

光环境对蔬菜幼苗生理特性的影响研究进展

郭佩仪, 宋世威*

华南农业大学, 广东 广州

Email: peiyiguo2019@163.com, *swsong@scau.edu.cn

收稿日期: 2021年7月5日; 录用日期: 2021年8月3日; 发布日期: 2021年8月11日

摘 要

蔬菜幼苗的健壮程度决定了后续植株的生长发育和产量品质形成。光环境调控(光质、光强、光周期等)对培育蔬菜壮苗具有重要影响。本文综述了光环境对蔬菜壮苗、光合特性、矿质养分吸收、内源激素和抗逆性等方面的影响, 阐述了光环境对幼苗生理特性的影响, 以及光环境与其他环境因子协同调控蔬菜壮苗的作用, 最后提出了研究展望。

关键词

光环境, 蔬菜幼苗, 生理特性

Research Advance on the Effects of Light Environment on Physiological Characteristics of Vegetable Seedlings

Peiyi Guo, Shiwei Song*

South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

Email: peiyiguo2019@163.com, *swsong@scau.edu.cn

Received: Jul. 5th, 2021; accepted: Aug. 3rd, 2021; published: Aug. 11th, 2021

Abstract

The robust degree of vegetable seedlings determines the growth and development of subsequent plants and the formation of yield and quality. The regulation of light environment (light quality, light intensity, photoperiod, etc.) has an important impact on the cultivation of strong vegetable

*通讯作者。

seedlings. In this paper, the effects of light environment on strong vegetable seedlings, photosynthetic characteristics, mineral nutrient absorption, endogenous hormones and stress resistance were reviewed. The effects of light environment on physiological characteristics of seedlings and the synergistic regulation of light environment and other environmental factors on strong vegetable seedlings were expounded. Finally, the research prospect was put forward.

Keywords

Light Environment, Vegetable Seedling, Physiological Characteristics

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光是植物生长最重要的环境因子之一,除了为光合作用提供能量外,光还作为一种调节信号参与植株的整个生长发育进程。植株并不能吸收全部的太阳辐射光谱,起作用的主要是可见光部分的红光和蓝光。人们主要通过光质、光强和光周期等来调控植物的生长发育。与传统的荧光灯和高压钠灯相比,发光二极管(LED)属于冷光源,具有高光效、发热少、耗能低、寿命长等特点,在植物光环境调控中广泛使用。

蔬菜幼苗质量和健壮程度能决定成苗后的生长发育及果实产量等因素,因此培育壮苗是蔬菜生产上的一个重要环节。目前已有大量文献对蔬菜幼苗在不同光强[1][2]、不同光质及组合光[3][4]、不同补光时段[5]、补光时长[6]和夜间补光[7]等处理下的形态和生理特征进行研究;并有光环境对蔬菜等作物生长调控及对蔬菜育苗的调控技术和应用的综述报道[8][9][10]。目前还未见光环境对蔬菜幼苗生理特性影响的综述。

本文综述了光环境对蔬菜壮苗、光合特性、矿质养分吸收、内源激素和抗逆性等方面的影响,阐述了光环境对幼苗生理特性影响的研究进展,以为蔬菜育苗的光环境调控提供理论参考;同时讨论了光环境与其它环境因子协同调控蔬菜壮苗的作用,最后提出了本领域的研究展望。

2. 光环境对蔬菜壮苗的影响

弱光 and 高温等不良环境易使蔬菜幼苗发生徒长,徒长苗定植后容易造成植株减产、花期延长或者早衰等问题[11],甚至降低果实品质和改变果实性状[12]。通过光环境控制幼苗徒长是一种节能环保和简单易行的方法。

不同光质主要通过影响植株体内的生长激素含量来调控茎部的伸长生长[13]。许多研究表明,组合光比单色光更有利于培育蔬菜壮苗。红蓝组合光下,大多数蔬菜种类普遍呈现株高和比叶面积下降而茎粗逐渐增加的趋势,且植株的生长状态均好于单色光[14]。除了可见光,组合光中添加远红光还可以显著提高西瓜和黄瓜幼苗的茎粗,但也会促进下胚轴的伸长,且远红光对不同蔬菜种类的紧实度影响不同[15]。

