



李雪, 赵士文, 张冠智, 包星星, 武永军, 杨振超. 添加不同强度的远红光对黄瓜幼苗生长及光合作用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(02):66-76.
LI Xue, ZHAO Shiwen, ZHANG Guanzhi, BAO Xingxing, WU Yongjun, YANG Zhenchao. Effects of adding different intensities of far-red light on the growth and photosynthesis of cucumber seedlings[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(02):66-76.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.02.07

添加不同强度的远红光对黄瓜幼苗生长及光合作用的影响

李雪¹ 赵士文¹ 张冠智¹ 包星星¹ 武永军² 杨振超^{1*}

(1. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要 为探究远红光强度对黄瓜幼苗形态、光合性状及碳水化合物的影响, 明确不同红光(R)/远红光(FR)比值对黄瓜光合相关指标及参数的影响, 以‘新津优1号’黄瓜为材料, 在固定红蓝光强度及光合有效辐射的基础上, 添加3种不同强度的远红光, 使得各处理红光:远红光的比值分别为10(L-FR)、1.2(M-FR)和0.8(L-FR), 比较不同处理对于黄瓜幼苗生长及光合的影响。结果表明:增加远红光强度对黄瓜幼苗形态指标影响显著, M-FR和H-FR处理的鲜重较L-FR分别显著增加60.04%和56.60%; H-FR和M-FR处理株高较L-FR分别增加246.43%和200.63%。随着远红光强度增加, 3个处理组气孔密度也随之显著增加, 且气孔发育关键基因(*MUTE*和*EPF1*)相对表达量差异显著, 蒸腾速率(*E*)、胞间CO₂浓度(*Ci*)和气孔导度(*Gsw*)随之增加; 叶片上表皮、栅栏组织、海绵组织及叶片厚度均呈现下降趋势; 在一定程度内添加远红光将提高Rubisco酶活化水平。各处理黄瓜幼苗的总氮含量和碳氮比均随着远红光强度的增加而显著下降, L-FR处理黄瓜碳水化合物含量低于H-FR处理。综上, M-FR处理的远红光强度适宜作为远红光补充强度用于工厂化育苗生产中。

关键词 远红光; 黄瓜幼苗; 形态; 光合; 碳水化合物

中图分类号 S643.6

文章编号 1007-4333(2024)02-0066-11

文献标志码 A

Effects of adding different intensities of far-red light on the growth and photosynthesis of cucumber seedlings

LI Xue¹, ZHAO Shiwen¹, ZHANG Guanzhi¹, BAO Xingxing¹,
WU Yongjun², YANG Zhenchao^{1*}

(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2. College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to investigate the effects of far-red light intensity on the morphology, photosynthetic traits and carbohydrates of cucumber seedlings, and to clarify the effects of different red light (R)/far-red light (FR) ratios on the photosynthesis-related indexes and parameters of cucumber, cucumbervariety ‘Xinjin You No. 1’ was taken as the study material. On the basis of fixing the red-blues light intensity and the photosynthetically active radiation, three different kinds of fixed red and blue light intensity and photosynthetically active radiation, three different kinds of far-red light were added to make the ratio of red light: far-red light of each treatment 10 (L-FR), 1.2 (M-FR) and 0.8 (L-FR), respectively, aiming to compare the effects of the different treatments on the growth and photosynthesis of cucumber seedlings.

收稿日期: 2023-05-07

基金项目: 陕西省技术创新引导专项(2021QFY08-02); 2021年陕西省千亿级设施农业专项(K3030821094); 西藏高原设施蔬菜关键技术创新与集成项目(XZ202202YD0002C); 设施蔬菜瓜果名优品种引进与标准化示范基地建设项目(QYXTZX-AL2023-07)

第一作者: 李雪(ORCID:0009-0003-4096-4605), 硕士研究生, E-mail: lixue5891@foxmail.com

通讯作者: 杨振超(ORCID:0000-0002-0017-4348), 副教授, 主要从事设施农业环境工程的研究, E-mail: yangzhenchao@mail.nwsuaf.edu.cn

The results showed that: Increasing far-red light intensity had a significant effect on the morphological indexes of cucumber seedlings, and the fresh weight of M-FR, and H-FR groups increased significantly by 60.04% and 56.60%, respectively, compared with that of L-FR group; The plant height of H-FR and M-FR groups increased by 246.43% and 200.63%, respectively, compared with that of L-FR. With the increase of far-red light intensity, the stomatal density of the three treatment groups also increased significantly, and the relative expression of key genes of stomatal development (MUTE, EPF1) differed significantly, while their transpiration rate (E), inter-cellular CO_2 concentration (Ci) and stomatal conductance (Gsw) increased; The epidermis of the leaf blade, the fenestrated tissues, spongy tissues, and the thickness of the leaf blade showed a decreasing trend. The total nitrogen content and carbon to nitrogen ratio of cucumber seedlings in all treatments showed a significant decreasing trend with the increase of far-red light intensity; the carbohydrate content of cucumber under L-FR treatment was lower than that of H-FR treatment. In conclusion, the far-red light intensity under M-FR treatment is suitable to be used as a supplemental intensity of far-red light in factory nursery production.

Keywords far-red light; cucumber seedlings; morphology; photosynthesis; carbohydrate

植物光合作用受光质变化的影响明显^[1],波长为400~700 nm的光对于植物光合作用效果显著^[2]。然而远红光(700~800 nm)由于其波长长故而穿透力极强,易引起植物“避荫反应”(SAS)^[3],这一现象多见于植被密度过高,低矮处植株光照不足时^[4]。植物体内的光敏色素主要以红光吸收型(Pr)和远红光吸收型(Pfr)这2种不同的形式存在,光敏色素通过这2种构型之间的转换影响植物的形态建成和生理反应^[5]。2种形式之间的转化与不同红光与远红光比值密切相关。在高R:FR下,光平衡向活性Pfr形式移动,SAS响应受到抑制;在低R:FR下,光平衡向非活性Pr形式重新平衡,并诱导SAS响应^[6]。在拟南芥(*PHYA-PHYE*)中编码光敏色素的5个基因中,*PHYA*和*PHYB*在SAS响应中起着关键作用^[7]。

已有众多研究表明,添加远红光对植物形态特征、光合色素含量及相关营养指标有显著影响。艾楷棋等^[8]报道,在低R:FR环境下,西红柿的干鲜生物量分别显著增加了28.46%和33.26%。大豆和生菜的生物量在高原红光条件下显著增加^[9-10]。Li等^[1]研究发现,远红光通过提高植物体内赤霉素的含量,从而增加节间长度和植株高度。Paponov等^[11]指出补充远红光到红蓝光的照明中可加快冬季温室甜椒的生长并增加产量。但鲜少有研究完整探究不同远红光下对植物光合能力相关参数、叶绿素荧光和叶片结构的整体影响。

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)作为我国栽培的主要瓜菜之一^[12],在设施园艺中广为栽培,更快更好地培

