

LED 光谱组成对生菜育苗生长发育的影响

韩青妍¹, 韩松林², 王朝伟², 崔洪博¹, 刘燕妮¹, 马丽³, 王剑锋^{1*}

(1. 吉林省蔬菜花卉科学研究院/吉林省设施蔬菜重点实验室, 长春 130119; 2. 中科稀土(长春)有限责任公司, 长春 130119; 3. 四平市铁东区山门镇综合服务中心, 吉林 四平 136000)

摘要: 本研究旨在探讨不同LED光谱组成对生菜育苗期生长发育的影响, 系统分析光质对形态、生理与光合特性的作用。试验设置白光(T₁)、纯红光(T₂)、红蓝光组合(660 nm:450 nm=7:3, T₃)和高红光(660 nm占比90%, T₄)4种处理, 光强均为(250±10) μmol/m²·s。结果表明, 不同光谱组成显著影响生菜幼苗生长, 其中T₃综合表现最优, 净光合速率达(3.15±0.025) μmol/m²·s, 显著高于T₁、T₂和T₄; 气孔导度在T₃组最高(0.20 mol/m²·s), 蒸腾速率亦显著提高, 说明红蓝配比有利于气孔调控与水分运输, 从而维持更适宜的光合生理状态。叶绿素荧光参数显示, T₃组PSII光化学量子产额(YII)最高, 光能吸收与利用效率最佳, 促进碳固定和生物量积累; T₁组YII最低, T₄组因蓝光不足导致气孔调控受限, 光合效率低于T₃。综上, 本研究揭示了660 nm红光与450 nm蓝光的协同调控优势, 提出适用于生菜育苗的高效光配方, 为设施农业光环境精准调控提供理论依据。

关键词: LED光谱组成; 生菜; 光合特性; 叶绿素荧光参数; 生菜育苗

中图分类号: S636.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)06-0020-08

Impact of LED Spectral Composition on the Growth and Development of Lettuce Seedlings

HAN Qingyan¹, HAN Songlin², WANG Chaowei², CUI Hongbo¹, LIU Yanni¹, MA Li³, WANG Jianfeng^{1*}

(1. Jilin Provincial Institute of Vegetable and Flower Science/Jilin Provincial Key Laboratory of Facility Vegetables, Changchun 130119; 2. Zhongke Rare Earth(Changchun) Co., Ltd., Changchun 130119; 3. Shanmen Town Comprehensive Service Center, Tiedong District, Siping City, Siping 136000, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of different LED spectral compositions on the growth and development of lettuce seedlings, and systematically evaluate the impacts of light quality on their morphological, physiological, and photosynthetic characteristics. Four treatments were applied: white light(T₁), monochromatic red light(T₂), a red-blue combination(660 nm:450 nm=7:3, T₃), and a high-red treatment (red light at 660 nm accounting for 90%, T₄), all maintained at an intensity of (250±10) μmol/m²·s. The results showed that spectral composition significantly influenced lettuce seedling growth, and T₃ achieved the best overall performance: the net photosynthetic rate reached(3.15±0.025) μmol/m²·s, which was significantly higher than those under T₁, T₂, and T₄. Stomatal conductance was also highest in T₃(0.20 mol/m²·s), and the transpiration rate increased significantly, indicating that an appropriate red-blue ratio facilitates stomatal regulation and water transport, thereby maintaining a more favorable photosynthetic physiological state. Chlorophyll fluorescence parameters further showed that T₃ had the highest PSII effective quantum yield(YII), reflecting superior light energy absorption and utilization efficiency and consequently promoting carbon assimilation and biomass accumulation. In contrast, T₁ exhibited the lowest YII, while T₄ showed lower photosynthetic efficiency than T₃ due to restricted stomatal regulation caused by insufficient blue light. Overall, this study reveals the synergistic regulatory advantage of 660 nm red light and 450 nm blue light, proposes an efficient light recipe for lettuce seedling cultivation, and provides a theoretical ba-

收稿日期: 2025-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3500402); 吉林省科技发展计划项目(20220202104NC); 长岭县设施蔬菜连作障碍项目(Ijcytc2025-0015701)

作者简介: 韩青妍(1998-), 女, 研究实习员, 硕士, 从事设施蔬菜植物生理检测研究。

通信作者: 王剑锋, E-mail: hortwjf@163.com

sis for the precise regulation of the light environment in protected agriculture.

Key words: LED spectral composition; Lettuce; Photosynthetic characteristic; Chlorophyll fluorescence parameter; Lettuce seedling cultivation

设施农业作为现代农业的重要组成部分,通过有效调控环境因子(光、温度、水分和营养)显著提高作物的产量和质量,得到广泛的应用。设施农业的快速发展在蔬菜生产领域尤为突出,主要是因为其可以提供全年不间断的生产能力,减轻季节和气候对作物生长的限制,从而使得新鲜蔬菜在淡季也能够持续供应市场^[1]。其中,生菜作为一种重要的叶类蔬菜,由于其生长周期短、对环境变化敏感,成为设施农业中常见的栽培对象之一^[2]。

