫外光转蓝光、红光和远红光转光剂的棚膜则能明显减少紫光透过率, 增加红橙光透过率, 提高果实八氢番茄红素合成酶和脱氢酶活性, 进而促进番茄红素的积累^[10]。此外, 邵佳丽^[53]的研究结果显示, 覆盖添加紫、绿光转红光, 紫光转蓝、远红光的棚膜提高了番茄果实中蔗糖代谢关键酶及番茄红素合成关键酶活性, 促进了可溶性糖和番茄红素的积累, 使果实品质得到进一步的改善。同时, 添加 VTR-660 转光剂后覆盖宽谱带紫转红棚膜处理下番茄果实 Vc 和番茄红素含量比覆盖传统内添加型 EVA 消雾无滴膜分别提高了 11.11% 和 33.04%^[54]。然而, 与多层共挤和内添加型棚膜相比, 涂覆型消雾无滴转光膜能显著提高番茄果实中可溶性糖、Vc、可溶性蛋白和番茄红素的含量, 降低有机酸含量, 使果实糖酸比显著提高, 果实转色提前^[34, 55], 这主要是因为涂覆型棚膜覆盖的光照强度大, 有利于碳水化合物的形成; 温度高有利于番茄红素的形成, 还能显著提高番茄的产量^[55]。高亚新等^[56]发现新型稀土转光膜(RPO)能提高温室内远红光、蓝光和红橙光比例, 降低紫外光、紫光和绿光比例, RPO 处理下番茄的可溶性糖、可溶性蛋白和 Vc 含量均显著增加, 可滴定酸含量显著降低, 且产量较 PO 膜处理提高了 32.90%。

2.2 其他棚膜

光散射薄膜是一种聚合物材料, 能够将平行入射的光线转化为各向同性或各向异性的面光源或线光源, 从而有效扩大光照覆盖面积。孙士景等^[57]的研究结果也显示散射光薄膜能使温室中番茄果实可溶性固形物及 Vc 含量均显著增加, 产量提高 21.19%。此外, 一种被称作红色环照牌光合膜能更有效地调控气温, 增加根际温度, 提高红光透过率, 使番茄可溶性固形物含量提高 5.8%^[58]。

综上所述, 转光膜是目前试验和生产中使用较为广泛的一种光调控棚膜。依据现有的研究结果来看, 添加式复配型和涂覆式转光膜均在调控番茄品质方面发挥着积极作用, 但涂覆式转光膜的效果更显著。此外, 新型稀土转光膜、光散射

薄膜和红色环照光合膜也有提高泛番茄品质的作用, 但目前研究和使用的较少。

3 补光与其他调控技术耦合对番茄品质的影响

将补光技术与其他调控技术相结合, 形成耦合调控体系, 已成为提升番茄品质的重要研究方向之一。补光 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 附加最适 CO_2 浓度 700 ~ 900 $\mu\text{L}/\text{L}$ 补偿能够增加番茄果实可溶性固形物、总酸、可溶性蛋白和番茄红素含量^[59]。此外, CO_2 加富和 LED 补光会显著提高不同时期樱桃番茄果实可溶性固形物、Vc、总酸、可溶性糖可溶性蛋白和番茄红素以及 6-甲基-5-庚烯-2-酮、 β -紫罗兰酮和乙醛等番茄特征挥发性芳香物质的含量, 丰富了挥发性芳香物的种类, 使番茄风味更加浓郁^[60-61]。然而, 另一项研究结果显示补光增施 CO_2 处理显著提高了番茄产量, 但对可溶性固形物含量、酸含量和糖酸比影响不显著^[62]。这种差异可能是由于补光技术和 CO_2 浓度不同造成的。补光和营养液耦合也会对番茄品质起到一定的调控作用。例如, 红蓝(3:1)组合光和霍格兰营养液处理能显著提高番茄可溶性蛋白、Vc 和番茄红素含量, 使番茄果实品质有明显的提升^[63]。综上所述, 补光与其他调控技术耦合对番茄品质的影响是一个多因素、多层面的复杂过程, 深入研究其作用机制和优化配置, 对于提高番茄的品质具有重要意义。