育出健壮的黄瓜幼苗对于黄瓜栽培起着关键作用。多项研究表明,远红光对于植物形态调控起着关键作用,在植物伸长生长方面影响显著,但过高的远红光强度同样使得植物陷入“避荫”胁迫中,导致其光合能力下降,影响正常生长发育。本试验以黄瓜幼苗为试验材料,通过对黄瓜幼苗形态指标、光合速率及光合产物的测定,遴选出添加远红光的适宜强度,以期为设施内工厂化LED补光育苗提供参考。

1 材料与方法

试验于2022年在西北农林科技大学园艺学院设施农业生物与环境工程实验室进行。

1.1 试验材料

供试材料为黄瓜‘新津优1号’,种子购置于山东泰安华益种业有限责任公司。将黄瓜种子催芽后播于10 cm×10 cm营养钵中,在人工气候箱内生长。光强150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,昼夜温度25℃/20℃,光周期12 h/12 h,相对湿度60%,适量浇灌水分。在生长至子叶完全展开后,移植到装有LED光源的栽培架中,浇灌1/4 Hoagland黄瓜营养液(pH为6.5±0.1,EC值为2.2~2.5 ms/cm),其中昼夜温度28℃/25℃,相对湿度40%~50%,长至25 d约4叶1心时测定相关指标。

1.2 试验设计

光源采用西安因变光电科技有限公司生产的LED灯板和LED控制系统V1.0,可调节LED光质配比及光照强度。设置试验光合有效辐射(400~700 nm)范围内的光照强度为200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光

周期 12 h/12 h,控制各处理光质中红光:蓝光=4:1,各处理中远红光光强分别设置为 16、133 和 192 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (表 1),使处理间 R:FR 比例分别为 10、1.2 和 0.8,各处理光谱图如图 1 所示。

表 1 不同处理的红光、蓝光和远红光光强

Table 1 Intensity of red light, blue light and far red light under different treatments					
处理 Treatment	红光/ $(\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$ Red Light	蓝光/ $(\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$ Blue Light	光合有效辐射强度/ $(\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$ PPFD	远红光/ $(\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$ Far red Light	红光:远红 R:FR
L-FR	160	40	200	16	10:1
M-FR	160	40	200	133	1.2:1
H-FR	160	40	200	192	0.8:1

注:L-FR代表低远红光处理,M-FR代表中远红光处理,H-FR代表高远红光处理。下同。
Note: L-FR stands for low far-red treatment, M-FR stands for medium far-red treatment, and H-FR stands for high far-red treatment. The same below.

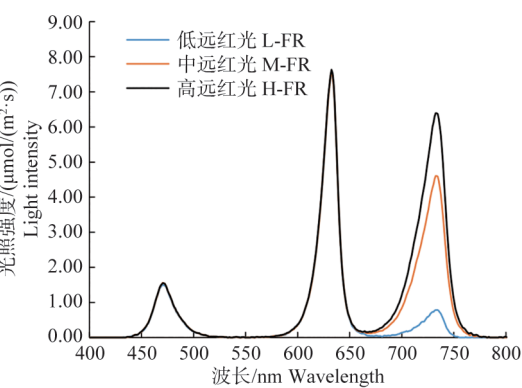


图 1 不同强度远红光处理光谱图

Fig. 1 Spectra of far-red light treated with different intensities

1.3 项目测定

1.3.1 形态指标

在黄瓜幼苗生长至 4 叶 1 心时随机选取 6 株,使用刻度尺测定地上部高度;使用游标卡尺测定茎粗;使用叶面积仪(AM350 便携式叶面积仪,英国)测定各叶片面积,用电子天平测定地上部鲜重,短暂杀青后 60℃烘至恒重测其干重。

1.3.2 气孔特征

每个处理随机选取 3 株黄瓜幼苗,取第 3 片叶的相同叶位制作临时装片。将所取叶片放置于透明胶带上,轻压使之结合紧密后用刀片轻刮去叶肉组织;将装片粘贴至载玻片,切片于显微镜下(奥林巴斯 BX63,日本)观察。于 20× 观察测定气孔密度,于 40× 下观察测定气孔大小,每个装片选取 10 个视野,每个视野选取 20 个气孔,通过 ImageJ 软

件测量气孔长、气孔宽、孔隙长及孔隙宽。孔隙面积=π×孔隙长/2×孔隙宽/2。

1.3.3 叶片结构测定

选取各处理中的 3 株黄瓜幼苗的第 3 片真叶,在避开主叶脉的相同叶位取 10 mm×10 mm 的叶片,放入 FAA 固定液中,再经乙醇脱水、二甲苯透明、番红-固绿染色和石蜡包埋切片等步骤,最终制成石蜡切片,置于显微镜下(奥林巴斯 BX63,日本)观察。每个装片选取 10 个视野,通过 ImageJ 软件测量叶片、上下表皮、栅栏组织和海绵组织厚度。

1.3.4 光合色素及光合特性的测定

选取各处理中的 3 株黄瓜幼苗的第 3 片真叶,参照高俊凤^[13]的方法测定叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素的含量。

选取各处理中的 3 株黄瓜幼苗的第 1 片真叶,使用植物光合测定仪 6800(LI-6800,美国)测定其蒸腾速率(E)、净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)及气孔导度(G_{sw})。设置叶室温度为 24℃, CO_2 水平为 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,相对湿度为 60%,设定测定光源为 R90B10,光强为 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

1.3.5 Rubisco 酶活性的测定

使用植物 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶 ELISA 检测试剂盒(江苏酶免实业有限公司)测定各处理植株中的 Rubisco 酶活。

1.3.6 叶绿素荧光的测定

使用双通道调制叶绿素荧光仪(DUAL-PAM-100,德国)测定叶绿素荧光相关参数。每个处理随机取 3 株黄瓜幼苗,选取第 3 片真叶进行测定。测量前植株叶片需暗适应 30 min,然后打开测量光,

记录暗适应后的最小荧光 F_0 ；紧接着打开1个持续时间0.3 s的饱和脉冲光，测量并记录暗适应后的最大荧光 F_m ；饱和脉冲光关闭后荧光迅速回到 F_0 附近；然后打开光化光，记录叶绿素荧光从黑暗转到光照的响应过程，待荧光曲线达到稳态后关闭光化光，结束整个测量过程，记录并保存荧光数据。

1.3.7 总碳和总氮含量的测定

将烘干后的地上部植株整株打碎研磨，过0.15 mm筛后，称取0.2 g置于全自动碳氮分析仪（荷兰）测定总碳和总氮含量。

1.3.8 碳水化合物的测定

每个处理随机选取3株黄瓜幼苗，取第1片至第4片共4片真叶，充分研磨后测定相关指标。可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝G-250染色法^[13]，淀粉含量的测定采用淀粉含量检测试剂盒（北京索莱宝生物科技有限公司）。