在设施农业中,育苗是决定最终作物产量和质量的关键阶段。生菜育苗对光环境极为敏感,不同光谱组成显著影响其生长发育、光合作用效率及营养物质积累。光是植物进行光合作用的主要能量来源^[3],不同波长的光对于植物的光合色素及生长调控的作用各不相同^[4]。在可见光范围内,红光和蓝光对植物的生长和形态建成具有特别重要的影响^[5],其中红光(600~700 nm)有助于促进生物量的积累和开花,而蓝光(400~500 nm)则在调控气孔开闭及光形态建成中起着关键作用^[6]。然而,单一波长的光源可能导致植株生长不良,因此光谱的组合使用对于植物的健康生长更为有利。

近年来,随着人工光植物工厂技术的发展,完全采用LED作为光源进行生菜育苗成为培育优质种苗的有效手段。LED光源具有波长可调、能效高及光谱精准控制的优点,正逐步替代传统的荧光灯和高压钠灯,成为设施农业的主要光源选择。LED光源的应用对蔬菜育苗中植物的生长和生理特性产生了显著影响。即便是相同的光质,不同植物的反应也可能存在显著差异。例如,红光(610~660 nm)相比自然光能有效促进花生幼苗根系的生长发育,而蓝光虽然在一定程度上抑制了根系的伸长,但却能提高根系活力^[7]。此外,红光对南瓜植株的株高有促进作用,但可能导致茎粗的减小;相反,蓝光则对幼苗茎粗的增加更为有利^[8]。而红蓝光的合理组合则可以在同时提高茎粗和株高方面发挥协同效应。当前,红光与蓝光的LED光源在现代设施园艺中的应用日益广泛,不同比例的红蓝光组合对各种蔬菜幼苗的生长表现出差异化的影响。研究表明,红蓝光比例

的调整不仅影响植物的生长速度,还对其形态建成和生理特性产生显著作用。蓝光对番茄根系活力有明显促进作用,这对培育壮苗尤为关键^[9]。在LED红光下,冬青试管苗的根冠比和根长表现优于蓝光处理,而增大蓝光比例对黄瓜幼苗的地下部分同化物分配有显著作用^[10]。针对生菜研究表明,红光能够显著提高地上部分的干重,从而促进产量增加,而蓝光则表现出一定的抑制作用,使植株矮化^[11]。整体来看,混合光质比例的优化是提高不同蔬菜育苗效果的重要手段,不同光质组合的合理应用将有助于实现设施农业的精准栽培目标。

由于使用不同光谱组成的LED光源进行生菜育苗的研究较少,因此,本研究旨在通过系统分析不同光谱组成对生菜育苗阶段的影响,探讨最佳光环境条件,以期提高生菜育苗的质量,并为设施农业中优质生菜种苗的培育提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 植物样本和培育条件

本试验选择生菜作为栽培样本,在吉林省蔬菜花卉科学研究院人工气候室内进行培育。生菜种子点种在育苗绵块中,先采用纯水培育,待第2片真叶展平后,采用日本园试配方营养液培育,营养液pH为6.0~6.5,电导率为1.0~1.2 ms/cm;环境条件为,相对湿度为(60±10)%,CO₂浓度为(400±50) μmol/mol。本试验用灯均由中科稀土(长春)有限责任公司定制。

1.2 LED光谱组成

采用4种光谱组成的LED,4个试验区分别为T₁、T₂、T₃和T₄。不同处理均使用光纤光谱仪(AvaSpec-ULS2048XL-EVO,爱万提斯公司,荷兰)测量灯下20 cm处350~800 nm波长的光谱分布,如图1所示。在所有光质环境处理中,光强均控制在(250±10) μmol/m²·s。

1.3 测量指标

1.3.1 植物形态和特征

生菜播种后第21天,每区随机选择10株幼苗,测量从育苗绵块表面到生长点的株高(cm);选择育苗绵块表面和子叶的中部,使用电子游标卡尺测量茎粗(mm);采用3DScanner-630w双目扫描

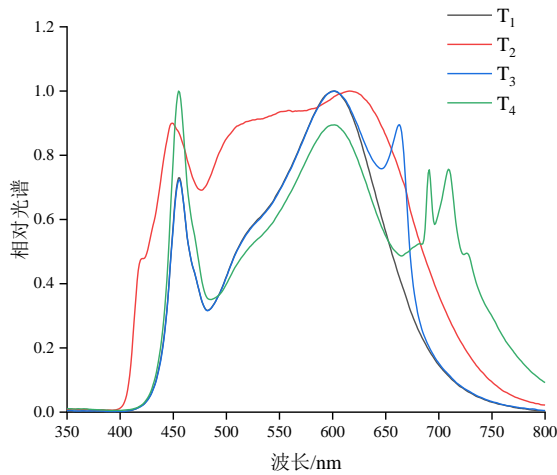


图1 LED光谱组成

Fig.1 LED spectral composition

仪(南阳梦洋机械有限公司,中国)对生菜植株进行形态测量,以获取精确的三维结构图像。具体操作过程如下:首先,将扫描仪校准以确保其精度符合实验要求,然后将生菜植株置于扫描平台中央,使植株各个侧面均能被扫描仪检测到。扫描过程中,调整扫描角度和距离,以覆盖整个植株的形态结构,并尽可能减少遮挡和阴影的影响。通过多次扫描进行数据采集,确保所有植株表面都被精确拍摄。最后,利用三维重建软件对扫描数据进行处理,生成植株的三维模型,以用于进一步分析。植株用电子天平分别测定其地上和地下的鲜重,最后将地上部分和地下部分置于105℃烘箱杀青15 min,在80℃烘干后分别测定生菜幼苗干重。