弱光和强光都会限制植物有效合成光合产物,生产中可以通过遮光和补光来改善。例如西瓜幼苗在 1/2 遮光处理下发生徒长,而 1/3 遮光处理效果最佳,壮苗指数也最高[16]。弱光环境下补光提高了番茄幼苗的叶面积和生物量[17],在夜间补光可以有效抑制番茄幼苗徒长,促进茎粗加粗和叶面积的增大等[18]。

在蔬菜育苗上,适当延长光周期可以提高壮苗指数,并缩短育苗周期[19][20][21]。此外,暗期打断、间歇光以及暗期延时补光等都是属于光周期的调控方法[22]。在番茄幼苗进入暗期前给予一定强度的远红光照射可以精确调控其株高[23];或利用红光在黄瓜和番茄幼苗生长暗期进行多点打断均能显著抑制茎的伸长,提高壮苗指数[22]。有研究发现,与连续光照相比,利用脉冲光照射的蔬菜幼苗生长发育效果与连续光相似,且达到节能的效果,可在人工照明环境使用[24]。用组合光 8R1G1B 对黄瓜幼苗进行暗期补光,可以显著增加茎粗、生物量、叶面积和壮苗指数等[7]。对黄瓜幼苗进行暗期不同时长补光和不同光质的交互作用试验,结果表明 9R1B 组合光补光 4 小时或者 7R3B 补光 2 小时均能显著降低苗高、增加茎粗和叶绿素含量来提高幼苗健壮程度[25]。

3. 光环境对蔬菜幼苗光合特性的影响

适当比例的红蓝组合光比单色红蓝光更能促进蔬菜幼苗的生长和光合性能的提高,但不同的蔬菜种类对光质比例的响应不同。如 91%R 9%B 组合光比单色红光更能显著提高生菜、菠菜和羽衣甘蓝等叶菜幼苗叶片的叶绿素和类胡萝卜素含量[26][27];加入少量 UVA 的 3R1B 或者 5R5B 红蓝组合光均能增加蔬菜幼苗叶面积、比叶重和 SPAD 值,降低叶形指数等[28][29],原因可能在于红蓝组合光促进了卡尔文循环中的多种关键酶的表达和活性的上调[30]。黄瓜和结球甘蓝幼苗在红蓝组合光下的 PSII (光系统 II) 开放程度和转化光能效率较高,能提高叶片净光合速率和水分利用率,减少水分蒸腾,利于作物进行光合作用[31]。

蓝光和近紫外光主要调节光合作用的各种酶活性和调控气孔开合,且气孔导度主要受到蓝光的特异性诱导[32]。最佳红蓝组合光 7R3B 能显著增加西瓜幼苗叶片的气孔密度、气孔开放程度和气孔宽度,提高光合速率,促进幼苗有机物的积累[33]。与单色红光和荧光相比,在蓝光和红蓝光照射下的番茄幼苗叶片的光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度得到了显著提高,说明蓝光对提高植物光合能力是必要的[14]。红蓝光基础上添加紫光能增加辣椒幼苗叶片吸收和捕获光量子的能力,提高放氧复合体和 PSII 电子传递活性,从而优化光能分配[34]。

4. 光环境对蔬菜幼苗矿质养分吸收的影响

不同光环境可以触发植株的光信号受体,间接调节植物对矿质营养的吸收,但光如何影响和调节植物吸收养分离子的机制较为复杂,还需要进一步研究。

一般来说,低温弱光等不良环境不利于植物矿质元素的积累,且对不同的矿质元素离子的吸收和积累影响程度不同[35]。低温弱光导致植物对大量和微量元素的吸收下降或阻碍其向叶片运输,比如黄瓜幼苗在亚环境下生长,除了 K 和 Zn,其余矿质元素含量均降低,影响植物正常生长,而通过光环境调控可以提高植物对矿物元素的吸收[36]。有研究认为补光时间对提高甜椒矿质元素含量作用较大,而光质则无影响[37]。与不补光对比,对日光温室番茄在揭帘前和盖帘后补充不同时长的红蓝组合光均能不同程度地提高番茄果实中各矿质元素的含量[38]。研究也发现,95%R 5%B 组合光下能显著提高羽衣甘蓝的 K 积累量[39];RGB 和 RGW 组合光能促进番茄和萝卜对矿质元素 N、Mg 和 Zn 含量的积累[40]。合理应用光环境调控实现植物对矿质元素的吸收,可以提高植物抗逆性和营养品质等。