4 小结与展望

补光是现代设施农业中提升反季节番茄品质和生产效益的关键技术措施之一。现有的光调控技术对番茄果实的色泽、糖酸、Vc、可溶性蛋白、氨基酸、番茄红素和挥发性物质等品质属性均有不同程度的改善。LED 灯为目前最主要的补光灯类型, 但其单色光质的补光效果没有红蓝组合光显著, 且对番茄整体品质改善最显著的光质配比可能是红蓝(3:1)组合光。此外, 揭帘前后补光、复配型转光膜以及补光与增施 CO_2 耦合等技术都能对番茄品质起到较好的提升作用。然而, 光调控技术对番茄品质的改善效果并不是绝对的, 这一过程受到多种外在因素的影响, 且当前的研究多聚焦于潜在的品质调控指标上, 甚至部分研究结果之间仍存在争议。因此, 在实际应用中, 应依据具体的环境条件和番茄的生长状

态,合理选择补光灯的类型、光质及配比、光照强度和光周期,以确保光调控技术的有效性和经济性。

光调控技术在改善番茄果实品质方面具有显著的效果和广阔的应用前景。未来的研究聚焦于以下几个方面。一是优化光质组合。探索不同光质组合的最佳配比和应用时机,以实现番茄果实品质的精准调控。二是协同光周期与光强度。研究光周期与光强度的协同作用机制,以优化生长环境,提高产量和品质。三是深入解析分子机制。利用分子生物学技术,进一步解析光信号调控番茄果实品质的分子机制,为精准育种提供理论基础。四是智能化光调控技术。开发基于人工智能和物联网的智能化光调控系统,实现对光环境的实时监测和动态调控。五是多因素综合调控。将光调控与其他环境因素(如温度、湿度、CO₂浓度等)相结合,开展多因素综合调控研究,以实现高效节能和品质提升。

参考文献:

- [1] 孙 斌,吕璐平,李灵芝,等. LED 红蓝光配比对番茄生长和光合的影响[J]. 中国农业气象, 2024, 45(5): 517-524.
- [2] 权建华,孙铭若,冯丽玲,等. 苗期低温胁迫对番茄生长及果实畸形发生的影响[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(1): 78-82.
- [3] 闫文涛,米兴旺,李 波,等. 不同保水剂对戈壁日光温室基质栽培番茄生长和产量及品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(4): 342-348.
- [4] 张 莉,马彦霞,陶兴林,等. 番茄中功能物质的特性及不同加工方式对其品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(10): 883-893.
- [5] 程国亭,娄茜棋,栗现芳,等. 番茄果实风味物质组成及其影响因素研究进展[J]. 中国蔬菜, 2022(7): 23-33.
- [6] 蔡连卫,齐长红,刘 民,等. 日光温室越冬茬高品质番茄栽培环境调控技术[J]. 蔬菜, 2023(9): 49-51.
- [7] 王明钦,桑毅振,胡永军,等. 补光灯类型对设施番茄光合特性与产量的影响研究[J]. 农业开发与装备, 2023(12): 144-146.
- [8] XIAO L, SHIBUYA T, WATANABE T, et al. Effect of light quality on metabolomic, ionic, and transcriptomic profiles in tomato fruit[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(21): 13288.
- [9] 王舒亚,吕 剑,郁继华,等. 不同补光时长对日光温室番茄生长、产量及品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2018(10): 35-39.
- [10] 宋单单,史梦雪,高金汇,等. 复配型转光棚膜光学性能及其对日光温室番茄生长及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(11): 2218-2226.
- [11] 钱舒婷. 不同补光灯对设施草莓、番茄光合生长及产量品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [12] 赵凯旋,苏 丹,杨绒娥. 日光温室番茄应用植物补光灯效果试验[J]. 西北园艺(综合), 2021(7): 47-49.
- [13] 李海达,吉家曾,郑桂建,等. 不同 LED 补光光源对樱桃番茄产量和品质的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(14): 37-40; 46.
- [14] ALSINA I, ERDBERGA I, DUMA M, et al. Changes in greenhouse grown tomatoes metabolite content depending on supplemental light quality[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 830186.
- [15] FANWOUA J, VERCAMBRE G, BUCK-SORLIN G, et al. Supplemental LED lighting affects the dynamics of tomato fruit growth and composition[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 256: 108571.
- [16] VERHEUL M J, MAESSEN H F R, PAPONOV M, et al. Artificial top-light is more efficient for tomato production than inter-light[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110537.
- [17] ALI A, CAVALLARO V, SANTORO P, et al. Quality and physiological evaluation of tomato subjected to different supplemental lighting systems[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 323: 112469.
- [18] KIM H J, YANG T, CHOI S, et al. Supplemental intra-canopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 261: 108985.
- [19] HE R, WEI J, ZHANG J, et al. Supplemental blue light frequencies improve ripening and nutritional qualities of tomato fruits[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 888976.
- [20] 郑冬梅,林志斌,陈艺群,等. 不同光质对樱桃番茄产量及品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(8): 567-571.
- [21] 李 岩,王丽伟,文莲莲,等. 红蓝光质对转色期间番茄果实主要品质的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(12): 2372-2382.