1.3.2 叶绿素含量测量

以每棵生菜幼苗完全展开的第2片真叶为样本,称取生菜叶片0.1 g,剪成细丝放到15 mL试管内,加入10 mL浓度为80%的丙酮溶液后放置于4℃冰箱内浸提24 h,将提取液摇匀,用80%丙酮溶液作为测定标准空白,取上清液进行叶绿素含量的测量。叶绿素含量使用紫外分光光度计(METTLER TOLEDO UV5)测量吸光度OD值。按照Aron法修正计算出溶液的叶绿素含量

$$\text{Chla}(\text{mg/L})=12.72\text{OD}_{663}-2.59\text{OD}_{645} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Chlb}(\text{mg/L})=22.88\text{OD}_{645}-4.67\text{OD}_{663} \dots\dots\dots (2)$$

Chla与Chlb相加即得到总叶绿素含量(Chlt):

$$\text{Chlt}(\text{mg/L})=\text{Chla}+\text{Chlb}=20.20\text{OD}_{645}+8.05\text{OD}_{663} \dots\dots\dots (3)$$

1.3.3 光合特性

为保证实验环境的稳定性,测量期间实验室内温度设为24℃,湿度为60%,模拟环境光强设

为250 μmol/m²·s稳定预处理,采用光合作用测量仪(LI-6800, LICOR公司,美国)测量净光合速率。每个处理组随机测量10个样本,主要指标为净光合速率(Pn, μmol/m²·s)、气孔导度(G_s, mol/m²·s)、胞间CO₂浓度(C_i, μmol/mol)和蒸腾速率(Tr, mmol/m²·s)。

1.3.4 叶绿素荧光参数

使用叶绿素荧光成像系统(IMAGING-PAM, Waltz公司,德国)进行叶绿素荧光测量,测量前将样本暗适应20 min,光化学强度设置为250 μmol/m²·s,记录Y II图像。

1.4 数据处理

利用Excel 2013、Origin2018等软件对原始数据进行处理,采用SPSS 16.0统计分析对数据进行差异显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 生长特性分析

在本试验的不同光照处理组中,处理T₃在促进生菜生长方面表现最为优异。T₃处理在茎粗、地上鲜重和地上干重的各项指标上均表现出显著的优势。茎粗在T₃处理组下为(1.50±0.14) cm,这显著高于其他3组,其中T₁、T₂和T₄处理的茎粗分别为(0.91±0.11) cm、(1.15±0.04) cm和(1.16±0.08) cm。结果表明,T₃光照处理更有利于茎组织的强化,可能是由于其光质成分对细胞分裂和扩展的促进作用更为有效。在地上部分的鲜重方面,处理T₃也表现出明显的优势。T₃组地上鲜重达到(0.45±0.02) g,显著高于T₁和T₂组。相较于T₄组虽然T₃稍显逊色,但仍然表现出较为优异的增长趋势。特别是与T₁和T₂相比,T₃组的光照条件显然更能促进植株的生物量积累,可能是因为T₃组光质更有助于光合作用的高效进行;T₃处理下的地上干重达到(0.031±0.000 2) g,显著高于T₁和T₂组。虽然与T₄组相比0.035 g略低,但T₃处理下的地上干重仍然表现出显著的生长优势,说明T₃光照处理对于有机物的积累也有明显促进作用,尤其是在维持较好的水分平衡的同时促进干物质的积累。

T₃光照处理组在茎粗、地上鲜重以及地上干重的表现均优于T₁和T₂处理,并与表现最好的T₄处理接近。T₃处理组的显著优势表明其光质组合对于生菜的各项生长指标的促进作用尤为显著。具体来说,T₃光照条件可能提供更均衡的蓝光和红光比例,既促进了叶片的光合作用效率,又有助于茎和叶的扩展和加厚。相比于其他处理组,T₃处理显著增强植株的结构稳定性和生物量的积

累,这对于设施农业中实现高效生菜生产具有重要的应用价值。这些数据和对比结果进一步说明,通过优化光照条件,尤其是选择类似 T_3 光照处理的光质组合,可以显著改善生菜的生长表现。

本研究通过不同LED光谱组成对生菜育苗阶段的生长特性、叶绿素含量、光合效率及叶绿素荧光特性进行了系统分析,图2结果表明,不同光质对生菜的生长表现有显著影响。总体来看, T_3 处理组在多项生长指标中表现优异,表明适当的光谱组合可显著促进植物生长和提高光合效率。