每个处理随机选取3株黄瓜幼苗，取第1片至第4片共4片真叶，将样本短暂杀青后60℃烘干至恒重，研磨后过0.15 mm筛测定可溶性糖及蔗糖含量。可溶性糖质量分数的测定采用蒽酮比色法^[11]，蔗糖含量采用张志良等^[14]的方法测定。

1.3.9 实时定量RT-PCR检测

取顶端幼嫩组织2 g，放入2 mL离心管并迅速液氮冷冻，后使用高通量研磨仪高频震荡。选取气孔发育相关基因 *EPF1*^[15] 和 *MUTE*^[16]，通过Primer Premier 5.0设计引物，引物序列见表2。用RBA提取试剂盒（Aidab，中国）按照试剂标准步骤提取叶片总RNA。使用反转录试剂盒（Cofitt，中国），按照试剂标准步骤将提取的RNA反转录成cDNA。按照2×qPCR SmArt Mix（SYBR Green）试剂盒（上海笛医生物科技有限公司）进行Real-time PCR反应，反应体系为20 μL，基因相对表达量使用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 分析。

表2 用于实时RT-PCR检测的引物

Table 2 Primers for real-time RT-PCR detection

基因 Gene	上游引物序列 Forward primer	下游引物序列 Reverse primer
<i>action</i>	5'-CACCAAGCCCAAGAAGATC-3'	5'-TAAACCTAATCACCACCAGC-3'
<i>EPF1</i>	5'-GCATCATCCTCTGGTAAAGCAG-3'	5'-GACCCTGCTACTTCAACAGTCTCAG-3'
<i>MUTE</i>	5'-CAAATAAACGAAGGAGGAAGAG-3'	5'-CTATTATCAGATCCCCAAAGCCAC-3'

1.4 统计分析

用Microsoft Office Excel 2020整理数据并绘制图表，用IBM SPSS Statistics 25分析显著性差异。

2 结果与分析

2.1 远红光强度对黄瓜幼苗生理形态的影响

对不同强度处理下黄瓜幼苗的株高、鲜重、干重及总叶面积进行测定可知（表3），3个处理组间的株高差异显著。随着远红光强度的增加，各处理组的株高也显著增加，其中H-FR和M-FR处理株高较L-FR分别增加246.43%和200.63%。较高的远红光强度不利于茎的横向生长，L-FR处理较H-FR茎粗增加19.62%。较高远红光比例促进黄瓜幼苗鲜重的增长，其中M-FR和H-FR处理的鲜重较L-FR有显著增加，分别增加60.04%和56.60%。随着远红光强度的增加，总叶面积也随之减少，L-FR处理较M-FR和H-FR总叶面积分别

增加7.48%和8.60%。

2.2 远红光强度对黄瓜幼苗气孔特征的影响

对各处理下气孔结构进行观察（图3）并测定数据（表4）。随着远红光强度的增加，各处理间气孔宽度呈现上升趋势，但L-FR与M-FR处理间无显著性差异，H-FR处理气孔宽度较L-FR和M-FR分别增加9.26%和7.91%。高远红光强度增大了孔隙宽度，H-FR处理孔隙宽度较L-FR和M-FR分别增加7.63%和12.39%。随着远红光强度的增加，气孔长度随之增加，H-FR处理气孔长度较L-FR和M-FR分别增加5.31%和2.61%。3个处理组的气孔密度也随之显著性增加，H-FR处理气孔密度较L-FR和M-FR分别增加45.56%和11.30%，且M-FR和L-FR处理差异显著。H-FR处理气孔孔隙面积较L-FR和M-FR分别显著增加11.30%和19.11%。

表3 远红光强度对黄瓜幼苗形态指标的影响

Table 3 Effects of far red light intensity on morphological indices of cucumber seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Tem diameter	鲜重/g Fresh weight	干重/g Dry weight	总叶面积/cm ² Total leaf area
L-FR	23.95±3.23 c	6.34±0.62 a	19.796±2.233 b	1.829±0.417 a	605.963±70.589 a
M-FR	72.00±4.58 b	5.65±0.13 ab	31.682±2.707 a	2.079±0.444 a	573.087±19.626 a
H-FR	82.97±3.63 a	5.30±0.20 b	31.000±3.581 a	2.037±0.406 a	567.203±67.817 a

注:同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。
Note: Data in the same column with different letters indicate significant differences ($P<0.05$), and the same letters indicate non-significant differences($P>0.05$). The same below.

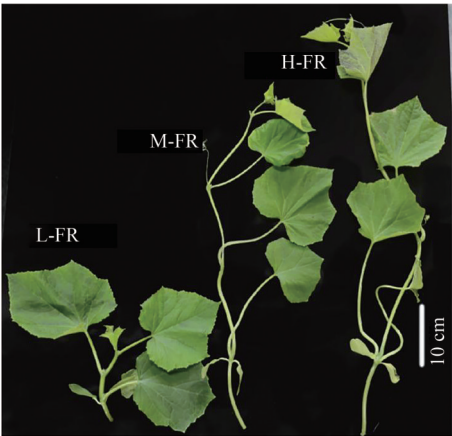


图2 不同远红光强度下黄瓜幼苗形态
Fig. 2 Morphology of cucumber seedlings under different far-red light intensities

2.3 远红光强度对黄瓜幼苗叶片结构的影响

对不同处理的叶片石蜡切片(图4)进行观察所得数据见表5,远红光强度对黄瓜幼苗叶片上表皮、栅栏组织、海绵组织和叶片厚度均产生显著性影响。随着远红光强度的增加,上表皮、栅栏组织、海绵组织及叶片厚度均呈现下降趋势。L-FR处理上表皮厚度较M-FR和H-FR分别增加8.45%和21.68%,栅栏组织厚度较M-FR和H-FR分别增加8.92%和23.79%,海绵组织厚度较M-FR和H-FR显著增加17.27%和37.24%,叶片厚度较M-FR和H-FR显著增加15.50%和33.27%。各处理间下表皮厚度无显著性差异。

表4 不同强度远红光对黄瓜幼苗叶片气孔特征的影响

Table 4 Effects of different intensities of far-red light on stomatal characteristics of cucumber seedling leaves

处理 Treatment	孔隙宽/ μm Pore width	孔隙长/ μm Pore length	气孔宽/ μm Stomatal width	气孔长/ μm Stomatal length	气孔密度/(N/mm ²) Stomatal density	孔隙面积/ μm^2 Pore area
L-FR	3.737±0.590 b	15.029±1.329 b	9.208±1.382 a	19.973±1.955 b	838.949±43.476 c	27.089±7.576 b
M-FR	3.579±0.534 b	15.217±1.193 b	9.495±1.409 a	20.500±1.953 ab	1 097.170±59.602 b	25.314±7.223 b
H-FR	4.022±0.456 a	16.421±1.337 a	9.467±1.240 a	21.035±1.899 a	1 221.165±42.343 a	30.151±6.217 a

