

周瑶, 毛莲珍, 孙颖, 沈逸雨, 邬伟盛, 刘周斌. 连续红、蓝光照对辣椒幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 广东农业科学, 2023, 50 (11): 78-88.

连续红、蓝光照对辣椒幼苗生长及生理特性的影响

周瑶, 毛莲珍, 孙颖, 沈逸雨, 邬伟盛, 刘周斌

(湖南农业大学园艺学院 / 园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心 /
湖南省蔬菜生物重点实验室, 湖南长沙 410128)

摘要:【目的】现代蔬菜设施栽培中, 蔬菜幼苗的品质对后续种植生产的经济效益起着非常重要的作用。连续光照是人工光植物工厂中常见的特殊光照模式, 探索连续光照结合光质调控辣椒幼苗生长发育的影响, 为高效提高辣椒幼苗抗性提供重要技术参考。【方法】以辣椒骨干亲本‘6421’为试验材料, 共设置 6 个光处理: 正常白光照射 (CW)、正常蓝光照射 (CB)、正常红光照射 (CR)、连续白光照射 (TW)、连续蓝光照射 (TB) 及连续红光照射 (TR), 研究连续光周期处理结合红光、蓝光对辣椒幼苗生长及生理特性的影响。【结果】(1) TR 处理显著增加辣椒幼苗的株高和茎粗, 比 CW 处理分别增加 20.5% 和 10.6%。TR 处理后壮苗指数极显著上升 2.38 倍, 而 TB 处理使辣椒幼苗的株高和茎粗显著降低 17.1% 和 14.3%, 根冠比显著升高 2.62 倍。(2) TR、TB 处理辣椒幼苗叶片的净光合速率 (P_n) 和气孔导度 (G_s) 无明显差异, 但 TB 处理的蒸腾速率 (T_r) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 均显著低于 TR 处理, 比 CW 处理显著降低 62.5% 和 51.1%。不同光处理后辣椒幼苗叶片的叶绿素荧光参数则与之相反, TB 处理辣椒幼苗叶片的最大光化学效率 (F_v/F_m)、PSII 潜在活性 (F_v/F_0)、非光化学淬灭系数 (NPQ)、光化学淬灭系数 (q_P) 值均显著高于 TR 处理, 其中 TB、TR 处理的 q_P 分别较 CW 处理显著升高 36.1%、26.1%。(3) 连续红光和连续蓝光处理后辣椒幼苗的抗氧化酶活性和渗透物质有明显差异。TB 处理辣椒幼苗叶片的 SOD、POD 及 CAT 活性显著升高, TR 处理后辣椒幼苗叶片的 POD、CAT 活性也显著升高, 而 TB 和 TR 处理后辣椒叶片的 MDA 含量显著低于 CW 处理 55%~56%。【结论】连续光照条件对辣椒幼苗期的生长发育具有一定积极作用, 同时连续光照射结合红光、蓝光处理下辣椒幼苗的抗氧化酶活性和渗透物质均有不同程度提高, 以更好地对抗光胁迫环境, 提高了辣椒幼苗的适应性。

关键词: 连续光照; 光质; 辣椒; 光合特性; 设施栽培; 酶活性

中图分类号: S641.301

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2023) 11-0078-11

Effects of Continuous Red and Blue Light on Growth and Physiological Characteristics of Pepper Seedlings

ZHOU Yao, MAO Lianzhen, SUN Ying, SHEN Yiyu, WU Weisheng, LIU Zhoubin
(College of Horticulture, Hunan Agricultural University / Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education / Key Laboratory of Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha 410128, China)

Abstract: 【Objective】In modern vegetable facility cultivation, the quality of vegetable seedlings plays a very important role in the economic benefits of subsequent agricultural production. Continuous light is a common special light

收稿日期: 2023-09-30

基金项目: 国家自然科学基金 (32302574); 云南省科技计划项目 (202204BI090004)

作者简介: 周瑶 (1997—), 女, 土家族, 在读硕士生, 研究方向为辣椒设施栽培, E-mail: Y17_Y11@163.com

通信作者: 刘周斌 (1990—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为辣椒重要性状关键基因挖掘与功能分析, E-mail:

hnlzb2020@hunau.edu.cn

mode in artificial light plant factory. Exploring the effect of continuous light combined with light quality on the growth and development of pepper seedlings could provide an important technical reference for efficiently improving the resistance of pepper seedlings. 【 Method 】 The pepper backbone parent ‘6421’ was used as the test material, and 6 light treatment groups were set up: normal white light irradiation group (CW), normal blue light irradiation group (CB), normal red light irradiation group (CR), continuous white light irradiation group (TW), continuous blue light irradiation group (TB) and continuous red light irradiation group (TR). The effects of continuous photoperiod treatment combined with red and blue light on the growth and physiological characteristics of pepper seedlings were studied. 【 Result 】 (1) TR significantly increased the plant height and stem diameter of pepper seedlings by 20.5% and 10.6%, respectively, compared with the CW group. After TR treatment, the seedling index increased significantly by 2.38 times, while TB significantly reduced the plant height and stem diameter of pepper seedlings by 17.1% and 14.3%, and the root–shoot ratio increased significantly by 2.62 times. (2) There was no significant difference in Pn and Gs of pepper seedling leaves between TR and TB, but Tr and Ci of TB were significantly lower than those of TR. Compared with CW, Tr and Ci of TB were significantly reduced by 62.5% and 51.1%. The chlorophyll fluorescence parameters of pepper seedling leaves showed opposite results after different light treatments. The Fv/Fm, Fv/Fo, NPQ and qP values of pepper seedling leaves in TB group were significantly higher than those in TR group. The qP of TB and TR was significantly higher than that of CW, increasing by 36.1% and 26.1%, respectively. (3) The antioxidant enzyme activity and osmotic substances of pepper seedlings were significantly different after continuous red light treatment and continuous blue light treatment. TB significantly increased SOD, POD and CAT in leaves of pepper seedlings. The POD and CAT activities of pepper seedling leaves were also significantly increased after TR treatment, while the MDA content of pepper leaves after TB and TR treatments was significantly reduced by 55%–56% compared with that of CW. 【 Conclusion 】 Continuous light conditions have a positive effect on the growth and development of pepper seedlings at the seedling stage, and the antioxidant enzyme activity and osmotic substances of pepper seedlings under continuous light irradiation combined with monochromatic red and monochromatic blue light treatments increase to different degrees to better counteract the light stress environment and improve the adaptability of pepper seedlings.

Key words: continuous light; light quality; pepper; photosynthetic characteristics; facility cultivation; enzyme activity

【研究意义】辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 是我国重要的蔬菜和经济作物^[1], 其富含的维生素 C、β-胡萝卜素、钙等矿物质^[2]具有抗氧化、降低血脂、延缓衰老、促进消化等功效。现代蔬菜设施栽培中, 蔬菜幼苗的品质对农业生产的经济效益影响极大, 如何有效培养高品质的幼苗已成为农业生产的热点问题。在设施农业生产中, LED 光源凭借其光谱可调性强、节能环保、高效便捷、超长寿命等显著优点逐渐取代传统荧光灯的地位, 不仅能为农作物的生长提供理想的光环境, 还可以有效提高植物整体品质, 因此在设施人工光栽培得到广泛应用^[3-4]。

【前人研究进展】光是影响植物生长发育的重要环境因素之一, 光强、光质及光周期均影响植物的形态建成和光合特性^[5-6]。研究表明, 连续光周期对蔬菜的生长发育和产量品质具有一定的积极作用^[7-9]。马绍英等^[10]研究发现, 葡萄幼苗期减弱光照强度和缩短光周期均会影响葡萄幼苗的农艺性状, 导致有机物含量下降; 而随着光周期的增加, 茄子幼苗的株高、茎粗、根冠比等表型明显升高^[11]。就光质而言, 蓝光和红光因