5. 光环境对蔬菜幼苗内源激素的影响

光质能直接或间接地影响植物激素信号合成途径。关于光质对作物激素含量的影响已有大量研究报告[41][42],包括单色光、不同比例组合光、红光与远红光不同比例的共同作用等带来的不同生长效应。

不同 LED 单色光对植物叶片和下胚轴中内源激素的含量有着极显著的影响,从而影响叶片生长和下胚轴长度。红光通过促进黄瓜幼苗叶片中 IAA 向下胚轴的极性运输,来降低叶片中的 IAA 含量以促进

CKs 的合成, 从而促进叶片长大, 而蓝光效应与之相反, 但蓝光处理过的幼苗下胚轴 GA_3 含量显著降低以此来降低株高[43]。另一方面, 单色蓝光能促进黄瓜幼苗中 POD 和 IAA 氧化酶活性, 二者对内源 IAA 进行氧化分解作用, 使内源 IAA 的含量降低, 从而抑制了黄瓜幼苗节间的伸长[41]。红蓝或者红蓝黄等复合光能有效改变植物幼苗体内的激素含量, 提高 GA_3 和 IAA 的含量, 降低 ABA 的含量[44]。此外, 对黄瓜幼苗进行夜间延时补充照射白光 6 小时, 可以提高叶片中 GA_3 、IAA 和玉米素核苷(ZR)的含量且降低 ABA 含量, 达到延缓叶片衰老、促进幼苗生长的效果[45]。

6. 光环境对蔬菜幼苗抗逆性的影响

植物体内 CAT、SOD 和 POD 等抗氧化酶, 能有效阻止活性氧的积累, 减缓植株衰老速度。有研究表明, 单色红光、紫光和蓝光处理黄瓜叶片中的 G-POD 活性较白光处理高, 提高了黄瓜幼苗叶片的抗氧化性能[46]。在设施工厂化育苗中, 也会添加适当比例的红光和紫光来增强果菜类蔬菜幼苗抗旱性、抗寒性或抗病性, 但长期照射单色红光不利于幼苗的生长和光合作用。光质能调控作物抗氧化代谢水平, 但不同光质和最佳光质配比的作用机理还需要进一步研究。

在植物抗性方面, 与白光相比, 在单色红光下生长的黄瓜幼苗能降低活性氧的积累, 获得较高的抗旱性[47]。经低温处理后, 5R1B 组合光照射下的黄瓜和辣椒幼苗抗寒性最佳, SOD、POD 和 CAT 活性最高[48] [49]。其次, 在红蓝组合光中加入适当比例的紫光, 可以提高番茄幼苗中的 SOD 和 POD 活性, 以增强植株抗逆性[50]。在光照时长方面, 使用光强为 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 LED 红光进行暗期延时补光, 可以提高辣椒幼苗叶片多酚、类黄酮含量来提高作物对不良环境的适应性, 利于培育壮苗[51]; 8 小时短日照照射会使黄瓜 CAT 活性降低和 POD 活性增加, 即加速黄瓜植株衰老和降低其抗氧化水平, 而适当延长光照时间能提高黄瓜幼苗抗寒性和壮苗指数[52] [53]。

除了抗氧化酶, 植株体内的化学物质(可溶性糖、可溶性蛋白、硝酸盐和 Vc 等)含量在一定程度上也能体现出植株对不良环境的适应能力。有研究表明, 红光处理下, 西瓜幼苗的可溶性糖和 Vc 含量最高、硝酸盐含量最低, 还能获得较高的壮苗指数[54]。红蓝组合光能提高番茄幼苗氮代谢的多种相关酶的转录水平和部分关键酶活性, 促进对氮素的吸收和形成可溶性蛋白, 加速有机物质的积累, 利于番茄幼苗生长[55]。普遍认为, 适宜比例的组合光质有利于提高大部分蔬菜的幼苗品质。