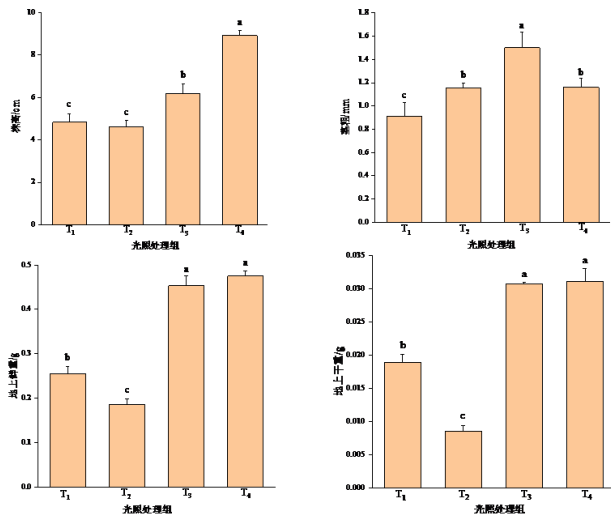


图2 LED光质对生菜幼苗的生长影响

Fig.2 Effects of LED light quality on the growth of lettuce seedlings

在 T_1 处理组中,生菜的叶片生长表现出明显的不均匀特征,各叶片之间的大小差异较为显著。如图2所示,红色和绿色区域的叶片面积相

对较小,反映出叶片发育受到限制,可能是由于光质配比不合理,导致叶片扩展受阻。相比之下, T_2 处理组的叶片生长状况有了一定改善。与 T_1 处理组相比,蓝色和绿色叶片区域面积显著增加,尤其是蓝色区域的叶片显得更加挺拔和宽大。这种变化表明光质配比有所优化,对叶片的生长起到了促进作用。然而,黄色区域的叶片依然偏小,显示出光能利用效率尚未达到最优水平。尽管叶片之间的生长均衡性有了改善,部分叶片未能完全展开,说明光质调控在促进整体均衡生长方面仍存在不足。 T_3 处理组的生菜样本表现出了最佳的生长特征,叶片的大小和厚度均衡,颜色的分布也显示出各叶片光合活性高度协调。图像中的绿色、蓝色和红色区域显示各叶片均充分展开,面积较大且形态完整。特别是绿色和蓝色区域的叶片,面积大且均匀,表明 T_3 处理组的光质组合能够有效地促进叶片的扩展和增厚,从而提高光合作用效率。此外,整个植株结构紧凑,具有良好的三维形态,进一步表明 T_3 光质处理有利于生菜的整体生长发育,显著提升了光合作用效率和营养物质的积累。在 T_4 处理组中,生菜叶片的生长表现则相对不均衡,黄色区域的叶片面积较大,而蓝色和绿色区域的叶片相对细长,部分叶片甚至出现了向下弯曲的现象。这种情况可能是由于光质配比导致植物对某些光谱的过度响应,进而引发了叶片的徒长,影响了整体结构的稳定性。尽管红色区域的叶片显示出一定的扩展性,但整体形态的均衡性仍不如 T_3 处理组,这说明 T_4 组的光质配比在光合过程中的调控效果相对较弱。

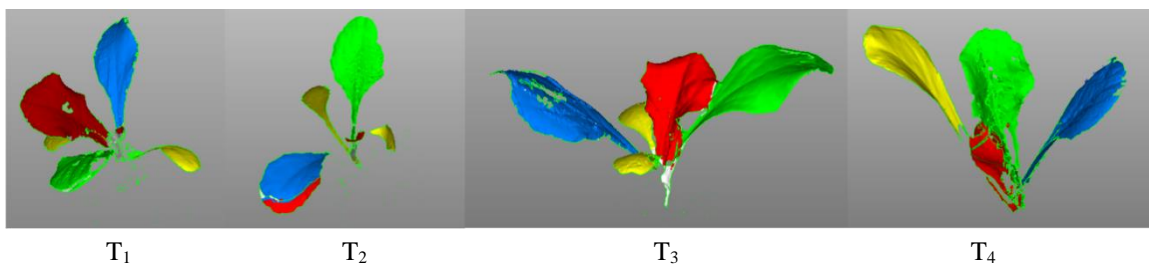


图3 LED光质对生菜幼苗表型特征的影响

Fig.3 Effect of LED light quality on the phenotypic characteristics of lettuce seedlings

2.2 光质对叶绿素含量的影响

不同光照处理对生菜叶片中的叶绿素a、叶绿素b产生显著影响,如图4所示。

在叶绿素a的含量上, T_3 处理组达到了最高值,为 (1.12 ± 0.06) mg/g,显著高于其他处理组(T_1 为 0.92 ± 0.01 mg/g, T_2 为 0.94 ± 0.04 mg/g, T_4 为 $0.92 \pm$

0.08 mg/g)。相较于 T_1 处理组, T_3 组增加了约20%。同样,在叶绿素b的含量上, T_3 处理组也达到了显著的优势,为 (0.37 ± 0.03) mg/g,高于 T_1 和 T_2 组,分别增加约18%和16%。表明 T_3 处理组在红蓝光比例的配合下,能够显著促进叶绿素a和叶绿素b的合成,从而为植物提供更强的光合能力。

对于叶绿素 a/b 的比值, T_3 处理组表现为约 (3.01 ± 0.09) mg/g, 虽然 4 个处理组之间没有显著的统计学差异(标记为 NS, 表明无显著性差异), 但 T_3 组的比值与其他组相比较仍然显示出一定的优化趋势。这表明, T_3 处理组的光质配比能够在一定程度上平衡叶绿素 a 和叶绿素 b 的合成, 使得光能的捕获和利用效率达到最佳。这一点对于植物光合作用的整体效率至关重要, 因为较高的叶绿素 a/b 比值往往表明植物在光反应过程中有更高的光能捕获能力。