其可见光波长在植物的光合有效辐射范围内, 通常被视为植物生长的最佳光源^[12]。前人在水稻、草莓、莲等多种植物的光质栽培试验结果证实红光能促进植物生长、蓝光有抑制植株生长的作用^[13-16]。在不结球白菜和白魔芋研究中, 红光照射显著促进了不结球白菜的根系发育和白魔芋壮苗指数的增加^[17-18]。而早期在烟草、油麦菜、葡萄、菊花等的研究则指出蓝光可以有效提高植物根系的活力^[19-22]。光合作用是植物合成有机物质的主要途径, 叶片作为接收外界光信号的主要器官, 也是进行光合作用的重要部位。叶绿素荧光作为植物光合作用对环境适应性的探针, 通过其测定植物对光能的吸收和转化以了解植物体内光合响应机制的调节过程^[23]。目前有关光环境对植物光合响应机制已有很多报道, 但不同园艺植物对不同光环境的光合响应存在差异, 适宜的光环境不仅有利于提高植物叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等光合参数, 还有利于植物产量和品质的提升。对辣椒^[24]、生菜^[25]的研究表明延长光周期增加了植物叶片的 Pn 等光合参数。谢景等^[26]研究表明, 黄瓜幼苗在蓝光

处理下净光合速率 (P_n) 较高, 而青蒜苗在红光处理下 P_n 显著高于蓝光处理。最大光化学效率 (F_v/F_m) 反映光化学效率的高低, 常用来表征植物叶片 PS II 原初光能转换效率, 采用 LED 光质处理莴笋和黄瓜发现红光处理后叶片 F_v/F_m 显著高于蓝光处理, 表明红光照射能有效促进叶片的光合作用^[26-28]。

【本研究切入点】本试验通过在单色红、蓝光影响植株生长的基础上, 组合光强、光周期研究辣椒骨干亲本‘6421’幼苗的光形态建成、光合作用等生长响应机理。【拟解决的关键问题】通过分析辣椒在连续红、蓝光处理后的光能利用率, 了解辣椒幼苗生长对连续光照的适应性, 寻求最佳的光效能组合, 为辣椒栽培中使用连续光照生产提供重要技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 12 月至 2022 年 12 月在湖南农业大学园艺学院光质培养室进行。供试辣椒材料为湖南农业大学园艺学院辣椒团队提供的骨干亲本‘6421’。

1.2 试验方法

辣椒种子经 55 °C 温水浸泡 25 min 后均匀铺放在有湿润滤纸的培养皿中, 而后置于 28 °C 的人工气候箱恒温培养; 萌发后挑选发芽一致的种子播于装有 121 °C 灭菌后的复合基质的 50 孔育苗盘中, 后放置 (28 ± 2/20 ± 2) °C 和 14 h/10 h (昼/夜) 光周期的条件下生长, 正常肥水管理; 待其长至四叶一心时, 选取长势整齐一致的幼苗移栽至育苗钵。待辣椒缓苗 1 d 后, 选取大小接近的辣椒幼苗进行不同 LED 光处理, 白光 (W)、蓝光 (B) 和红光 (R) 分别与正常光周期 14 h/10 h (CK) 照射组合为正常白光照射 (CW)、正常蓝光照射 (CB) 和正常红光照射 (CR), 与连续光周期 24 h 照射 (T) 组合为连续白光照射 (TW)、连续蓝光照射 (TB) 及连续红光照射 (TR), 共 6 个处理, 每个处理 25 株幼苗, 3 次重复。保持各组冠层光量子通量密度 (PPFD) 在 200 (± 5) $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 昼夜温度 28 (± 2)/20 (± 2) °C, 空气湿度 65 (± 5)%。处理 15 d 后, 选取辣椒幼苗完全展开的功能叶进行取样并测定叶片光合速率、叶绿素荧光等生理生化指标, 每个处理取 6 个样品进

行测定, 取平均值。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植株生长量 每个处理选取 5 株辣椒幼苗, 用直尺测量株高 (指植株基部到生长点的高度), 用游标卡尺测量茎粗 (指子叶上方茎秆的粗度)。参照董桑婕等^[29] 和刘会芳等^[30] 的方法计算植株的壮苗指数及根冠比。

1.3.2 光合速率参数 在晴天 9:00—11:00 使用 LI-6400 (LI-COR, USA) 光合仪器测量辣椒功能叶片的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i), 每个处理测定 3~7 片叶, 取平均值。参考罗鑫辉等^[12] 的方法, 将光合仪器测量设置为红蓝光源, 光强设为 1 000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, CO_2 浓度设为 400 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 。

1.3.3 叶绿素荧光参数 每个处理选取 3~7 片叶进行测定, 取平均值。首先将各处理的辣椒功能叶片置于黑暗中进行 15 min 暗适应后, 再使用 Fluorpen (FP110/D) 手持式叶绿素荧光仪测定辣椒叶片非光化学淬灭系数 (NPQ) 和荧光动力学曲线 (OJIP) 等叶绿素荧光参数, 并参照颀建明等^[31] 的方法计算得出 PS II 潜在活性 F_v/F_o 、PS II 最大光化学效率 F_v/F_m 、光化学淬灭系数 q_P 和非光化学淬灭系数 NPQ。

1.3.4 植株生理生化指标 采用上海茁彩生物科技有限公司生产的试剂盒测定辣椒叶片的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 等抗氧化酶活性以及脯氨酸 (Pro)、抗坏血酸 (ASA)、丙二醛 (MDA) 和可溶性蛋白 (BCA) 等渗透物质含量。

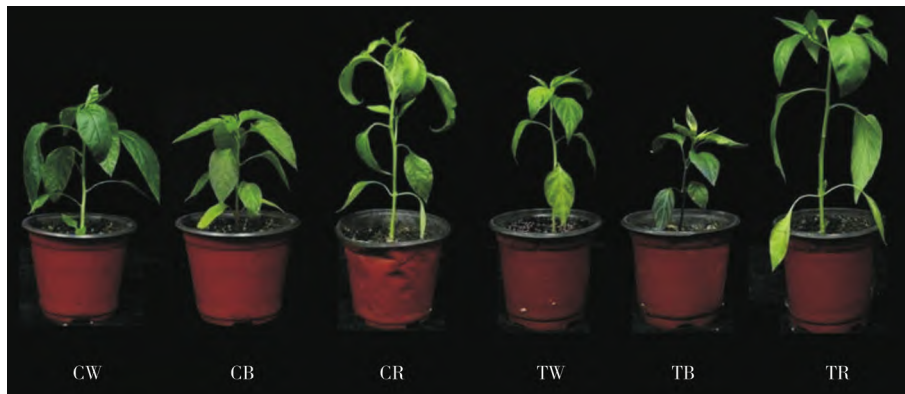
1.4 数据处理

试验数据使用 Microsoft Excel 2021 进行统计分析和作图, 用 DPS 数据处理系统进行二因素方差分析, 多重比较选择最小显著差数法 (LSD 法) 进行方差分析和显著性差异分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同光处理对辣椒幼苗生长量的影响

‘6421’辣椒幼苗在不同光处理下, 其生长量差异显著。由图 1、表 1 可知, 白光、蓝光和红光不同组合处理后辣椒幼苗的株高、茎粗呈现的生长趋势为 $\text{TR} > \text{CR} > \text{CW} > \text{TW} = \text{CB} > \text{TB}$, 其中 CW 处理的株高和茎粗分别为 11.86 cm



光处理 Light treatment

图 1 不同光处理后辣椒幼苗的植株表型

Fig. 1 Plant phenotype of pepper seedlings after different light treatments

表 1 不同光处理对辣椒幼苗生长量的影响

Table 1 Effects of different light treatments on the growth of pepper seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	根冠比 Root-shoot ratio	壮苗指数 Seedling index
CW	11.86 ± 0.15c	2.16 ± 0.02c	0.50 ± 0.02c	0.26 ± 0.01bc
CB	10.63 ± 0.32d	1.91 ± 0.10d	1.12 ± 0.08a	0.20 ± 0.02c
CR	12.46 ± 0.45b	2.53 ± 0.02a	0.46 ± 0.02c	0.54 ± 0.17a
TW	10.73 ± 0.25d	1.84 ± 0.06d	0.80 ± 0.22b	0.38 ± 0.07b
TB	9.83 ± 0.41e	1.85 ± 0.07d	1.31 ± 0.11a	0.24 ± 0.04c
TR	14.24 ± 0.25a	2.39 ± 0.06b	0.34 ± 0.35c	0.62 ± 0.01a

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences ($P < 0.05$).