- [22] 王 维. 增补 LED 红蓝光对番茄 K^+ 吸收与转运以及果实着色的调控机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2021.
- [23] 张现征. 光质调控番茄植株生长及果实品质的机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [24] 李慧敏, 陆晓民. 紫光光质对采后番茄果实品质的影响[J]. 安徽科技学院学报, 2017, 31(3): 20–24.
- [25] 杨忠武, 刘 翼, 金卓君, 等. 光质对番茄营养与风味品质的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(34): 134–141.
- [26] 蒲高斌, 刘世琦, 杜洪涛, 等. 光质对番茄果实转色期品质变化的影响[J]. 中国农学通报, 2005(4): 176–178; 187.
- [27] 胡 莉, 李建设, 高艳明, 等. 夜间补照绿光对设施番茄光合特性及品质产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(3): 429–436.
- [28] 陈田甜. 不同光质对番茄果实品质形成的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [29] 林 婧. LED 补光对樱桃番茄生长发育、产量及品质的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [30] 杨俊伟, 梁婷婷, 严露露, 等. 光质对番茄果实品质及挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 55–61.
- [31] 孙 娜. 光质对番茄生长、生理代谢及果实产量品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [32] 吴劲松, 姚凤珍, 陆正宇, 等. LED 株间补光对中型番茄产量和果实品质的影响[J]. 中国照明电器, 2023(2): 19–23.
- [33] 霍银亮, 曲继松, 张丽娟, 等. 补光对秋冬茬设施番茄生长发育、产量及品质的影响[J]. 宁夏农林科技, 2022, 63(7): 23–27.
- [34] 王丽伟. 红蓝光质对番茄碳氮代谢和果实品质的影响机制研究与应用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [35] 董 飞, 王传增, 孙秀东, 等. 基于蛋白质组学研究光质对番茄果实挥发性物质的影响机理[J]. 园艺学报, 2019, 46(2): 280–294.
- [36] ZHANG Y, ZHU K, WANG X, et al. Manipulation of artificial light environment improves plant biomass and fruit nutritional quality in tomato[J/OL]. Journal of Advanced Research, (2024–11–24). <https://www.x-mol.com/paper/1860851164129882112>.
- [37] 丁小涛, 姜玉萍, 王 虹, 等. LED 株间补光对番茄生长和果实品质的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(6): 48–51.
- [38] 吕璐平. LED 不同光配比对日光温室番茄生长、光合及品质的影响[D]. 太原: 山西农业大学, 2022.
- [39] 王 琦, 谭占明, 程云霞, 等. 不同比例红蓝光夜间补光对番茄生长生理的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(9): 58–66.
- [40] 刘 露. 不同留果穗数和不同补光时间对番茄品质及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [41] 李 蔚, 李新旭, 李红岑, 等. 植物生长灯不同补光时间对日光温室番茄产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(11): 49–50; 55.
- [42] WANG S Y, JIN N, JIN L, et al. Response of tomato fruit quality depends on period of LED supplementary light[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 833723.
- [43] 张彩虹, 于秀针, 马彩雯, 等. 升降式系统补光对弱光条件下日光温室番茄生长及产量品质的影响[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(7): 54–58.
- [44] 黄 松, 刘勇鹏, 孙凯乐, 等. 不同 LED 光强补光对日光温室越冬番茄生长及产量品质的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(6): 62–68.
- [45] 柳帆红, 肖雪梅, 郁继华, 等. 不同时段补光对日光温室番茄营养与风味品质的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(4): 570–578.
- [46] 张 洋, 郁继华, 唐中祺, 等. 不同时段株间补光对日光温室番茄产量及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 430–437.
- [47] 宋 羽, 蒋程瑶, 李玉姗. 不同叶背补光模式对戈壁温室番茄品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(2): 294–303.
- [48] 魏晶晶. 不同方式蓝光补光对番茄果实品质和番茄红素代谢影响的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- [49] 张一博. 不同光质光强对番茄荧光参数的影响及光源自动控制系统设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [50] ZUSHI K, SUEHARA C, SHIRAI M. Effect of light intensity and wavelengths on ascorbic acid content and the antioxidant system in tomato fruit grown in vitro[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 274: 109673.
- [51] 寇尔丰, 邓沛生, 宋世威, 等. 转光膜在设施园艺生产中应用的研究进展[J]. 北方园艺, 2018(1): 155–159.
- [52] 文莲莲, 张雪松, 陈小文, 等. 转光棚膜覆盖对日光温室光环境及番茄生长发育和产量品质的影响[J]. 北方园艺, 2019(13): 82–86.
- [53] 邵佳丽. 转光棚膜对番茄生长、果实产量及品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [54] 闫 妍, 于贤昌, 廉世勋, 等. 宽谱带转光棚膜力