叶绿素是植物光合作用中关键的光捕获色素, 其含量的增加直接影响到植物的光合作用效率和生长能力。 T_3 组的叶绿素 a 和 b 含量显著增加, 表明其光质组合, 可能是更合理的红光与蓝光比例, 更适合于生菜这种植物的生长需求。红光通常被认为对叶绿素的合成和光合作用有直接

的促进作用, 而蓝光在调控光合基因表达方面起着重要作用。因此, T_3 处理下的红蓝光组合在比例和光强上可能达到了一个更合适的水平, 从而大幅度提高了叶绿素 a 和 b 的积累。

叶绿素 a 和 b 的高含量意味着 T_3 组具有更高的光合效率, 这对于植物的碳水化合物积累、生物量增长具有直接影响。从鲜重和干重的积累结果来看, T_3 组的生物量也表现出显著的优势, 这与叶绿素含量的增加相一致, 进一步表明 T_3 光质组合在光合作用效率的提升上起到了积极作用。

综上所述, T_3 处理组在叶绿素 a 和 b 的含量上均表现出显著优势, 表明其光质组合有效地促进了叶绿素的积累, 从而提高了光合作用效率和植物整体生长性能。这些数据进一步支持了 T_3 组为最佳光照处理组的结论, 为设施农业中光质优化提供了科学依据和实际指导意义。

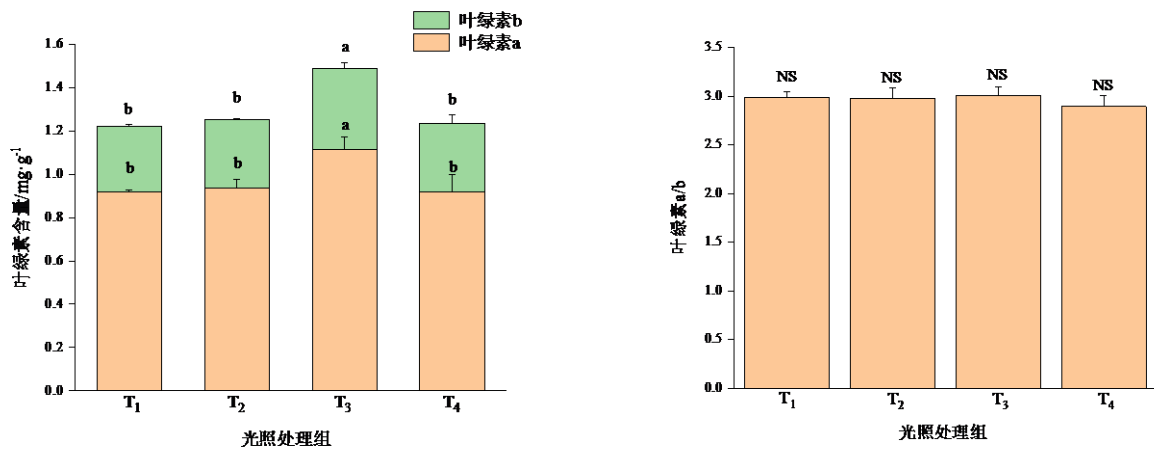


图 4 不同光照条件下生菜幼苗叶绿素含量和叶绿素 a/b

Fig.4 Chlorophyll content and chlorophyll a/b ratio of lettuce seedlings under different light conditions

2.3 光质对光合特性的影响

本研究系统地分析了不同 LED 光谱组成对生菜幼苗生长发育的影响, 图 5 结果表明, T_3 处理组红蓝光组合在各项生长参数中均表现出显著的优势。 T_3 处理组显著提升了光合特性, 包括净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度等关键指标, 进一步证明了光质组合对植物生长和光合效率的影响。

不同光质处理对生菜幼苗的光合特性产生了显著影响。 T_3 处理组在各光合特性参数中均表现出显著的优势, 充分表明其光质组合的优越性。首先, T_3 处理组在净光合速率中表现最佳, 达到 (3.15 ± 0.025) $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 显著高于其他处理组 (T_1 、 T_2 和 T_4 处理组分别为 (0.65 ± 0.49) 、 (1.49 ± 0.60) 、 (2.79 ± 0.17) $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。结果表明, T_3 组光质能够

有效促进光合作用过程中的碳固定效率, 显著提升光合速率。由此可见, T_3 光质组合为植物提供了更优的光能利用条件, 进一步促进了叶片的光合作用及碳水化合物的积累。

此外, T_3 处理组的气孔导度也表现出了显著优势, 达到 (0.21 ± 0.008) $\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 远高于其他处理组 (T_1 、 T_2 和 T_4 组分别为 0.16 ± 0.005 、 0.14 ± 0.001 、 0.17 ± 0.006 $\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。气孔导度的增加意味着 T_3 处理组的光质能够更有效地促进气孔的开放, 增强气体交换效率, 提高 CO_2 的利用率。这种增强的气体交换对于维持较高水平的光合作用至关重要, 因为它为碳固定过程提供了充足的底物供应。