和 2.16 cm, CR 处理的株高和茎粗比 CW 处理分别显著上升 5.1% 和 17.1%, TR 处理的株高、茎粗比 CW 处理分别显著上升 20.5%、10.6%, 而 TB 处理的的株高和茎粗比 CW 处理分别显著降低 17.1% 和 14.3%; 不同光处理后辣椒幼苗的根冠比存在显著差异, 与 CW 处理相比, CB、TB 处理的根冠比分别显著升高 2.24 倍和 2.62 倍, 而 CR、TR 处理的根冠比与 CW 处理无显著差异。植株壮苗指数的高低常用来评判植株的生长状况, 由图 1 可知, CR、TR 处理的壮苗指数最高, 且与其他处理均存在显著差异, 与 CW 处理相比, CR、TR 处理的壮苗指数分别显著上升 2.07 倍和 2.38 倍。这表明红光处理可显著促进辣椒幼苗生长, 而连续蓝光照射对辣椒幼苗生长有明显抑制作用。

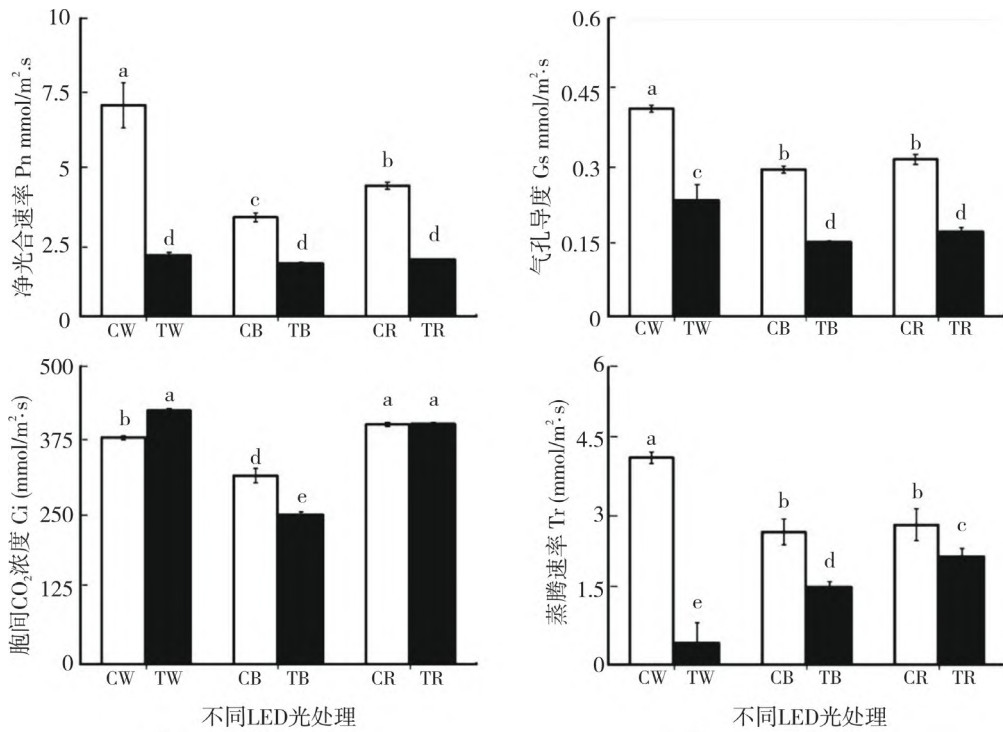
2.2 不同光处理对辣椒幼苗叶片光合速率参数的影响

由图 2 可知, 不同光处理 15 d 后, CW 处理

的辣椒幼苗叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 均最高, 而 TW 处理辣椒叶片的 P_n 、 G_s 和 T_r 呈显著下降趋势。不同光处理后, CB 处理的辣椒幼苗叶片 P_n 比 CR 处理显著降低 24.2%; TB 处理的 P_n 与 TR 处理无显著差异, 但均极显著低于正常光处理组 (CB), T_r 分别显著低于 CW 和 TR 处理 62.5% 和 28.1%; CB 与 CR 处理的 T_r 无显著差异, CB 与 CR 处理、TB 与 TR 处理的辣椒幼苗叶片 G_s 均无明显差异。整体来看, 正常光周期照射 (CK) 的 P_n 、 G_s 、 T_r 均显著高于连续光周期照射 (T) 处理。CR、TR 处理后辣椒幼苗叶片的胞间 CO_2 浓度 (C_i) 均显著高于 CW 处理, 而 CB、TB 处理辣椒叶片的 C_i 分别比 CW 处理显著下降 20.1%、51.1%。

2.3 不同光处理对辣椒幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

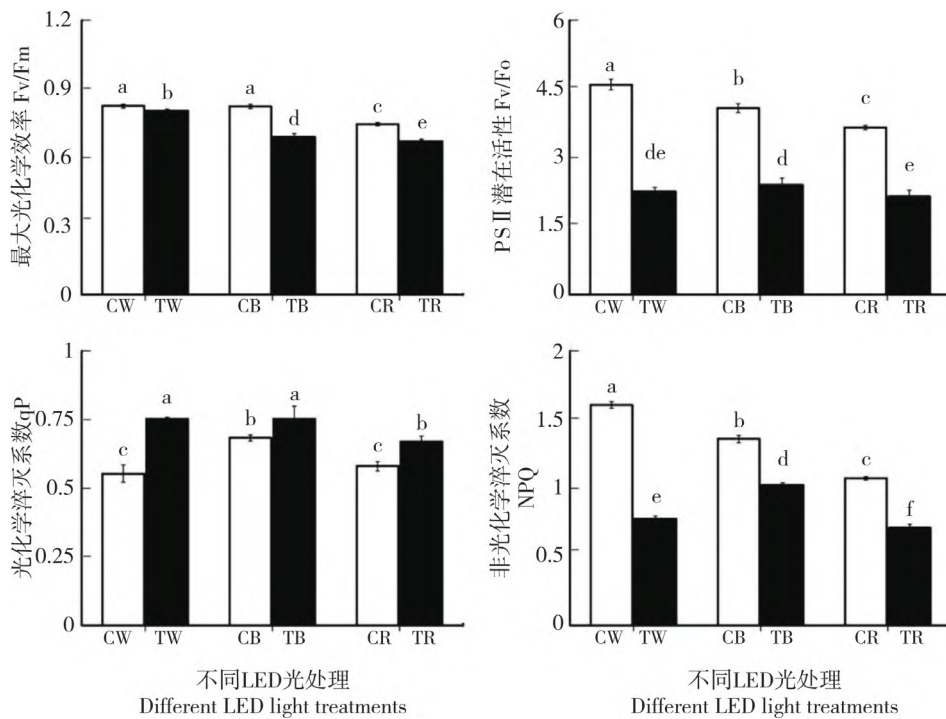
叶绿素荧光参数用来反映植物光合作用机理和光合生理状况的变量或常数值, 被视为植物光合与环境关系的内在探针。不同 LED 光处理下, 辣椒幼苗叶片的叶绿素荧光参数的变化如图 3 所示, 总体看来, 蓝光处理的辣椒叶片叶绿素荧光参数均显著高于红光处理。其中, CW、CB 处理的最大光化学效率 (F_v/F_m) 均约为 0.82、无显著差异, 而 CR、TB、TR 处理的 F_v/F_m 比 CW 处理分别显著下降 9.6%、16.5%、18.6%; TB、TR 处理的 PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 分别比 CW 处理降低 47.8% 和 53.4%, 而 CB、TB 处理的 F_v/F_o 均分别为 CR、TR 处理的 1.12 倍; 蓝光处理后辣椒幼苗叶片的非光化学淬灭系数 (NPQ) 显著高于红光处理, CB 处理为 CR 处理的 1.27