7. 总结与展望

合理应用光环境调节可以缩短蔬菜育苗周期、提高幼苗品质和壮苗指数等。不同的光质和光强组合处理下的生菜的光合特性、生理特性会有所不同, 但培育壮苗的效果差异不显著, 可以选择较低光强的组合光进行处理以节约生产成本[56]。光强和光周期的组合处理一般与日辐射总量(DLI)有关, 不同蔬菜和品种的最佳生长 DLI 不同, 通过试验可以找到高效低成本的育苗光环境。

除了光环境之外, 营养环境、温度、湿度和气体环境等都会影响幼苗的健壮程度。LED 光质、光强和水分灌溉量共同影响番茄幼苗生长, 如 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 1R1B 组合光处理下, 每 4 天浇灌一次营养液, 每株供水量达 150 ml 条件下的幼苗生长健壮[57]。通常来说, 较大的昼夜温差和光辐射共同作用能促进植株进行干物质的积累, 促进茎粗加粗, 还能防止幼苗徒长[58]。在全人工光植物工厂中, 探究植物在最适的光环境下的营养液配方、浓度或 EC 值有利于发现植物生长和光合作用的潜能[59] [60]。

生产上通过人工补光的措施来培育蔬菜壮苗, 一般通过缩短光照周期、降低光照强度和使用间歇光等提高光能利用效率。光环境与其它环境因子共同影响着蔬菜幼苗的生长, 但目前大多数研究集中于单一的光环境特别是光质处理上。因此后续研究应更多关注育苗环境的多因素协同机制, 将种苗的外观形态、壮苗指数等结合生理特性综合评价育苗质量。

基金项目

国家重点研发计划(2019YFD1001901); 广州市农村科技特派员项目(GZKTP202026); 广东省重点领域研发计划(2020B0202010006); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队项目(2021KJ131)。

参考文献

- [1] 何伟明, 刘庞源, 武占会, 等. 不同光强与光质处理下对番茄幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2017, 41(19): 72-75.
- [2] Zhang, Y.T., Dong, H., Song, S.W., *et al.* (2020) Morphological and Physiological Responses of Cucumber Seedlings to Supplemental LED Light under Extremely Low Irradiance. *Agronomy*, **10**, 1698. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111698>
- [3] 杜玉芬, 高志, 狄清华, 等. LED 红、蓝、白组合光对茄子幼苗质量和果皮品质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3175-3182.
- [4] Liang, Y., Kang, C.Q., Kaiser, E., *et al.* (2021) Red/Blue Light Ratios Induce Morphology and Physiology Alterations Differently in Cucumber and Tomato. *Scientia Horticulturae*, **281**, Article ID: 109995. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109995>
- [5] 李晓慧, 王一迪, 班甜甜, 等. LED 补光对番茄幼苗形态特征及相关生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2020, 44(4): 1-6.
- [6] 唐中祺. 不同补光时长对辣椒幼苗生长生理的影响及其转录组分析研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [7] 朱鹿坤, 陈俊琴, 赵雪雅, 等. 红蓝绿 LED 延时补光对日光温室黄瓜育苗的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(4): 402-409.
- [8] 林魁, 黄枝, 金心怡, 等. 植物生长光调控应用研究进展[J]. 热带作物学报, 2017, 38(6): 1163-1170.
- [9] 邵丽, 杨小龙, 王蕊, 等. 设施栽培蔬菜光环境及调控研究进展[J]. 中国蔬菜, 2018, 38(8): 19-26.
- [10] 何蔚, 杨振超, 蔡华, 等. 光质调控蔬菜作物生长和形态研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(2): 9-18.
- [11] 李雅旻, 郑胤建, 谭星, 等. 不同光质补光对番茄、黄瓜幼苗生长的影响[J]. 照明工程学报, 2016, 27(5): 68-71.
- [12] 明村豪, 蒋芳玲, 胡宏敏, 等. 幼苗徒长程度对黄瓜植株生长发育及产量品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2011, 38(4): 29-34.
- [13] Feng, S.H., Martinez, C., Gusmaroli, G., *et al.* (2008) Coordinated Regulation of Arabidopsis Thaliana Development by Light and Gibberellins. *Nature*, **451**, 475-479. <https://doi.org/10.1038/nature06448>
- [14] 刘慧莲, 姜倩倩. 不同 LED 光质对番茄幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2020, 44(18): 38-42.
- [15] Hwang, H., An, S., Lee, B., *et al.* (2020) Improvement of Growth and Morphology of Vegetable Seedlings with Supplemental Far-Red Enriched LED Lights in a Plant Factory. *Horticulturae*, **6**, 109. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040109>
- [16] 苏娜娜, 邬奇, 崔瑾. 光环境调控技术在蔬菜工厂化育苗中的应用及前景[J]. 中国蔬菜, 2013, 38(4): 14-19.
- [17] 韩文, 郭鹏飞, 张坤, 等. 弱光条件下不同补光方式对设施番茄幼苗生长的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(4): 73-81.
- [18] 杨玉凯, 林碧英, 申宝营, 等. LED 夜间补光对番茄幼苗生长及光合作用的影响[J]. 亚热带农业研究, 2018, 14(4): 247-252.
- [19] 吴雪霞, 尚静, 张圣美, 等. 不同光周期对丝瓜幼苗生长生理及其内源激素含量和性别分化的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(10): 1812-1818.
- [20] 文莲莲, 李岩, 张聘丘, 等. 冬季温室补光时长对番茄幼苗生长、光合特性及碳代谢的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(9): 1490-1498.
- [21] 韩文, 郭鹏飞, 张坤, 等. 夜间延时补光调控对番茄幼苗生长及根系构型的影响[J]. 园艺与种苗, 2018, 38(2): 7-11+27.
- [22] 余新, 钟辉丽, 杨振超, 等. 光环境调控在蔬菜育苗中的应用研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(5): 8-10.
- [23] 曹凯, 于捷, 叶林, 等. 暗前适宜 LED 远红光光照强度促进设施番茄种苗生长发育[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 171-176.
- [24] Song, S.W., Kusuma, P., Carvalho, S.D., *et al.* (2019) Manipulation of Seedling Traits with Pulsed Light in Closed