表5 不同远红光强度对黄瓜幼苗叶片结构的影响

Table 5 Effects of different far-red light intensities on structural parameters of cucumber seedling leaves

处理 Treatment	上表皮厚度 Upper epidermis thickness	栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness	海绵组织厚度 Spongy tissue thickness	下表皮厚度 Inferior epidermis thickness	叶片厚度 Blade thickness
L-FR	10.495±1.323 a	36.58±1.908 a	62.408±1.714 a	5.757±0.336 a	123.124±3.680 a
M-FR	9.677±1.948 ab	33.585±2.081 ab	53.218±1.829 b	6.253±0.422 a	106.604±4.234 b
H-FR	8.625±0.966 b	29.549±0.581 b	45.473±1.490 c	5.945±0.427 a	92.384±1.727 c

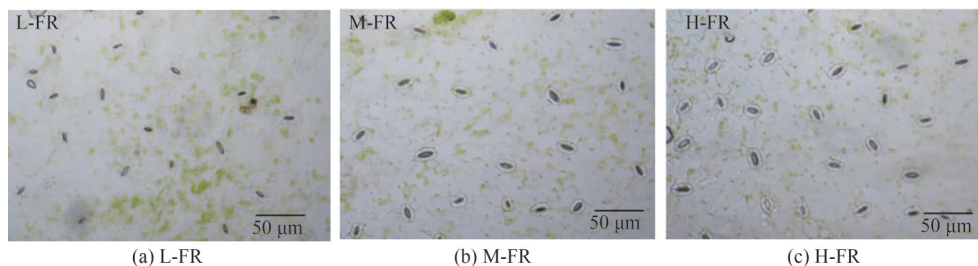


图 3 不同远红光强度下的黄瓜气孔

Fig. 3 Cucumber stomatal under different intensities of far-red light

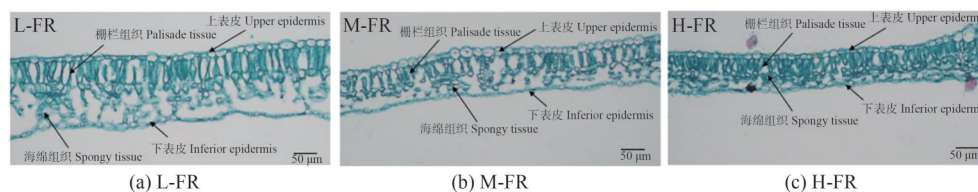


图 4 不同远红光强度下的黄瓜叶片

Fig. 4 Cucumber leaves under different intensities of far-red light

2.4 远红光强度对黄瓜幼苗光合色素及光合特性的影响

对不同处理的黄瓜幼苗叶片叶绿素的含量进行测定(表 6)。随着远红光强度的增加,其叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量均出现下降趋势。其

中 L-FR 和 M-FR 两处理间叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均无显著差异。L-FR 处理较 H-FR 叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别增加 42.76% 和 30.53%。M-FR 与 H-FR 处理类胡萝卜素无显著性差异, L-FR 处理较 M-FR 和 H-FR 显著增加 15.50% 和 33.27%。

表 6 不同远红光强度下黄瓜幼苗光合色素含量

Table 6 Photosynthetic pigment content of cucumber seedlings under different far red light intensity			mg/L
处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content
L-FR	8.901±0.333 a	8.552±0.774 a	3.406±0.080 a
M-FR	8.235±0.547 a	7.954±0.557 a	3.006±0.094 b
H-FR	6.235±0.377 b	6.555±0.417 b	2.806±0.297 b

对各处理下黄瓜幼苗光合相关性状进行测定,得到结果如图 5 所示。不同强度远红光对黄瓜幼苗光合特性相关指标影响差异显著。随着远红光强度的增加,其蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度及气孔导度随之增加, H-FR 处理较 L-FR 和 M-FR 蒸腾速率显著增加 151.08% 和 113.31%, 胞间 CO₂ 浓度分别显著增加 33.14% 和 31.02%, 气孔导度分别显著增加 48.60% 和 38.81%; 但净光合速率随之降低, L-FR 较 H-FR 处理净光合速率显著增加 43.75%。

2.5 远红光强度对黄瓜幼苗 Rubisco 酶活性的影响

对各处理下黄瓜幼苗 Rubisco 酶活性进行测定

(图 6)。M-FR 处理较 L-FR 和 H-FR 的 Rubisco 酶活显著增加 86.00% 和 81.59%, 但 L-FR 和 H-FR 两处理间无显著性差异。

2.6 远红光强度对黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

对各处理下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数进行测定,得到数据如表 7 所示。随着远红光强度的增加, PSII 最大光量子效率(F_v/F_m)值呈现下降趋势, 但各处理间无显著性差异。ΦPSII 和 ETR 随着远红光强度的增加呈现上升趋势, H-FR 处理较 L-FR 的 PSII 和 ETR 分别增加 201.43% 和 154.13%。ΦNO 与 ΦNPQ 变化趋势一致, 均为 M-FR>L-FR>H-FR, 其中 ΦNO 值 M-FR 处理较 H-FR 显著增加 84.36%。