图柱上小写英文字母不同者表示差异显著
Different lowercase letters above the column represent significant differences

图 2 不同光处理对辣椒幼苗叶片光合特性的影响

Fig. 2 Effects of different light treatments on photosynthetic characteristics of pepper seedling leaves



图柱上小写英文字母不同者表示差异显著
Different lowercase letters above the column represent significant differences

图 3 不同光处理对辣椒幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

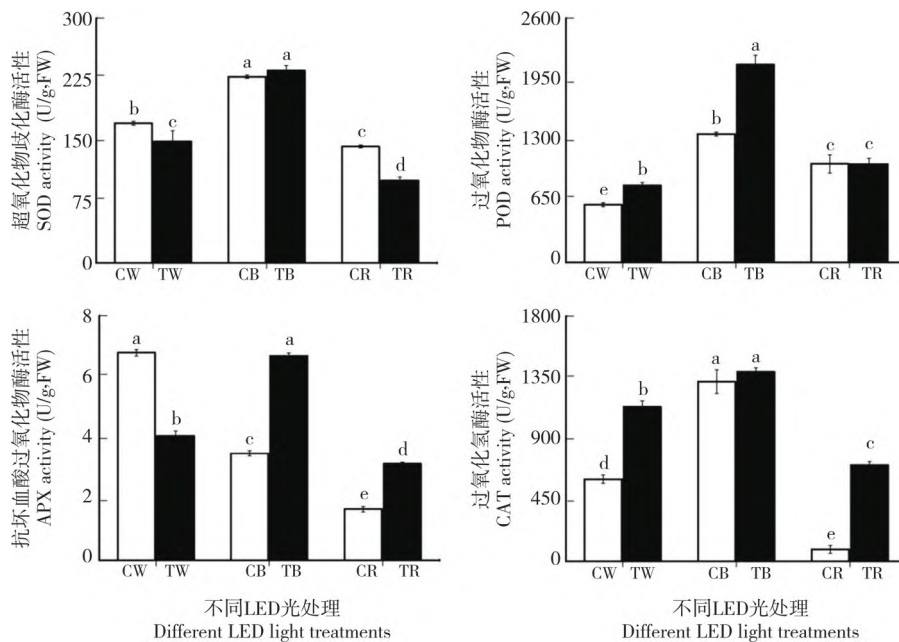
Fig. 3 Effects of different light treatments on chlorophyll fluorescence parameters of pepper seedling leaves

倍, TB 处理为 TR 处理的 1.44 倍; 连续光周期 (T) 照射的 NPQ 均显著低于正常光周期 (CK) 照射, 而不同光处理后辣椒叶片的光化学淬灭系数 (qP) 则与之相反, TB 和 TR 处理的 qP 分别比 CW 处理显著升高 36.1%、21.1%, 蓝光处理仍高于红光处理。

2.4 不同光处理对辣椒幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由图 4 可知, 随着辣椒幼苗的生长, 不同光处理下辣椒幼苗叶片的抗氧化酶活性均有较大差异。就光质处理来看, 与蓝光处理组相比, CR 和 TR 处理后辣椒幼苗叶片的抗氧化酶活性整体下降, 其中 CR 处理的 SOD、CAT 活性比 CW 处

理显著降低 16.9% 和 85.4%, 而 CR 处理的 POD 活性则比 CW 处理显著上升 71.1%; TR 处理的 POD、CAT 活性比 CW 处理显著升高 70.4%、17%, 而 SOD 活性显著降低 40.9%。蓝光处理组中, CB、TB 处理后辣椒幼苗叶片的 SOD、CAT 活性比 CW 处理均显著升高, 其中 CB、TB 处理的 SOD 活性分别升高 33.3%、37.4%, CAT 活性则分别上升 2.18 倍和 2.30 倍, POD 活性也分别显著提高 2.23 倍和 3.43 倍。整体来看, 仅 TB 处理辣椒幼苗叶片的 APX 活性与 CW 处理相对保持一致水平, 其余处理的 APX 活性与 CW 处理相比均呈显著降低趋势, 其中 CR、TR 处理分别降低 75.3%、53.6%。



图柱上小写英文字母不同者表示差异显著

Different lowercase letters above the column represent significant differences

图 4 不同光处理对辣椒幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different light treatments on antioxidant enzyme activity in leaves of pepper seedlings

2.5 不同光处理对辣椒幼苗叶片渗透物质含量的影响

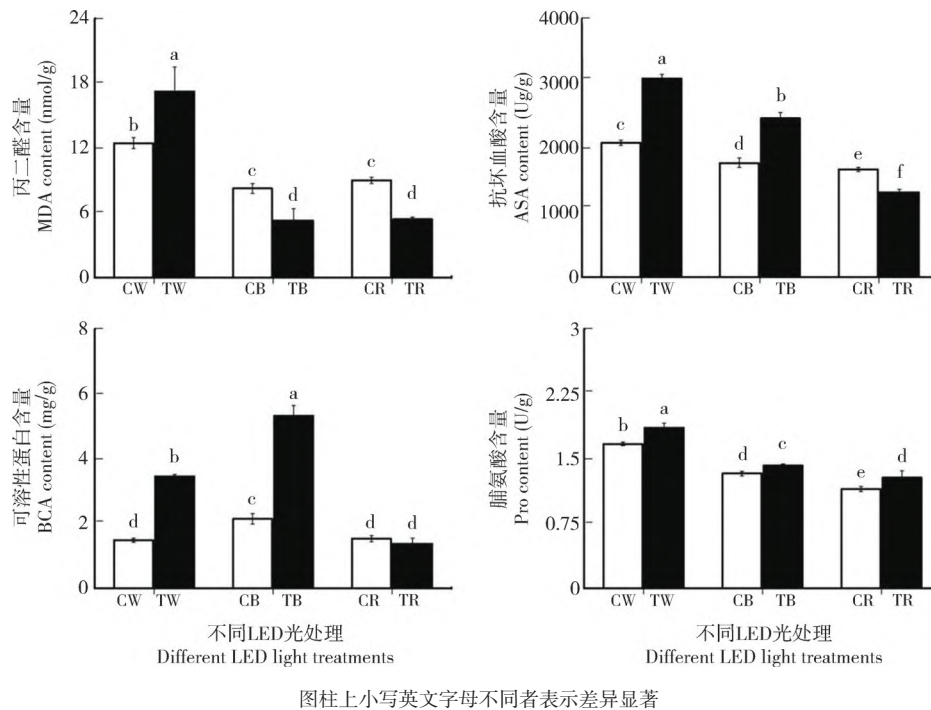
由图 5 可知, 正常光周期 (CK) 下, CR、CB 处理后辣椒幼苗叶片丙二醛 (MDA)、抗坏血酸 (ASA) 和脯氨酸 (Pro) 含量均显著低于白光组 (CW、TW 处理), 但蓝光组 (CB、TB 处理) 叶片的可溶性蛋白 (BCA) 含量却显著高于白光组。连续光周期 (T) 处理下, TB、TR 处理辣椒幼苗叶片的 MDA 含量分别比 CW 处理显著降低 56.5%、55.7%, 而 ASA、BCA 含量则分别比 CW 处理上调 1.18