- 学与光学特性及其提高番茄产量和品质[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 255-262.
- [55] 李 岩, 米庆华, 史庆华, 等. 不同工艺转光膜对日光温室环境及番茄生长发育的影响[J]. 中国蔬菜, 2016(9): 34-39.
- [56] 高亚新, 李恭峰, 马万成, 等. 新型稀土转光膜对日光温室环境及番茄生长和果实品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(12): 78-84.
- [57] 孙士景, 周 清, 范冰冰, 等. 散射光薄膜对番茄生长和果实品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2016(5): 22-26.
- [58] 刘保林, 张肖凌, 王致和, 等. 光质和温度对日光温室番茄生长发育及产量品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30): 10452-10455.
- [59] 于经纬, 罗博特, 岳钉伊. 不同 CO₂ 浓度与 LED 补光组合对番茄果实品质的影响[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(8): 41-42.
- [60] 汪晓宇, 郭 宁, 刘长梅, 等. CO₂ 加富与 LED 补光对樱桃番茄产量、品质及挥发性物质含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(23): 146-152.
- [61] 岳钉伊, 张 静, 赵建涛, 等. 增施 CO₂ 与 LED 补光对番茄果实品质及挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 124-130.
- [62] 李慧霞, 尚春明, 杨 瑞, 等. 增施 CO₂ 和补光对番茄生长和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2020(1): 1-6.
- [63] 蔡 华. 不同光质和营养液耦合对番茄生长、产量及品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.