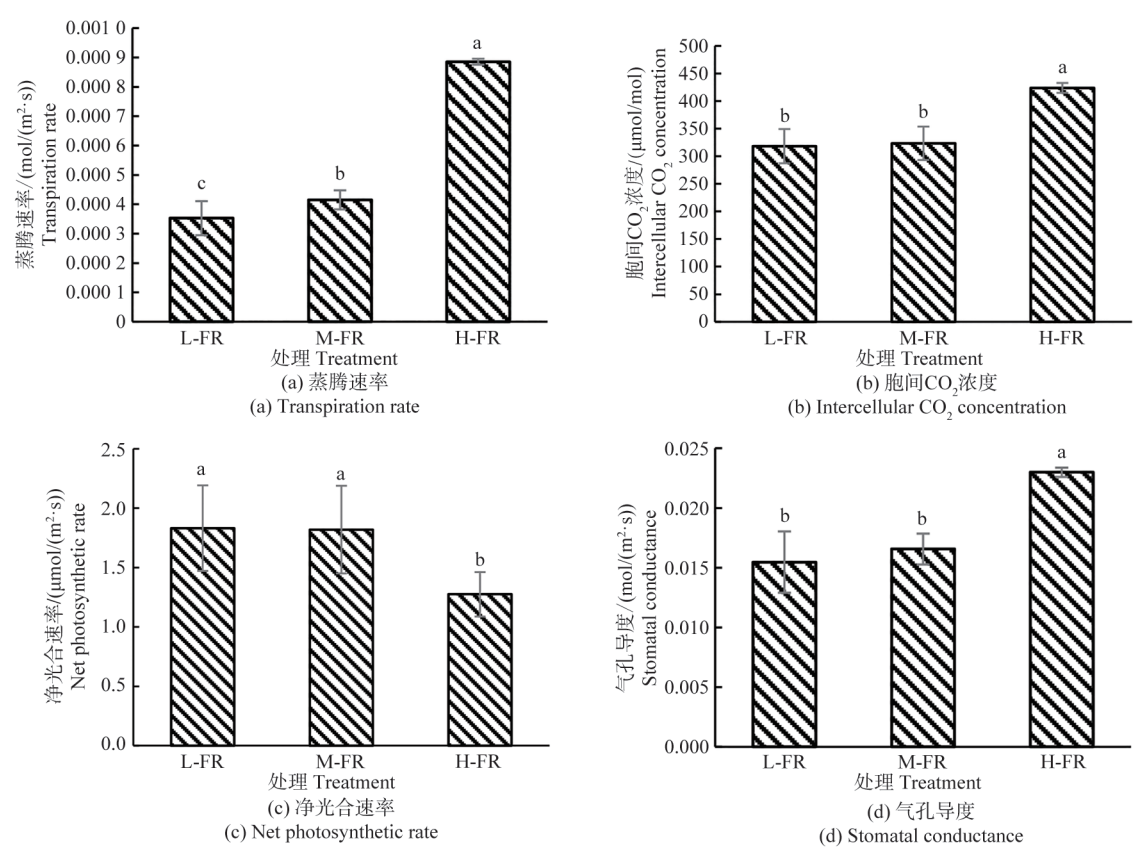


图5 远红光强度对黄瓜幼苗光合特性的影响

Fig. 5 Effects of different far red light intensity on photosynthetic characteristics of cucumber seedlings

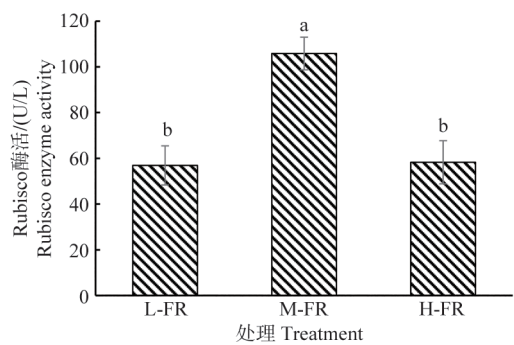


图6 远红光强度对黄瓜幼苗Rubisco酶活的影响

Fig. 6 Effects of different far red light intensity on Rubisco enzyme activity in cucumber seedlings

2.7 远红光强度对黄瓜幼苗总碳、总氮的影响

对各处理下黄瓜幼苗总碳、总氮含量进行测定,得到数据如表8所示。H-FR处理较L-FR和M-FR的总碳含量显著增加。但随着远红光强度的增加,各处理黄瓜幼苗的总氮含量显著下降,碳氮比变化趋势与总氮含量变化趋势相同,L-FR处理较M-FR和H-FR总氮含量分别增加3.97%和

4.74%,碳氮比分别增加2.50%和19.92%。

2.8 远红光强度对黄瓜幼苗碳水化合物的影响

对各处理下黄瓜幼苗碳水化合物含量进行测定,得到数据如表9所示。各处理下黄瓜幼苗的可溶性糖、可溶性蛋白及蔗糖含量变化均为L-FR>H-FR>M-FR。可溶性蛋白含量各处理间无显著性差异;可溶性糖和蔗糖含量L-FR与H-FR处理无显著差异,L-FR较M-FR可溶性糖和蔗糖含量分别增加23.04%和20.62%。随着远红光比例的增加,淀粉含量呈下降趋势,L-FR处理较M-FR和H-FR分别显著增加了65.39%和115.06%。

2.9 远红光强度对黄瓜幼苗气孔发育基因相对表达量的影响

对各处理下黄瓜幼苗气孔发育基因相对表达量进行测定(图7)。随着远红光强度的增加,基因MUTE相对表达量呈现上升趋势,H-FR处理较L-FR和M-FR分别上升118.31%和111.28%。基因EPF1呈现下降趋势,M-FR和H-FR处理较L-FR分别下降32.76%和28.78%。

表 7 远红光强度对黄瓜叶绿素荧光参数的影响

Table 7 Effects of different far red light intensity on chlorophyll fluorescence parameters of cucumber

处理 Treatment	Fv/Fm	ΦPSII	ETR	ΦNO	ΦNPQ	NPQ	qL
L-FR	0.836±	0.140±	54.250±	0.373±	0.403±	1.297±	0.072±
	0.015 a	0.011 b	4.301 b	0.005 ab	0.083 a	0.001 a	0.014 b
M-FR	0.802±	0.202±	64.750±	0.448±	0.472±	1.096±	0.056±
	0.018 a	0.049 ab	13.308 b	0.050 a	0.056 a	0.121 a	0.004 b
H-FR	0.780±	0.422±	137.867±	0.243±	0.334±	1.448±	0.133±
	0.024 a	0.112 a	22.646 a	0.062 b	0.054 a	0.167 a	0.004 a

注：Fv/Fm 为 PSII 最大光量子效率；ΦPSII 为 PSII 实际光化学量子产额；ETR 为 PSII 光合电子传递速率；ΦNO 为 PSII 非调节性能量耗散的量子产额；ΦNPQ 为 PSII 调节性能量耗散的量子产额；NPQ 为非光化学淬灭；qL 为光化学淬灭。
Note: Fv/Fm is the maximum photometric quantum efficiency of PSII; ΦPSII is the actual photochemical quantum yield of PSII; ETR is the photosynthetic electron transfer rate of PSII; ΦNO is the quantum yield of unregulated energy dissipation of PSII; ΦNPQ is the quantum yield of regulated energy dissipation of PSII; NPQ is non-photochemical quenching; qL is photochemical quenching.

表 8 远红光强度对黄瓜幼苗总碳、总氮含量的影响

Table 8 Effects of different far red light intensity on total carbon and nitrogen of cucumber seedlings

处理 Treatment	总碳含量/% Total carbon content	总氮含量/% Total nitrogen content	碳氮比 C/N
L-FR	7.857±0.058 b	37.952±0.059 a	4.829±0.028 a
M-FR	7.746±0.058 b	36.504±0.057 b	4.711±0.039 b
H-FR	8.996±0.058 a	36.236±0.067 c	4.027±0.019 c

表 9 远红光强度对黄瓜幼苗碳水化合物含量的影响

Table 9 Effects of different far red light intensity on carbohydrate of cucumber seedlings

处理 Treatment	可溶性糖质量分数/(mg/100 g) Mass fraction of soluble sugar	可溶性蛋白质质量分数/(mg/g) Mass fraction of soluble protein	淀粉质量分数/(mg/g) Mass fraction of starch	蔗糖质量分数/(mg/g) Mass fraction of sucrose
L-FR	129.570±7.491 a	7.394±0.581 a	13.620±1.678 a	1.287±0.228 a
M-FR	105.305±3.680 b	6.979±0.961 a	8.235±0.474 b	1.167±0.300 b
H-FR	115.613±7.106 ab	7.049±0.578 a	6.333±0.618 c	1.318±0.265 a