倍和 3.58 倍; TW 处理下辣椒叶片的渗透物质含量比 CW 处理极显著上升, 其中 MDA、ASA、BCA、Pro 含量处理分别上升 1.38、1.47、2.33、1.11 倍; 连续红光组 (CR、TR 处理) 辣椒幼苗叶片的渗透物质含量均为最低值。表明连续光周期对辣椒叶片渗透物质含量有较大影响, 且蓝光的影响大于红光。

3 讨论

3.1 不同光处理对辣椒幼苗生长的影响

不同光处理对蔬菜的生长存在显著差异。不



图柱上小写英文字母不同者表示差异显著
Different lowercase letters above the column represent significant differences

图 5 不同光处理对辣椒幼苗叶片渗透物质含量的影响

Fig. 5 Effects of different light treatments on osmotic substances in leaves of pepper seedlings

同光质对植物地上部的生长发育具有显著的调控作用, 研究表明, 红光照射下甘蓝幼苗植株高大, 却明显降低了番茄幼苗的株高^[3,32]; 在不同光质配比中, 生菜茎粗、根系和叶面积等生物量随着红光的比例增加呈上升趋势^[33]; Erkan 等^[34]发现蓝光能显著抑制草莓的株高; DaSiliva 等^[35]指出蓝光照射可减弱烟草叶片生长、降低植株高度, 表明蓝光具有矮化植株的作用。但蓝光却能够促进根系的提前发根, 有效提高植物根系的活力^[22,36]。Zha 等^[8]研究发现, 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 光强连续光照 15 d 后生菜的生物量显著提高; 适当延长光照时间能有效促进冰菜^[37]、烟草^[38]、番茄^[39]、洋葱^[40]等农作物生长和改善品质。本研究中, 连续红光或蓝光照射下‘6421’辣椒幼苗的生物量与白光处理均有显著差异, 而正常红光和连续红光照射可明显提高辣椒幼苗的株高和壮苗指数, 正常蓝光和连续蓝光照射则可促进辣椒幼苗根系的发育。表明红光或蓝光对辣椒幼苗的生长都具有一定的积极作用, 同时在辣椒幼苗期进行连续光照 (24 h) 对其生长也有促进作用。

3.2 不同光处理对辣椒幼苗光合作用的影响

作为植物重要的代谢过程, 包括净光合速率、气孔导度等在内的光合作用均受光环境的影

响。不同光处理对植物叶片光合速率的影响有所不同。净光合速率 (P_n) 的高低是植物叶片光合性能优劣的体现, 是衡量植物叶片光合性能的重要指标。钱胜艳等^[41]研究指出, 在不同 LED 光处理下辣椒叶片的光合速率随光合有效辐射的增加而增加, 其中红光处理下辣椒叶片的 P_n 等光合参数显著高于蓝光处理, 这与本研究中正常红光处理的净光合速率显著高于正常蓝光处理的结果一致。通常, 我们以叶绿素荧光参数来反映植物吸收和利用光能的能力^[42]。Hazrati 等^[43]研究表明, PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 和 PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 如果出现大幅下降, 则表明植物受到光抑制。徐凯等^[27]研究指出, 红光处理下草莓叶片的 F_v/F_m 显著高于其他光处理; 也有研究表明, 与白光相比, 蓝光照射显著提高了黄瓜幼苗叶片的 F_v/F_m , 因此认为 PS II 最大光化学效率 F_v/F_m 的显著升高表明该光质能有效提高植物的光能转化效率^[27,44]。本研究中, 正常蓝光处理后辣椒叶片的 F_v/F_m 显著高于正常红光处理和连续光照处理。而与正常白光处理相比, 正常红光处理和连续光照处理均显著降低了 F_v/F_m 和 F_v/F_o , 表明连续光周期照射和单色红光对‘6421’辣椒的 PS II 反应中心造成了一定伤害, 这可能

与处理后辣椒叶片的叶绿素浓度有关。光化学淬灭系数 (qP) 表示 PS II 中光被有效利用而引起的荧光淬灭程度, 其降低表明植物叶片光合作用能力的下降; 而非光化学淬灭系数 (NPQ) 表示光能不能被有效利用而导致的光化学淬灭, 是植物将过多光能以热耗散的形式来抵抗逆境的一种自我保护机制^[45-46]。苏醒等^[47]研究发现, qP 增加和 NPQ 减少增强了长茎葡萄蕨藻对高光强的耐受能力。本研究中, 连续光处理比正常光处理 qP 显著上升且 NPQ 显著降低, 表明辣椒幼苗在连续光照射下通过热耗散的形式避免了叶片光合机构的损伤。

3.3 不同光处理对辣椒幼苗生理生化指标的影响

生理生化指标是反映植物状态的重要参数。研究发现, 红光起到促进植株可溶性糖合成的作用, 蓝光能显著提高可溶性蛋白含量, 为植物的生长发育奠定基础, 从而降低膜脂过氧化程度, 使植株具备更高的清除活性氧的能力^[48-50]。也有研究指出, 植物的可溶性蛋白含量会随光照时间的延长而增加^[51-52], 这与本研究中连续蓝光处理极显著增加辣椒幼苗可溶性蛋白含量的结果一致。植物在有氧新陈代谢过程中产生的活性氧 (ROS) 会引起植株细胞膜结构的破坏、蛋白质分子结构的变化等有害影响^[53], 因此植物为减少活性氧的毒害进化出一系列抗氧化解毒体系。丙二醛 (MDA) 含量常用来反映植物细胞膜遭受伤害的程度, 而抗氧化酶活性可用以评价植株受 ROS 毒害的程度。本研究中, 正常蓝光和连续蓝光照射下辣椒幼苗叶片 SOD 活性显著提高, 会增加 ROS 的生成, 但正常蓝光和连续蓝光照射可通过提高叶片 CAT、POD 活性来增强植株细胞内活性氧解毒的能力, 使得 MDA 含量降低, 从而显著减轻细胞膜受损害的程度; 正常红光照射和连续红光照射后辣椒幼苗叶片的 SOD 活性和 MDA 含量均显著低于正常白光照射处理。表明连续蓝光、红光处理通过调节辣椒叶片的抗氧化酶活性来降低 MDA 含量, 以增强辣椒幼苗的抗逆性, 这与马永珍等^[51]、苏俊等^[54]、文锦芬等^[55] 的研究结论一致。下一步还应进行连续光周期照射组合不同光质的光配比以及用单色红光和蓝光色作为补光等方面的探索, 以期为设施栽培的生产实践提供更好的理论基础。

4 结论

蓝光和红光对辣椒幼苗的生长有不同的影响, CB 和 TB 处理能抑制辣椒幼苗株高生长, 但却显著增加了辣椒幼苗的根冠比、分别比 CW 处理显著上升 2.24 倍和 2.62 倍; CR、TR 处理后辣椒幼苗的株高、茎粗和壮苗指数均显著提高, 其中 CR、TR 的壮苗指数显著升高 2.07 倍和 2.38 倍。在连续光照射下, 单色蓝光和红光对辣椒材料的光合特性和酶活性等指标的影响也有所不同, TB、TR 处理下辣椒幼苗叶片的 P_n 和 G_s 无明显变化; 而 TB 处理辣椒幼苗叶片的 T_r 和 C_i 则显著低于 TR 处理, 较 CW 分别降低 62.5% 和 51.1%; TB、TR 处理辣椒幼苗叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 均显著下降, 其中 F_v/F_m 分别比 CW 处理降低 16.5%、18.6%, F_v/F_o 分别降低 47.8%、53.4%, 而 qP 参数却显著升高 36.1%、26.1%。同时, 连续光照通过增加辣椒幼苗的 qP 及 SOD、POD、CAT 活性、显著降低辣椒幼苗 MDA 含量来抵消光抑制伤害, 从而提高植株光合能力来维持正常生长。