T_3 处理组在蒸腾速率方面也达到了最高值, 为 (0.0021 ± 0.00012) $\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 高于其他处理组 (T_1 为 (0.0019 ± 0.00017) $\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, T_2 为 $(0.0020 \pm$

0.000 14) mol/m²·s, T₄为(0.002 2±0.001 0) mol/m²·s。这一结果表明, T₃光质处理有效促进水分的运输和散热,有助于维持光合作用过程中最佳的温度,并保障植物体内的养分运输。较高的蒸腾速率意味着T₃处理组在水分利用和热量散发方面更加高效,从而支持植物在高光合速率下维持代谢平衡。

最后, T₃处理组的胞间CO₂浓度也达到最高值,为(375.67±6.38) μmol/mol,高于其他处理组 T₁为(362.53±2.34) μmol/mol, T₂为(356.57±2.96) μmol/mol, T₄为(367.60±1.85) μmol/mol。较高的胞间CO₂浓度表明,在T₃光质条件下,叶片能够维持更高的CO₂水平,从而为光合反应提供充足的底物,最大化

碳同化效率。在高光合作用水平下维持高的胞间CO₂浓度,有助于减少因气孔关闭而导致的光合受限风险,确保持续高效的光合产能。

综上所述, T₃处理组在多方面对生菜幼苗的光合特性表现出显著优势,具体体现在净光合速率、气孔导度、蒸腾速率以及胞间CO₂浓度等关键光合参数上。这些结果充分证明,合理的红蓝光比例不仅能够提升光合作用效率,还能有效支持植物的碳固定、水分调节和养分积累,显著促进生长发育,从而为植物生长提供适宜的光合条件。与其他处理组相比, T₃处理组通过优化红蓝光比例及其光强组合,成功提升光合作用相关参数,使得植株在生物量积累上具有显著优势。

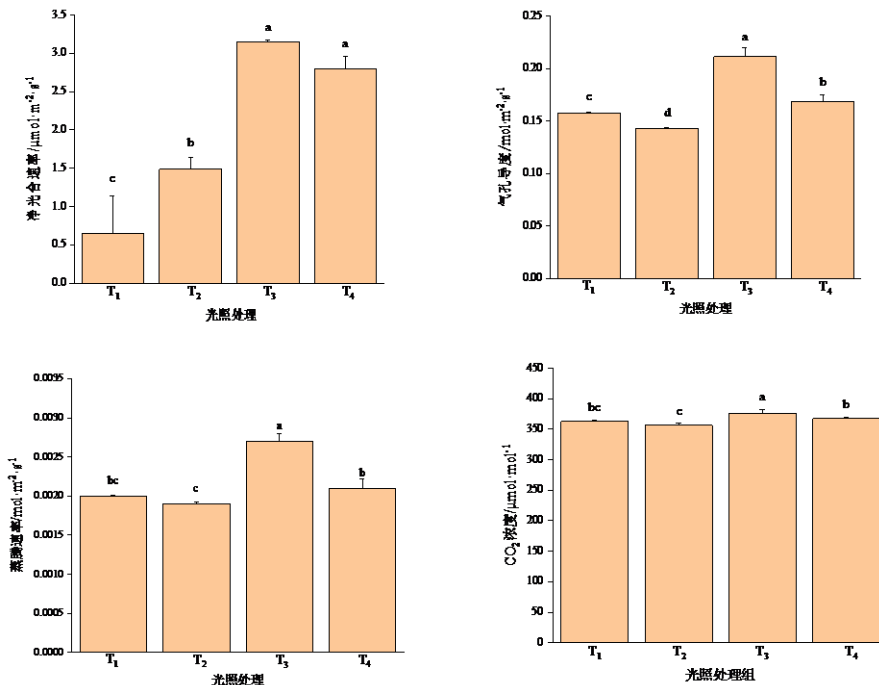


图5 光质对生菜幼苗光合特性的影响

Fig.5 Effects of light quality on the photosynthetic characteristics of lettuce seedlings

2.4 光质对荧光特性的影响

如图6可知,在T₁处理组下,生菜幼苗的叶片以橙红色为主,反映了低至中等的Y II值。这表明在该处理组下,光系统II(PSII)的光化学效率相对较低。大部分叶片表面区域显示出较低的光化学活性,这可能是由于光质组合不佳,未能有效刺激光系统的最大潜力,从而导致光能的利用效率偏低。T₂处理组中,叶片的颜色分布相比T₁有所改善,橙红色区域减少,部分区域开始显示黄色,反映了略高的光化学量子产额。然而, Y II的整体分布依旧偏向中等水平,绿色的高值区域

有限。这说明在T₂处理组下,光合效率有所提升,但整体光系统II的光化学活性仍然受到限制,未能显著提高。T₃处理组在4个处理中表现最佳。可以看到,叶片大部分区域呈现绿色甚至部分蓝色,表明Y II值接近色谱中的高值范围(接近0.9)。结果表明,在T₃处理组下,PSII的光化学量子产额最高,叶片的光化学活性和光能利用效率均显著提高。高值区域的广泛分布表明, T₃处理组提供了最为理想的光质条件,能够有效促进PSII的电子传递效率,从而增强光合作用过程中的碳固定和能量转换。这些特征与前期其他光合