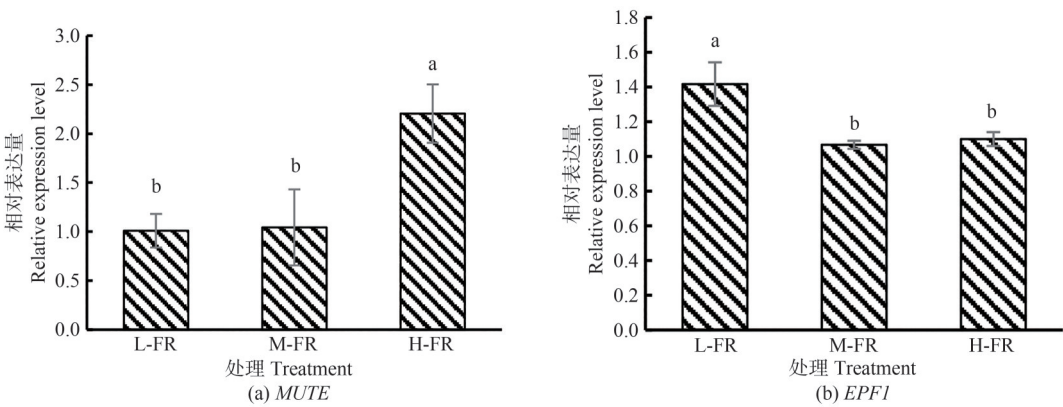


图 7 远红光强度对黄瓜幼苗气孔发育基因相对表达量的影响

Fig. 7 Effects of different intensities of far-red light on relative expression levels of stomatal development genes in cucumber seedlings

3 讨 论

3.1 远红光强度对黄瓜幼苗生理形态的影响

植物具有感受红光与远红光的光感受器,这些光感受器被称为光敏色素,由发色团和载脂蛋白组成^[17]。植物冠层红光/远红光比值的降低会改变发色团结构^[18],一些光敏色素从具有生物活性的远红光吸收状态(Pfr)变为无生物活性红光吸收形式(Pr)^[19-20],并且通过相关基因的表达来调节植物的内源激素水平,以调节植物形态发生并捕获更多的光能^[21-23]。随着远红光强度的增加,各处理间的株高随之显著性增加,这与前人研究结果一致^[21]。

3.2 远红光强度对黄瓜幼苗细胞形态的影响

远红光对于植物细胞形态影响差异较大。本试验得出,随着远红光强度增加,3个处理组气孔密度也随之显著性增加,H-FR处理气孔密度较L-FR和M-FR分别增加45.56%和11.30%。前人研究表明,高远红光比例增加了菊花^[24]和千屈菜科植物^[25]的气孔密度,但却降低了拟南芥^[26]和小麦^[27]的气孔密度。Shibuya等^[28]研究表明,随着远红光比例的升高,黄瓜气孔密度随之降低,本试验结果与此不一致。有研究表明,低红光/远红光比值通过改变光敏色素 $phyB$ 的生物活性形式和气孔发育基因表达来改变气孔密度^[29]。故而猜测远红光通过改变黄瓜叶片气孔发育基因表达,从而影响气孔发育。

本试验选取气孔发育关键基因 $EPF1$ 和 $MUTE$ 进行验证。 $EPF1$ 编码在气孔细胞和前体中表达的小分泌肽,并通过控制不对称细胞分裂调节气孔发育;过表达 $EPF1$ 拟南芥植株气孔数量显著下降^[15],因此 $EPF1$ 表达水平与气孔密度呈负相关。通过实时定量RT-PCR检测得出,随着远红光强度的增加, $EPF1$ 呈现下降趋势,M-FR和H-FR处理较L-FR分别下降32.76%和28.78%。 $MUTE$ 将细胞周期模式从增殖不对称分裂切换到终端对称分裂,并编排单个对称分裂事件的执行^[30],在气孔分化发育过程中起着重要作用^[16],其表达量与气孔密度呈正相关。随着远红光强度的增加, $MUTE$ 相对表达量呈现显著上升趋势,H-FR处理较L-FR和M-FR分别上升118.31%和111.28%。由此可得,随着远红光强度的增加,黄瓜叶片气孔密度呈现上升趋势。

叶片是高等植物光合作用的主要器官。在叶片内部,叶肉组织调节光传输以进行光合作用。通过调节叶片结构中栅栏和海绵状组织厚度,以减少叶片背腹面的光接收差异^[31]。植物叶片可以通过

改变叶肉组织结构,调节光能的捕获及交换气体以应对光胁迫^[32]。已有研究表明,添加远红光会使得叶片厚度下降^[33-34],主要是由于低红光/远红光比值处理下植物通过降低栅栏组织的细胞大小和细胞数量来减少厚度,从而使得叶片厚度下降^[35-36]。本试验结果与前人研究结果一致,随着远红光强度的增加,上表皮、栅栏组织、海绵组织及叶片厚度均呈现下降趋势。

3.3 远红光强度对黄瓜幼苗叶绿素含量、光合相关参数及叶绿素荧光参数的影响

叶绿素在光能的吸收、传输和转化中起重要作用,叶绿素的含量和组成直接影响叶片的光合能力^[31]。随着远红光强度的增加,叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量均出现下降趋势,这与Kasperbauer等^[37]对烟草、Kim等^[38]对番茄的研究结果一致。

随着远红光强度的增加,蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度及气孔导度随之增加,推测是由于气孔密度的增加,故而随之增加。由于远红光强度的增加,引起植物“避荫反应”^[3],故净光合速率随远红光强度的增加而降低。

F_v/F_m 表示PSII利用吸收的光能来减少PSII的主要醌受体(Q_A)的效率^[39],该指标可评价植物受到非生物胁迫的水平。当 F_v/F_m 低于0.83时,表示植物受到胁迫而使得光合能力下降^[40]。本研究表明随着远红光强度的增加, F_v/F_m 值呈现下降趋势,且H-FR和M-FR两处理组该值小于0.83,表示处理下的植株受到“避荫”胁迫影响。 $\Phi PSII$ 表示PSII实际光合能力,ETR表示光合电子传递速率。本研究表明随着远红光强度的增加, $\Phi PSII$ 呈现显著上升趋势,因为远红光增加了光系统I(PSI)活性,导致质体醌的再氧化更快,并促进PSII反应中心的重新开放^[41],故而光合电子传递速率上升。

3.4 远红光强度对黄瓜幼苗碳同化能力及碳水化合物含量的影响

已有研究表明,Rubisco酶活性受到植物所处光环境的影响^[42-43],前人研究表明,连续的远红光照射增加了野生型烟草中的Rubisco酶活性^[44]。也有学者研究得出,Rubisco酶活化水平与光质影响不大,主要受到其所处的光环境强度影响,弱光条件下各光质处理均低于高光强处理^[45]。故而在适宜光强下增加一定的远红光可提高Rubisco酶活化水平。