参考文献 (References) :

- [1] 张子峰. 我国辣椒产业发展现状、主要挑战与应对之策[J]. 北方园艺, 2023(14): 153-158. DOI: 10.11937/bfy.20223771.
ZHANG Z F. Development status, main challenges and countermeasures of pepper industry in China [J]. *Northern Horticulture*, 2023(14): 153-158. DOI: 10.11937/bfy.20223771.
- [2] 杜洪涛, 刘世琦, 张珍. 光质对彩色甜椒幼苗生长及酶活性影响[J]. 华北农学报, 2005(2): 45-48. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7091.2005.02.013.
DU H T, LIU S Q, ZHANG Z. Effects of light qualities on growth and activity of enzymes in leaves of color pimientos seedling [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(2): 45-48. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7091.2005.02.013.
- [3] 李晓慧, 王一迪, 班甜甜, 吕金丽, 郑元利, 马超. 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(4): 1-6. DOI:10.11937/bfy.20192475.
LI X H, WANG Y D, BAN T T, LYU J L, ZHENG Y L, MA C. Effects of LED supplemental lighting on morphological characteristics and related physiological characteristics of tomato seedlings [J]. *Northern Horticulture*, 2020(4): 1-6. DOI: 10.11937/bfy.20192475.
- [4] 张彤, 李成宇, 池建义, 张洪杰, 秦新苗. 稀土 LED 植物补光灯在设施农业上的应用[J]. 照明工程学报, 2018, 29(4): 22-24.
ZHANG T, LI C Y, CHI J Y, ZHANG H J, QIN X M. Application of rare earth LED lights for plant in protected agriculture [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2018, 29(4): 22-24.
- [5] 刘文科, 杨其长. 人工光在植物工厂中的应用[J]. 照明工程学报, 2014, 25(4): 50-53, 61.

- LIU W K, YANG Q C. Application of artificial light in plant factory [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2014, 25(4): 50–53, 61.
- [6] 邢阿宝, 崔海峰, 俞晓平, 张雅芬, 叶子弘. 光质及光周期对植物生长发育的影响[J]. *北方园艺*, 2018(3): 163–172. DOI: 10.11937/bfy.20171162.
- XING A B, CUI H F, YU X P, ZHANG Y F, YE Z H. Effects of different lights qualities and photoperiods on plant growth and development [J]. *Northern Horticulture*, 2018(3): 163–172. DOI: 10.11937/bfy.20171162.
- [7] ZHOU W L, LIU W K, YANG Q C. Reducing nitrate content in lettuce by pre-harvest continuous light delivered by red and blue light-emitting diodes [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 36(3): 481–490. DOI: 10.1080/01904167.2012.748069.
- [8] ZHA L, ZHANG Y, LIU W. Dynamic responses of ascorbate pool and metabolism in lettuce to long-term continuous light provided by red and blue LEDs [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 163: 15–23.
- [9] 周晚来, 刘文科, 闻婧, 杨其长. 短期连续光照下水培生菜品质指标变化及其关联性分析[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1319–1323. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01319.
- ZHOU W L, LIU W K, WEN J, YANG Q C. Changes in and correlation analysis of quality indices of hydroponic lettuce under short-term continuous light [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1319–1323. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01319.
- [10] 马绍英, 李胜, 牛俊义, 张真, 刘媛, 薛冲, 刘浩, 罗丽媛, 方艳. LED不同光质对葡萄砧木试管苗生理生化特性的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(5): 56–62. DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2010.05.019.
- MA S Y, LI S, NIU J Y, ZHANG Z, LIU Y, XUE C, LIU H, LUO L Y, FANG Y. Effects of different LED light on the physiological and biochemical characters of grape rootstock plantlets [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010, 45(5): 56–62. DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2010.05.019.
- [11] 陈敏, 李海云. 不同光周期对茄子幼苗生长的影响[J]. *北方园艺*, 2010(16): 53–55. DOI: 10.11937/bfy.201016018.
- CHEN M, LI H Y. Effect of different photoperiod on the growth of eggplant seedling [J]. *Northern Horticulture*, 2010(16): 53–55. DOI: 10.11937/bfy.201016018.
- [12] 罗鑫辉, 刘明月, 刘玉兵, 黄科, 王军伟. 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(8): 33–40. DOI: 10.19928/j.cnki.1000-6346.2020.08.007.
- LUO X H, LIU M Y, LIU Y B, HUANG K, WANG J W. Effects of light quality on growth, photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of pepper seedlings [J]. *China Vegetables*, 2020(8): 33–40. DOI: 10.19928/j.cnki.1000-6346.2020.08.007.
- [13] CHEN C C, HUANG M Y, LIN K H. Effects of light quality on the growth, development and metabolism of rice seedlings (*Oryza sativa* L.) [J]. *Research Journal of Biotechnology*, 2014, 9: 15–24.
- [14] 刘庆, 连海峰, 刘世琦, 孙亚丽, 于新会, 郭会平. 不同光质LED光源对草莓光合特性、产量及品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1743–1750. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150331.025.
- LIU Q, LIAN H F, LIU S Q, SUN Y L, YU X H, GUO H P. Effects of different LED light qualities on photosynthetic characteristics, fruit production and quality of strawberry [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1743–1750. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150331.025.
- [15] MULEO R, MORINI S. Physiological dissection of blue and red light regulation of apical dominance and branching in M9 apple rootstock growing *in vitro* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(17): 1838–1846.
- [16] 顾梦云, 曾伟达, 宿庆连, 黄明翅, 肖梅, 刘艳艳, 张雪莲, 周晓云. 不同LED光质配比和光照强度对红掌新品种福星组织培养的影响[J]. *广东农业科学*, 2023, 50(5): 46–55. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2023.05.006.
- GU M Y, ZENG W D, SU Q L, HUANG M C, XIAO M, LIU Y Y, ZHANG X L, ZHOU X Y. The effect of different LED light quality ratio and light intensity on the tissue culture of the new variety of *Anthurium andraeanum* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2023, 50(5): 46–55. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2023.05.006.
- [17] 王婷, 李雯琳, 巩芳娥, 郁继华. LED光源不同光质对不结球白菜生长及生理特性的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2011, 46(4): 69–73, 79. DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2011.04.020.
- WANG T, LI W L, GONG F E, YU J H. Effects of different light qualities of LED light source on the growth and physiological characteristics of non-bearing cabbage [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2011, 46(4): 69–73, 79. DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2011.04.020.
- [18] 李南林, 牛义, 蒋学宽, 刘海利, 张盛林. 不同光质对白魔芋生长及产量的影响[J]. *长江蔬菜*, 2015(2): 32–35.
- LI N L, NIU Y, JIANG X K, LIU H L, ZHANG S L. Effects of different light quality on growth and yield of *Amorphophallus albus* [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2015(2): 32–35.
- [19] 林叶春, 陈伟, 薛原, 潘文杰, 贾蒙骛, 张庆平, 姚国娇. 光质对立体浮盘培育烟苗叶片光合特性及根系生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(1): 87–92. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2014.01.12.
- LIN Y C, CHEN W, XUE Y, PAN W J, JIA M A, ZHANG Q P, YAO G J. Effects of light qualities on the photosynthetic responses of tobacco seedling and root growth in a float system [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(1): 87–92. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2014.01.12.
- [20] 唐永康, 郭双生, 艾为党, 秦利锋. 不同比例红蓝LED光照对油菜生长发育的影响[J]. *航天医学与医学工程*, 2010, 23(3): 206–212. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2010.03.001.
- TANG Y K, GUO S S, AI W D, QIN L F. Effects of red and blue LEDs on the growth and development of lettuce (var. Youmaicai) [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2010, 23(3): 206–212. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2010.03.001.
- [21] 杨忠义, 郭雯岩, 李戎彦, 董志刚, 乔治军, 纪薇. 不同光质对‘秋红宝’葡萄试管苗生长的影响[J]. *果树学报*, 2020, 37(6): 838–847. DOI: 10.13925/j.cnki.gsx.20200007.
- YANG Z Y, GUO W Y, LI X Y, DONG Z G, QIAO Z J, JI W. Effects of light quality on the growth of *in vitro* seeding of ‘QiuHongbao’ grape [J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(6): 838–847. DOI: 10.13925/j.cnki.gsx.20200007.
- [22] 张欢, 徐志刚, 崔瑾, 古艾素, 郭银生. 不同光谱能量分布对菊花试管苗增殖及生根的影响[J]. *园艺学报*, 2010, 37(10): 1629–1636. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2010.10.015.
- ZHANG H, XU Z G, CUI J, GU A S, GUO Y S. Effects of light spectral