Controlled Environments. *Environmental & Experimental Botany*, **166**, Article ID: 103803.

<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103803>

- [25] 申宝营, 李毅念, 赵三琴, 等. 暗期补光对黄瓜幼苗形态调节效果及综合评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 201-208.
- [26] Hernández, R., Eguchi, T., Deveci, M., *et al.* (2016) Tomato Seedling Physiological Responses under Different Percentages of Blue and Red Photon Flux Ratios Using LEDs and Cool White Fluorescent Lamps. *Scientia Horticulturae*, **213**, 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.005>
- [27] Naznin, M.T., Lefsrud, M., Gravel, V., *et al.* (2019) Blue Light Added with Red LEDs Enhance Growth Characteristics, Pigments Content, and Antioxidant Capacity in Lettuce, Spinach, Kale, Basil, and Sweet Pepper in a Controlled Environment. *Plants*, **8**, 93. <https://doi.org/10.3390/plants8040093>
- [28] 王丽伟, 李岩, 辛国凤, 等. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长和光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1595-1602.
- [29] Jeong, H.W., Lee, H.R., Kim, H.M., *et al.* (2020) Using Light Quality for Growth Control of Cucumber Seedlings in Closed-Type Plant Production System. *Plants*, **9**, 639. <https://doi.org/10.3390/plants9050639>
- [30] Li, Y., Xin, G.F., Liu, C., *et al.* (2020) Effects of Red and Blue Light on Leaf Anatomy, CO₂ Assimilation, and the Photosynthetic Electron Transport Capacity of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.) Seedlings. *BMC Plant Biology*, **20**, 318. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02523-z>
- [31] 曹刚. 不同 LED 光质对黄瓜和结球甘蓝苗期生长、光合特性及内源激素的影响[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2013.
- [32] 张勇, 叶芝兰, 杨峰, 等. 不同光质配比对大豆幼苗形态及光合生理参数的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 343-348.
- [33] 李小娥, 黄远, 苗田田, 等. 不同红蓝 LED 组合光源对西瓜幼苗生长和生理参数的影响[J]. 中国瓜菜, 2015, 28(3): 14-17.
- [34] 罗鑫辉, 刘明月, 刘玉兵, 等. 光质对辣椒幼苗生长、光合特性及氮代谢的影响[J]. 中国蔬菜, 2020, 38(8): 33-40.
- [35] 杨延杰, 李天来, 林多, 等. 弱光逆境对主要果菜生长发育影响的研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2004, 4(6): 26-29.
- [36] 刘洁, 阎世江, 张继宁, 等. 低温弱光对黄瓜矿质元素含量的影响[J]. 河北科技师范学院学报, 2015, 29(4): 18-22.
- [37] 段青青, 张禄祺, 张自坤. 不同生育期补光对温室甜椒生长、产量及品质的影响[J]. 植物生理学报, 2021, 57(4): 950-962.
- [38] 王瑞, 马姣艳, 吴倩, 等. 不同时段补光对日光温室番茄果实中矿质元素积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(19): 125-129.
- [39] Metallo, R.M., Kopsell, D.A., Sams, C.E., *et al.* (2018) Influence of Blue/Red VS. White LED Light Treatments on Biomass, Shoot Morphology, and Quality Parameters of Hydroponically Grown Kale. *Scientia Horticulturae*, **235**, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.061>