参数的结果一致,进一步证明 T_3 组光质组合对生菜的生长和光合效率的促进效果显著。在 T_4 处理组中,叶片显示出部分高值区域(绿色),但相比 T_3 处理组,这些高值区域相对较少,大部分叶片区域仍显示为黄色和橙红色。虽然 T_4 处理组的Y II值较 T_1 和 T_2 组有明显提高,但整体的光化学效率不及 T_3 处理组。这表明 T_4 处理组虽然在某些区域内提高了PSII的活性,但光合效率的整体提升仍不如 T_3 组理想,可能是由于光质配比使得部分光谱的利用效率不如 T_3 组。

通过对这4个光质处理组的生菜幼苗Y II图像进行分析,可以明确看到 T_3 处理组在所有处理组中表现最为优异,其叶片的光合量子产额明显高于其他组。说明在 T_3 光质处理下,PSII的光化学效率得到了最大化的提升,表明 T_3 光质组合提供了最理想的光能吸收和利用条件,显著促进了生菜幼苗的光合作用效率和生物量积累。这些结果与之前试验中光合特性表现一致,均表明 T_3 处理组能够为生菜提供最佳的生长环境和光合条件。

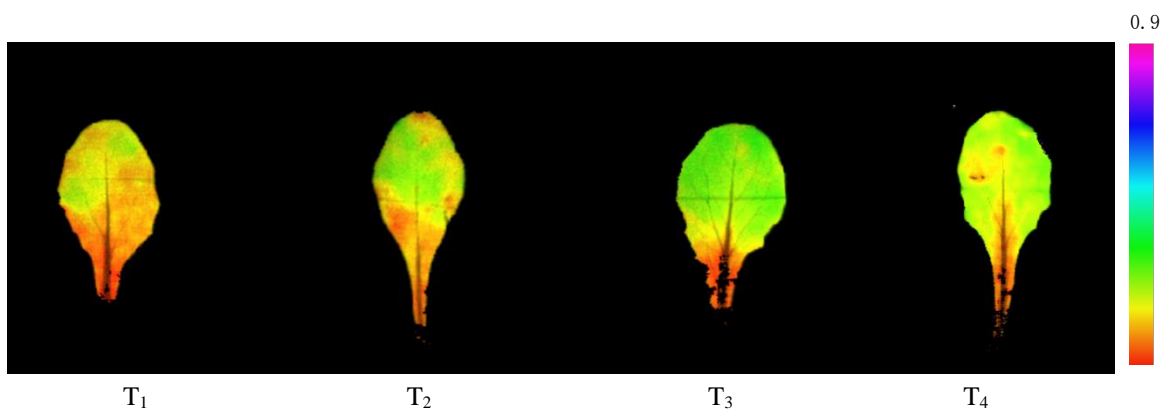


图6 光质对生菜幼苗荧光的影响

Fig.6 Effect of light quality on fluorescence of lettuce seedlings

3 讨论与结论

本研究通过对不同LED光谱组成的生菜育苗效果进行分析,结果显示,光谱特性对幼苗的生长特性、叶绿素含量、光合效率及荧光特性均有显著影响。结果表明, T_3 处理组在多项生长指标中表现最优,表明其光谱组合在促进植物生长和光合作用方面具有显著优势。

近年来,LED光质优化策略已在设施农业中得到广泛应用,特别是在蔬菜育苗领域,有研究表明大量研究表明,红蓝光组合在促进植物生长、光合效率及形态建成方面具有显著优势。蓝光(400~500 nm)在诱导光形态建成、促进气孔开闭以及维持水分代谢方面发挥重要作用,而红光(600~700 nm)则直接促进光合作用的能量吸收、提高碳固定效率,并增强生物量积累^[12]。已有研究证实,适当比例的红蓝光组合能够有效提高叶绿素含量、优化光系统II(PSII)活性,并提升作物生长质量^[13]。在番茄、黄瓜和草莓等作物中,红蓝光组合均表现出提高净光合速率(P_n)、优化气孔调控以及提升生物量积累的作用^[14]。本研究通过对不同LED光谱组成的系统分析,进一步证实了这一理论,其中 T_3 处理组(红蓝光组合)在生菜育苗

阶段表现最佳,显著提高了光合效率、叶绿素合成及生物量积累,与已有研究结论一致。

本研究通过系统分析不同LED光谱组成对生菜育苗阶段的影响,揭示了660 nm红光与450 nm蓝光组合(T_3 处理组)在促进生菜幼苗生长、光合效率及光能利用方面的显著优势。结果表明, T_3 处理组的茎粗(1.5 ± 0.14 cm)、地上鲜重(0.45 ± 0.02 g)和干重(0.031 ± 0.0002 g)均显著高于其他处理组,表明其光质组合有效促进了细胞分裂与生物量积累。同时, T_3 组的叶绿素a(1.12 ± 0.06 mg/g)和叶绿素b(0.37 ± 0.03 mg/g)含量显著提升,进一步验证了红蓝光协同作用对光合色素合成的促进作用。在光合特性方面, T_3 组的净光合速率(3.15 ± 0.025 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)、气孔导度(0.20 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)及蒸腾速率(0.0021 ± 0.00012 $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)均达到最高水平,表明其光谱组合通过优化气孔开闭和 CO_2 吸收效率,显著提升了碳同化能力。此外,荧光参数分析显示, T_3 组PSII光化学量子产额(Y II ≈ 0.9)显著优于其他组,表明其光质组合能够最大化光能捕获与电子传递效率,为光合作用的高效运行提供了理想条件。