- energy distribution on multiplication and rooting of *Chrysanthemum* plantlets *in vitro* [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2010, 37(10): 1629–1636. DOI: 10.16420/j.issn.0513–353x.2010.10.015.
- [23] 罗红辉, 伍青, 侯军晓, 李泽余, 李景文, 王凤兰, 周厚高. 不同 LED 光质对乒乓菊植株生长和开花性状的影响[J]. 广东农业科学, 2022, 49(12): 44–54. DOI: 10.16768/j.issn.1004–874X.2022.12.005.
- LUO H H, WU Q, HOU J X, LI Z Y, LI J W, WANG F L, ZHOU H G. The effects of different LED light quality on the growth and flowering traits of Pingpong *Chrysanthemum* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2022, 49(12): 44–54. DOI: 10.16768/j.issn.1004–874X.2022.12.005.
- [24] 华露, 许锋. 光周期对冬季温室辣椒生长的影响[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(15): 10–12, 48, 3–4. DOI: 10.16772/j.cnki.1673–1409.2016.15.003.
- HUA L, XU F. Effect of photoperiod on growth of pepper in winter greenhouses [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2016, 13(15): 10–12, 48, 3–4. DOI: 10.16772/j.cnki.1673–1409.2016.15.003.
- [25] PARK J E, PARK Y G, JEONG B R, HHANG S J. Growth and anthocyanin content of lettuce as affected by artificial light source and photoperiod in a closed-type plant production system [J]. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 2012, 30(6): 673–679. DOI: 10.7235/hort.2012.12020.
- [26] 谢景, 刘厚诚, 宋世威, 孙光闻, 陈日远. 不同光质 LED 灯对黄瓜幼苗生长的影响[J]. 长江蔬菜, 2012(6): 23–25. DOI: 10.3865/j.issn.1001–3547.2012.06.007.
- XIE J, LIU H C, SONG S W, SUN G W, CHEN R Y. Effects of different LED light on growth of cucumber seedlings [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2012(6): 23–25. DOI: 10.3865/j.issn.1001–3547.2012.06.007.
- [27] 徐凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 369–375. DOI: 10.3321/j.issn:0578–1752.2005.02.024.
- XU K, GUO Y P, ZHANG S L. Effects of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(2): 369–375. DOI: 10.3321/j.issn:0578–1752.2005.02.024.
- [28] 许莉, 刘世琦, 齐连东, 梁庆玲, 于文艳. 不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 中国农学通报, 2007(1): 96–100. DOI: 10.3969/j.issn.1000–6850.2007.01.023.
- XU L, LIU S Q, QI L D, LIANG Q L, YU W Y. Effects of different light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of leaf lettuce [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007(1): 96–100. DOI: 10.3969/j.issn.1000–6850.2007.01.023.
- [29] 董柔婕, 葛诗蓓, 李岚, 贺丽群, 范飞军, 齐振宇, 喻景权, 周艳虹. 不同光质补光对辣椒幼苗生长、丛枝菌根共生和磷吸收的影响[J]. 园艺学报, 2022, 49(8): 1699–1712. DOI: 10.16420/j.issn.0513–353x.2021–0604.
- DONG S J, GE S B, LI L, HE L Q, FAN F J, QI Z Y, YU J Q, ZHOU Y H. Effects of supplemental lighting on growth, root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus uptake in pepper seedlings [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(8): 1699–1712. DOI: 10.16420/j.issn.0513–353x.2021–0604.
- [30] 刘会芳, 王强, 韩豪, 韩宏伟, 庄红梅, 王浩, 闫会转. NaCl 胁迫对不同辣椒品种幼苗光合作用及生长的影响[J]. 长江蔬菜, 2020(24): 16–18. DOI: 10.3865/j.issn.1001–3547.2020.24.007.
- LIU H F, WANG Q, HAN H, HAN H W, ZHUANG H M, WANG H, YAN H Z. Effects of NaCl stress on photosynthesis and growth of different cultivars of pepper seedlings [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2020(24): 16–18. DOI: 10.3865/j.issn.1001–3547.2020.24.007.
- [31] 颜建明, 郁继华, 黄高宝, 冯致. 低温弱光下辣椒叶片 PSII 光能吸收和转换变化及与品种耐性的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1855–1862. DOI: 10.3864/j.issn.0578–1752.2011.09.012.
- JIE J M, YU J H, HUANG G B, FENG Z. Correlations between changes of absorption and transformation of light energy by PSII in pepper leaves and the variety tolerance under low temperature and weak light [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9): 1855–1862. DOI: 10.3864/j.issn.0578–1752.2011.09.012.
- [32] 黄雯, 甘小虎, 魏猷刚, 胡静, 阎庆九, 张艳双, 胡波. 不同 LED 光源对甘蓝幼苗生长发育的影响[J]. 上海农业学报, 2021, 37(3): 20–23. DOI: 10.15955/j.issn1000–3924.2021.03.04.
- HUANG W, GAN X H, WEI Y G, HU J, YAN Q J, ZHANG Y S, HU B. Effects of different LED light sources on the growth and development of cabbage seedlings [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2021, 37(3): 20–23. DOI: 10.15955/j.issn1000–3924.2021.03.04.
- [33] LU N, MARUO T, JOHKAN M. Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density [J]. *Environmental Control in Biology*, 2012, 50(1): 63–74. DOI: 10.2525/ecb.50.63.
- [34] 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 and Technology*, 2008, 48(2): 163–171. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2007.09.028.
- [35] DA SILVA M H M, DEBERGH P C. The effect of light quality on the morphogenesis of *in vitro* cultures of *Azorella vidalii* (Wats.) Feer [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 1997, 51(3): 187–193. DOI: 10.1023/A:1005988621036.
- [36] 吴瑶, 王再花, 叶广英, 杨意, 刘厚诚, 周荣. 不同 LED 光质组合对两种观赏石斛组培及生长影响[J]. 广东农业科学, 2023, 50(2): 32–41. DOI: 10.16768/j.issn.1004–874X.2023.02.004.
- WU Y, WANG Z H, YE G Y, YANG Y, LIU H C, ZHOU R. Effects of different LED light quality combinations on tissue culture and growth of two ornamental *Dendrobium* species [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2023, 50(2): 32–41. DOI: 10.16768/j.issn.1004–874X.2023.02.004.
- [37] 赵明伟, 吕新, 张泽, 刘慧英, 牛宁儿, 崔金霞. 不同红蓝 LED 光照时间对冰菜生长和品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(1): 80–91. DOI: 10.6048/j.issn.1001–4330.2021.01.010.
- ZHAO M W, LYU X, ZHANG Z, LIU H Y, NIU N E, CUI J X. Effects of different red and blue led lighting time on the growth and quality of ice plant [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(1): 80–91. DOI: 10.6048/j.issn.1001–4330.2021.01.010.
- [38] 徐超华, 李军营, 崔明昆, 马二登, 黄国宾, 龚明. 延长光照时间对烟草叶片生长发育及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(4): 763–770. DOI: 10.3969/j.issn.1000–4025.2013.04.018.
- XU C H, LI J Y, CUI M K, MA E D, HUANG G B, GONG M. Effects of supplemental lighting on growth and photosynthesis of tobacco leaves [J]. *Northwest Botanical Journal*, 2013, 33 (4): 763–770. DOI: 10.3969/j.issn.1000–4025.2013.04.018.