- [40] Peng, Q. and Zhou, Q. (2010) Effects of Enhanced UV-B Radiation on the Distribution of Mineral Elements in Soybean (*Glycine Max*) Seedlings. *Chemosphere*, **78**, 859-863. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.050>
- [41] 孙莉莉, 于志强, 赫兰保, 等. 不同光质对矮生黄瓜幼苗内源激素的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(16): 96-101.
- [42] Lau, O.S., and Deng, X.W. (2010) Plant Hormone Signaling Lightens up: Integrators of Light and Hormones. *Current Opinion in Plant Biology*, **13**, 571-577. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2010.07.001>
- [43] 苏娜娜, 邬奇, 崔瑾. LED 单色光质对黄瓜幼苗叶片和下胚轴中内源激素含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(1): 45-49.
- [44] 于海业, 孔丽娟, 刘爽, 等. 植物生产的光环境因子调控应用综述[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 1-9.
- [45] 李海云, 刘焕红. 夜间补光对黄瓜幼苗激素含量及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(16): 74-78.
- [46] 王虹, 姜玉萍, 师恺, 等. 光质对黄瓜叶片衰老与抗氧化酶系统的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 529-534.
- [47] 张晓梅, 胡超轶, 刘涛, 等. 不同光质对黄瓜幼苗抗旱性的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(1): 58-63.
- [48] 韦峰, 祁娟霞, 李佳梅, 等. 不同光质对辣椒种子萌发、幼苗生长及抗寒性的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(11): 1932-1938.
- [49] 刘卫成, 韦峰, 韩泽宇, 等. 不同光质对黄瓜种子发芽、幼苗生长及抗寒性的影响[J]. 北方园艺, 2016, 44(19): 59-62.

- [50] 刘振威, 孙丽, 方婷婷, 等. 不同光质及组合对番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(5): 141-145.
- [51] 郑亮, 邢文鑫, 董海泉, 等. LED 苗期暗期补光对茄果类蔬菜发育和生理的影响[J]. 中国蔬菜, 2012, 38(18): 111-115.
- [52] 文明玲, 牛应泽, 刘小俊, 等. 光周期处理对黄瓜花性分化及其氧化酶活性影响[J]. 长江蔬菜, 2007, 24(4): 46-48.
- [53] 李海云, 杨玉杰. 不同光周期对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(4): 115-119.
- [54] 张清华, 陈昆, 赵跃锋. 不同光质对西瓜幼苗光合特性、生理品质及保护酶系统的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(10): 1615-1617.
- [55] 孙娜, 魏珉, 李岩, 等. 光质对番茄幼苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(1): 80-88.
- [56] 严宗山, 张想平, 王蕾, 等. 不同光强和光质对管道水培生菜生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2020, 44(21): 15-20.
- [57] 杨亚娜. 光环境及水分调控对樱桃番茄生长发育的影响[D]: [硕士学位论文]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
- [58] 李建明, 邹志荣, 黄志. 温光驱动甜瓜壮苗指数模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 73(1): 149-152.
- [59] 李政璞, 佟静, 王素娜, 等. 植物工厂条件下不同营养液配方对韭菜生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(17): 153-157.
- [60] 王龙, 闫征南, 杨延杰, 等. 不同浓度有机营养液对黄瓜幼苗质量及后期生长的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 26-33.