本研究揭示了合理优化的LED光谱组合,特别是红蓝光比例的精确调控,可以显著促进生菜幼苗的生长和光合作用,为设施农业中的生菜育

苗提供了有效的理论依据和实践指导。这不仅对生菜的育苗阶段至关重要,也对设施农业中其他蔬菜的生长管理具有借鉴意义。光谱优化不仅可以提升作物生长性能,还在减少不良影响方面发挥了重要作用,进一步提高了生产的稳定性和经济效益。

未来的研究可进一步探讨LED光谱在多种作物中的适用性,特别是红蓝光与其他光谱组合对不同生理阶段作物生长的影响。此外,结合植物生长的实际需求,探索其他光质组合的潜力,如适量添加绿光或远红光,或对不同环境条件下的光质动态调整,这些都是值得深入研究的方向,以进一步提升设施农业的整体效能。

参考文献:

- [1] 陈胜文,谢伟平,林春华,等.营养生长期长短对直立生菜生长、产量和品质的影响[J].广东农业科学,2008(9):46-47,59.
CHEN S W, XIE W P, LIN C H, et al. Effects of vegetative growth period on growth, yield and quality of lettuce[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2008(9): 46-47, 59. (in Chinese)
- [2] 刘凯歌,宋云鹏,张丽丽,等.紫叶生菜和绿叶生菜品质的综合比较[J].长江蔬菜,2021(6):51-53.
LIU K G, SONG Y P, ZHANG L L, et al. Comprehensive comparison of quality of purple leaf lettuce and green leaf lettuce[J]. Changjiang Vegetables, 2021(6): 51-53. (in Chinese)
- [3] 王艺,韦小丽.不同光照对植物生长、生理生化和形态结构影响的研究进展[J].山地农业生物学报,2010,29(4):353-359,370.
WANG Y, WEI X L. Research progress on the effects of different light on plant growth, physiology, biochemistry and morphological structure[J]. Mountain Agricultural Biology, 2010, 29(4): 353-359, 370. (in Chinese)
- [4] ICHIRO T, HIROKI O, TAKASHI F, et al. Light environment within a leaf. II. progress in the past one-third century[J]. Plant Research, 2016, 129(3): 353-363.
- [5] 王忠.植物生理学[M].北京:中国农业出版社,2000:89-112.
- [6] 郭奕.不同光质LED光源组合对番茄及黄瓜育苗效果的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [7] 蒲高斌,刘世琦,刘磊,等.不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J].园艺学报,2005(3):420-425.
PU G B, LIU S Q, LIU L, et al. Effects of different light quality on growth and physiological characteristics of tomato seedlings [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005(3): 420-425. (in Chinese)
- [8] 邸秀茹,崔瑾,徐志刚,等.不同光谱能量分布对冬青试管苗生长的影响[J].园艺学报,2008,35(9):1339-1344.
DI X R, CUI J, XU Z G, et al. Effects of different spectral energy distribution on the growth of holly plantlets in vitro[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2008, 35(9): 1339-1344. (in Chinese)
- [9] 赵庚义,车力华,孟淑娥.气温与地温对蔬菜幼苗质量影响的研究初报[J].沈阳农业大学学报,1987(3):80-85.
ZHAO G Y, CHE L H, MENG S E. A preliminary study on the effects of air temperature and soil temperature on the quality of vegetable seedlings[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1987(3): 80-85. (in Chinese)
- [10] 刘会芳,韩宏伟,庄红梅,等.氮素形态对盐胁迫下辣椒幼苗生长及光合特性的影响[J].新疆农业科学,2019(5):855-863.
LIU H F, HAN H W, ZHUANG H M, et al. Effects of nitrogen forms on growth and photosynthetic characteristics of pepper seedlings under salt stress[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019(5): 855-863. (in Chinese)
- [11] 周华,刘淑娟,王碧琴,等.不同波长LED光源对生菜生长和品质的影响[J].江苏农业学报,2015,31(2):429-433.
ZHOU H, LIU S J, WANG B Q, et al. Effects of different wavelength LED light sources on the growth and quality of lettuce[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 31(2): 429-433. (in Chinese)
- [12] SANDER W H, GOVERT T, HANS M, et al. Blue light dose - responses of leaf Photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light.[J] Journal of Experimental Botany, 2010, 61(11): 3107-3117.
- [13] DOU H, NIU G, GU M, et al. Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments[J]. Horticulturae, 2017, 3(2):36.
- [14] ZHOU H, LIU S, YANG Y, et al. Effect of light quality on the growth and photosynthetic characteristics of; cinnamomum camphora; rooted cuttings[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2021, 36(7-8): 532-538.

(责任编辑:王昱)