- [39] 吴泽英, 薛占军, 高志奎. 全光期 LED 白光对番茄植株干物质累积及光合性能的影响[J]. 河北农业大学学报, 2015, 38(4): 56–61. DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2015.0084.
WU Z Y, XUE Z J, GAO Z K. Effects of continuous photoperiod of white LED illumination on dry matter accumulation and photosynthetic performance of tomato seedlings[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2015, 38(4): 56–61. DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2015.0084.
- [40] VAN GESTEL N, NESBIT A, GORDON E. Continuous light may induce photosynthetic downregulation in onion—Consequences for growth and biomass partitioning[J]. *Physiologia Plantarum*, 2005, 125: 235–246. DOI:10.1111/j.1399–3054.2005.00560.x.
- [41] 钱胜艳, 刘世琦, 刘颖颖, 连海峰, 陈亚霏, 张现征. 不同 LED 光源对辣椒光合特性的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(9): 54–59. DOI: 10.14083/j.issn.1001–4942.2016.09.012.
QIAN S Y, LIU S Q, LIU Y Y, LIAN H F, CHEN Y F, ZHANG X Z. Effects of different LED light source treatments on photosynthetic characteristics of pepper[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(9): 54–59. DOI: 10.14083/j.issn.1001–4942.2016.09.012.
- [42] SCHANSKER G, TÓTH S Z, HOLZWARTH A R. Chlorophyll a fluorescence: Beyond the limits of the Q(A) model[J]. *Photosynthesis Research*, 2014, 120(1–2): 43–58. DOI: 10.1007/s11120–013–9806–5.
- [43] HAZRATI S, TAHMASEBI–SARVESTANI Z, MODARRES–SANAVY S A M. Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 106: 141–148. DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.04.046.
- [44] SU N N, WU Q, SHEN Z G, XIA K, CUI J. Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings[J]. *Plant Growth Regulation*, 2014, 73(3): 227–235. DOI: 10.1007/s10725–013–9883–7.
- [45] 孙哲, 范维娟, 刘桂玲, 田昌庚, 张鹏, 柳洪鹏, 杨俊, 赵丰玲, 史春余. 干旱胁迫下外源 ABA 对甘薯苗期叶片光合特性及相关生理指标的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(5): 873–880. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2017.1012.
SUN Z, FAN W J, LIU G L, TIAN C G, ZHANG P, LIU H J, YANG J, ZHAO F L, SHI C Y. Effects of exogenous ABA on leaf photosynthetic characteristics and associated physiological indexes of sweet potato (*Ipomoea batatas*) seedling under drought stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(5): 873–880. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2017.1012.
- [46] 戴云花, 刘周斌, 杨莎, 毛莲珍, 邹学校, 欧立军. 不同光质对辣椒叶色黄化突变体光合生理特性的影响研究[J]. 西北植物学报, 2023, 43(4): 601–610. DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2023.04.0601.
DAI Y H, LIU Z B, YANG S, MAO L Z, ZOU X X, OU L J. Photosynthetic characteristics and physicochemical properties of pepper leaf yellowing mutants under different light quality[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(4): 601–610. DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2023.04.0601.
- [47] 苏醒, 邹潇潇, 朱军. 不同光强处理对长茎葡萄蕨藻叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 783–790. DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16379.
SU X, ZOU X X, ZHU J. Effects of light intensity on chlorophyll fluorescence characteristics of *Caulerpa lentillifera* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(4): 783–790. DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16379.
- [48] 孙翊, 张永春, 殷丽青, 李青竹, 杨柳燕, 李心. LED 光质对非洲菊组培苗增殖及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(12): 2419–2426. DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2017.12.2419.
SUN Y, ZHANG Y C, YIN L Q, LI Q Z, YANG L Y, LI X. Effects of LED light on proliferation and physiological characteristics of *Gerbera jamesonii* plantlets [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(12): 2419–2426. DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2017.12.2419.
- [49] 陈祥伟, 刘世琦, 王越, 刘景凯, 冯磊. 不同 LED 光源对乌塌菜生长、光合特性及营养品质的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1955–1962. DOI: 10.13287/j.1001–9332.20140421.003.
CHEN X W, LIU S Q, WANG Y, LIU J K, FENG L. Effects of different LED light qualities on growth, photosynthetic characteristics and nutritional quality of savoy [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 1955–1962. DOI: 10.13287/j.1001–9332.20140421.003.
- [50] 齐连东, 刘世琦, 许莉, 于文艳, 梁庆玲, 郝树芹. 光质对菠菜草酸、单宁及硝酸盐积累效应的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 201–205.
QI L D, LIU S Q, XU L, YU W Y, LIANG Q L, HAO S Q. Effects of light qualities on accumulation of oxalate, tannin and nitrate in spinach [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(4): 201–205.
- [51] 马永珍, 王芳, 王舰. 不同光周期处理对马铃薯组培苗生长和生理生化特性的影响[J]. 农学学报, 2020, 10(6): 15–21. DOI: 10.11924/j.issn.1000–6850.cjas20191200302.
MA Y Z, WANG F, WANG J. Light cycle treatments: effects on the growth and physiological and biochemical characteristics of potato tissue culture seedlings [J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(6): 15–21. DOI: 10.11924/j.issn.1000–6850.cjas20191200302.
- [52] 李海云, 韩国徽, 任秋萍, 吕福堂. 不同光周期对黄瓜幼苗生长的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 201–203. DOI: 10.7606/j.issn.1004–1389.2009.03.045.
LI H Y, HAN G H, REN Q P, LYU F T. The Effect of different photoperiod on growth of cucumber seedling [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(3): 201–203. DOI: 10.7606/j.issn.1004–1389.2009.03.045.
- [53] FOYER C H, DESCOURVIÈRES P, KUNERT K J. Protection against oxygen radicals: An important defence mechanism studied in transgenic plants [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1994, 17(5): 507–523.
- [54] 苏俊, 刘映雯, 杨凡, 孔垂丝, 杨谨, 孟庆雄. 不同光质对烟草组培苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(6): 1206–1212. DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2014.06.1206.
SU J, LIU Y W, YANG F, KONG C S, YANG J, MENG Q X. Effects of different light qualities on physiological characteristics and growth of tobacco *in vitro* under light emitting diodes (LEDs) [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(6): 1206–1212. DOI: 10.7606/j.issn.1000–4025.2014.06.1206.
- [55] 文锦芬, 柯学, 徐超华, 李军营, 龚明. 光质对烟草叶片生长发育过程中抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(9): 1799–1804.
WEN J F, KE X, XU C H, LI J Y, GONG M. Effects of light quality on antioxidant defense system during growth and development of tobacco leaves [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(9): 1799–1804.

(责任编辑 邹移光)