随着远红光强度的增加,各处理黄瓜幼苗的总氮含量和碳氮比均呈现显著性下降趋势;相比L-FR处理,H-FR和M-FR处理可溶性糖、可溶性蛋

白、淀粉及蔗糖含量均呈现下降趋势。远红光对植物光合作用产物的影响可能与物种有关,前人研究表明,与正常光相比,增加远红光强度会增加大豆^[9]和菊花^[46]中的蔗糖和淀粉含量,在草莓中显示出增加蔗糖含量和降低淀粉含量^[46]。然而远红光对光合产物产生和降解的影响机制尚不清楚,也鲜有报道。

4 结 论

在3个处理组中,随着远红光强度的增加,其株高显著上升;气孔密度显著上升,且气孔发育基因 *EPF1* 与 *MUTE* 表达量变化显著;上表皮、栅栏组织、海绵组织及叶片厚度均呈现下降趋势;光合色素呈现下降趋势;但在一定程度内添加远红光将提高 Rubisco 酶活化水平。随着远红光强度的增加,各处理黄瓜幼苗的总氮含量和碳氮比均呈现显著性下降趋势;H-FR 处理下黄瓜碳水化合物含量低于 L-FR 处理。综上,添加适当远红光有利于黄瓜幼苗伸长生长,提高电子传递速率,以 M-FR 处理更适宜工厂化育苗。

参考文献 References

- [1] Li Y M, Jiang H Z, Gao M F, He R, Liu X J, Su W, Liu H C. Far-red-light-induced morphology changes, phytohormone, and transcriptome reprogramming of Chinese kale (*Brassica alboglabra* bailey)[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(6): 5563
- [2] Bautista-Saraiva A I N, Bonomi-Barufi J, Figueroa F L, Necchi O Jr. UV-radiation effects on photosynthesis and photoprotection in gametophytic and sporophytic stages of the freshwater red *Alga Kumanoa ambigua* (Rhodophyta, Batrachospermales)[J]. *Phycological Research*, 2018, 66(2): 108-116
- [3] Kasperbauer M J. Far-red light reflection from green leaves and effects on phytochrome-mediated assimilate partitioning under field conditions [J]. *Plant Physiology*, 1987, 85(2): 350-354
- [4] Huber M, Nieuwendijk N M, Pantazopoulou C K, Pierik R. Light signalling shapes plant-plant interactions in dense canopies [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(4): 1014-1029
- [5] Whitelam G C, Smith H. Retention of phytochrome-mediated shade avoidance responses in phytochrome-deficient mutants of *Arabidopsis*, cucumber and tomato[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1991, 139(1): 119-125
- [6] Legris M, Ince Y Ç, Fankhauser C. Molecular mechanisms underlying phytochrome-controlled morphogenesis in plants [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5219
- [7] Balcerowicz M. PHYTOCHROME-INTERACTING FACTORS at the interface of light and temperature signalling[J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, 169(3): 347-356
- [8] 艾楷棋, 苏华, 周海将, 周冰, 曹凯, 邹志荣. 不同红光与远红光对盐胁迫下番茄叶绿素合成的影响[J]. 北方园艺, 2019(1): 14-22
- [9] Ai K Q, Su H, Zhou H J, Zhou B, Cao K, Zou Z R. Effects of different R:FR ratio on chlorophyll biosynthesis in tomato leaves under salt stress[J]. *Northern Horticulture*, 2019(1): 14-22 (in Chinese)
- [9] Yang F, Liu Q L, Cheng Y J, Feng L G, Wu X L, Fan Y F, Raza M A, Wang X C, Yong T W, Liu W G, Liu J, Du J B, Shu K, Yang W Y. Low red/far-red ratio as a signal promotes carbon assimilation of soybean seedlings by increasing the photosynthetic capacity[J]. *BMC plant biology*, 2020, 20(1): 148
- [10] Zou J, Zhang Y T, Zhang Y Q, Bian Z H, Fanourakis D, Yang Q C, Li T. Morphological and physiological properties of indoor cultivated lettuce in response to additional far-red light[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108725
- [11] Paponov M, Kechasov D, Lacey J, Verheul M J, Paponov I A. Supplemental light-emitting diode inter-lighting increases tomato fruit growth through enhanced photosynthetic light use efficiency and modulated root activity[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 10: 1656
- [12] 姜林杰, 耿岳, 王璐, 彭伟, 刘海军, 徐亚平, 刘潇威. 设施番茄和黄瓜田土壤中农药残留及其对蚯蚓的急性风险[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2278-2286
- [12] Jiang L J, Geng Y, Wang L, Peng Y, Liu H J, Xu Y P, Liu X W. Acute risks of pesticide residues in greenhouse tomato and cucumber field soil to earthworms [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 (10) : 2278-2286 (in Chinese)
- [13] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [13] Gao J F. *Experimental Guidance for Plant Physiology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [14] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003
- [14] Zhang Z L, Qu W J. *Experimental Instruction of Plant Physiology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003 (in Chinese)
- [15] Hara K, Kajita R, Torii K U, Bergmann D C, Kakimoto T. The secretory peptide gene *EPF1* enforces the stomatal one-cell-spacing rule[J]. *Genes & Development*, 2007, 21(14): 1720-1725
- [16] Liu Z X, Zhou Y P, Guo J G, Li J A, Tian Z X, Zhu Z N, Wang J J, Wu R, Zhang B, Hu Y J, Sun Y J, Shang G Y, Li W Q, Li T, Hu Y H, Guo C X, Rochaix J D, Miao Y C, Sun X W. Global dynamic molecular profiling of stomatal lineage cell development by single-cell RNA sequencing[J]. *Molecular Plant*, 2020, 13(8): 1178-1193
- [17] Jorissen H J M M, Quest B, Lindner I, Marsac N T, Gärtner W. Phytochromes with noncovalently bound chromophores: The ability of apophytochromes to direct tetrapyrrole photoisomerization[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2007, 75(5): 554-559
- [18] 郑旭. 远红光下光敏色素B通过调节COP1和SPA1的核活性来抑制拟南芥光形态建成[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012
- [18] Zheng X. Phytochrome B inhibits the photomorphogenesis of *Arabidopsis thaliana* by regulating the nuclear activities of COP1 and SPA1 under far red light[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012 (in Chinese)
- [19] Smith H. Phytochromes and light signal perception by plants-An emerging synthesis[J]. *Nature*, 2000, 407(6804): 585-591
- [20] Whitelam G C, Patel S, Devlin P F. Phytochromes and photomorphogenesis in *Arabidopsis*[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 1998, 353(1374): 1445-1453
- [21] Shibuya T, Takahashi S, Endo R, Kitaya Y. Height-convergence pattern in dense plant stands is affected by red-to-far-red ratio of background illumination[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 160: 65-69
- [22] Liu J G, Mahoney K J, Sikkema P H, Swanton C J. The importance of light quality in crop-weed competition[J]. *Weed Research*, 2009, 49(2): 217-224
- [23] Tao Y, Ferrer J L, Ljung K, Pojer F, Hong F X, Long J A, Li L, Moreno J E, Bowman M E, Ivans L J, Cheng Y F, Lim J, Zhao Y D, Ballaré C L, Sandberg G, Noel J P, Chory J. Rapid synthesis of auxin via a new tryptophan-dependent pathway is required for shade avoidance in plants[J]. *Cell*, 2008, 133(1): 164-176
- [24] Momokawa N, Kadono Y, Kudoh H. Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris* [J]. *Annals of Botany*, 2011, 108(7): 1299-1306
- [25] Kim S J, Hahn E J, Heo J W, Paek K Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro* [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 101(1/2): 143-151
- [26] 尹秀玲, 王金霞, 段志青, 温静, 王辉. 小麦气孔密度及日变化规律研究[J].

- 中国农学通报, 2006, 22(5): 237-242
- Yin X L, Wang J X, Duan Z Q, Wen J, Wang H. Study on the stomatal density and daily change rule of the wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(5): 237-242 (in Chinese)
- [27] Boccalandro H E, Rugnone M L, Moreno J E, Ploschuk E L, Serna L, Yanovsky M J, Casal J J. Phytochrome B enhances photosynthesis at the expense of water-use efficiency in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2009, 150(2): 1083-1092
- [28] Shibuya T, Endo R, Yuba T, Kitaya Y. The photosynthetic parameters of cucumber as affected by irradiances with different red: Far-red ratios[J]. *Biologia Plantarum*, 2015, 59(1): 198-200
- [29] Klermund C, Ranftl Q L, Diener J, Bastakis E, Richter R, Schwechheimer C. LLM-domain B-GATA transcription factors promote stomatal development downstream of light signaling pathways in *Arabidopsis thaliana* hypocotyls[J]. *The Plant Cell*, 2016, 28(3): 646-660
- [30] Zuch D T, Herrmann A, Kim E D, Torii K U. Cell cycle dynamics during stomatal development: Window of MUTE action and ramification of its loss-of-function on an uncommitted precursor[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2023, 64(3): 325-335
- [31] Tan T T, Li S L, Fan Y F, Wang Z L, Ali Raza M, Shafiq I, Wang B B, Wu X L, Yong T W, Wang X C, Wu Y S, Yang F, Yang W Y. Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(2): 300-309
- [32] Liu W S, Zheng L, Qi D H. Variation in leaf traits at different altitudes reflects the adaptive strategy of plants to environmental changes[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(15): 8166-8175
- [33] Lee M J, Park S Y, Oh M M. Growth and cell division of lettuce plants under various ratios of red to far-red light-emitting diodes[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2015, 56(2): 186-194
- [34] Zhen S Y, van Iersel M W. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2017, 209: 115-122
- [35] Sims D A, Pearcy R W. Response of leaf anatomy and photosynthetic capacity in *alocasia macrorrhiza* (Araceae) to a transfer from low to high light[J]. *American Journal of Botany*, 1992, 79(4): 449-455
- [36] Schuerger A. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light[J]. *Annals of Botany*, 1997, 79(3): 273-282
- [37] Kasperbauer M J, Peaslee D E. Morphology and photosynthetic efficiency of tobacco leaves that received end-of-day red and far red light during development[J]. *Plant Physiology*, 1973, 52(5): 440-442
- [38] Kim H J, Lin M Y, Mitchell C A. Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 157: 228-240
- [39] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo*[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 89-113
- [40] Björkman O, Demmig B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins[J]. *Planta*, 1987, 170(4): 489-504
- [41] Zhen S Y, Haidekker M, van Iersel M W. Far-red light enhances photochemical efficiency in a wavelength-dependent manner[J]. *Physiologia Plantarum*, 2019, 167(1): 21-33
- [42] Li Y, Xin G F, Liu C, Shi Q H, Yang F J, Wei M. Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO₂ assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L) seedlings[J]. *Bmc plant biology*, 2020, 20(1): 318
- [43] He J E, Qin L, Soon C W. Impacts of LED spectral quality on leafy vegetables: Productivity closely linked to photosynthetic performance or associated with leaf traits? [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(6): 16-25
- [44] Antipova T V, Gapeeva T A, Volotovskiy I D. Photoregulation of protochlorophyllide oxidoreductase and rubisco large subunit accumulation in phytochrome A-deficient transgenic tobacco plants[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2004, 51(2): 152-155
- [45] Ernsten J, Woodrow I E, Mott K A. Effects of growth-light quantity, growth-light quality and CO₂ concentration on Rubisco deactivation during low PFD or darkness[J]. *Photosynthesis Research*, 1999, 61(1): 65-75
- [46] 魏星, 顾清, 戴艳娇, 徐志刚. 不同光质对菊花组培苗生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(12): 344-349
- Wei X, Gu Q, Dai Y J, Xu Z G. Different light qualities on growth of *Chrysanthemum* (*Dendranthema morifolium*) plantlets *in vitro* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(12): 344-349 (in Chinese)
- [47] Zahedi S M, Sarikhani H. The effect of end of day far-red light on regulating flowering of short-day strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch & Paros) in a long-days situation[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2017, 64(1): 83-90

责任编辑:董金波



第一作者简介: 李雪, 硕士研究生, 就读于西北农林科技大学园艺学院设施园艺学, 主要研究方向为光环境对作物生长发育的影响。本科就读于西北农林科技大学设施农业科学与工程专业。曾获得多项国家级、省部级创新创业赛事奖项, 并曾获“创新创业先进个人”“大学生社会实践先进个人”“校级优秀团员”等荣誉。以第一作者发表SCI论文1篇, 中文核心期刊1篇, 参与发表学术论文1篇(EI收录)。参与“西湾露天煤矿绿色循环发展模式”、“西藏高原设施蔬菜关键技术创新与集成”、深圳市创新创业计划技术攻关面上项目“功能性‘微农业’系统关键技术研发”等课题项目。



通讯作者简介: 杨振超, 副教授, 博士生导师, 主要从事设施农业环境工程的研究。西北农林科技大学西安都市农业试验示范站站长, 杨凌示范区立体绿化产业技术联盟理事长, 中国农业工程学会、中国农学会都市与休闲农业分会、美国园艺学会和美国农学会会员。主要研究领域是设施农业、都市农业、休闲农业、有机农业和光伏农业。研究方向是植物工厂光热水气等环境精准调控、作物有机茎秆废弃物有机生态循环利用技术以及现代农业园区规划与管理。先后主持国家“863”计划课题、国家支撑计划课题和陕西省科技攻关计划等各类课题20多项; 出版教材或专著14本, 发表学术论文60余篇, 其中SCI/EI收录10余篇; 拥有软件著作权1个, 授权国际专利1件, 国内专利6件; 获国家教学成果二等奖1项。