



李雪, 赵士文, 包星星, 杨媛媛, 武永军, 杨振超. 提高绿光占比对黄瓜幼苗形态、光合性状及碳水化合物的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(02):58-65.
LI Xue, ZHAO Shiwen, BAO Xingxing, YANG Yuanyuan, WU Yongjun, YANG Zhenchao. Effect of increasing the percentage of green light on morphology, photosynthetic traits and carbohydrates of cucumber seedlings[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(02):58-65.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.02.06

提高绿光占比对黄瓜幼苗形态、光合性状及碳水化合物的影响

李雪¹ 赵士文¹ 包星星¹ 杨媛媛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 为探究不同绿光占比对黄瓜幼苗形态、光合性状及碳水化合物的影响, 遴选适宜黄瓜幼苗生长的最优绿光占比, 以‘新津优1号’黄瓜为材料, 在固定红蓝光比为4:1及总光强200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的基础上, 设定绿光占比为10%(G10%)、20%(G20%)和30%(G30%), 使其强度分别为60、40、20 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 研究不同绿光占比下黄瓜幼苗生长和生理指标的变化。结果表明: 适宜范围内提高光质中绿光占比的比例可提高黄瓜幼苗鲜重及干重, G30%处理较G20%和G10%处理的鲜重分别增加了29.65%和29.26%。提高绿光占比降低了气孔孔隙面积, 但增加了叶片气孔密度, G30%与G20%处理较G10%处理的孔隙面积显著降低了13.17%和23.05%, 但G30%与G20%处理的气孔密度较G10%增加了20.22%和14.66%。提高绿光占比增加了叶片组织栅海比(P/S), G30%处理P/S值显著高于G20%与G10%处理。提高绿光占比可促进植物光合潜力, 在光强为1000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的测定光源下, G30%处理的净光合速率较G10%显著提高77.37%。该研究结果为植物工厂化育苗及设施内补光提供依据和参考。

关键词 绿光占比; 黄瓜幼苗; 幼苗形态; 光合性状; 碳水化合物

中图分类号 S652;S651 文章编号 1007-4333(2024)02-0058-08 文献标志码 A

Effect of increasing the percentage of green light on morphology, photosynthetic traits and carbohydrates of cucumber seedlings

LI Xue¹, ZHAO Shiwen¹, BAO Xingxing¹, YANG Yuanyuan¹,
WU Yongjun², YANG Zhenchao^{1*}

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

Abstract The aims of this study were to investigate the effects of different green light ratios on the morphology, photosynthetic traits and carbohydrates of cucumber seedlings and select the optimal green light ratio for the growth of cucumber seedlings. Based on the fixed red and blue light ratio of 4:1 and total light intensity of 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, the green light ratios were set to 10% (G10%), 20% (G20%) and 30% (G30%), and the intensities were 60, 40 and 20 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ to study the changes of growth and physiological indexes of cucumber seedlings under different green light ratios. The results showed that:

收稿日期: 2023-03-01

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资助项目(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研究, E-mail: yangzhenchao@mail.nwsuaf.edu.cn

Increasing the proportion of green light iwithin the appropriate range promoted the fresh weight and dry weight of cucumber seedlings, and the fresh weight of G30% treatment were increased by 29.65% and 29.26% compared with those in G20% and G10% treatments, respectively. Increasing the percentage of green light decreased the stomatal pore area but increased the leaf stomatal density. The pore area of G30% and G20% treatments significantly decreased by 13.17% and 23.05% compared to those in G10% treatment, but the stomatal densities of G30% and G20% treatments increased by 20.22% and 14.66% compared to G10%. Increasing the green light percentage increased its leaf tissue grid-to-sea ratio (P/S), and the P/S values of G30% treatment were significantly higher than those of G20% and G10% treatments by 23.21% and 26.97%, respectively. Increasing the green light ratio also promoted the photosynthetic potential of plants, and the net photosynthetic rate of G30% treatment was significantly higher than that of G10% by 77.37% under the measured light intensity of 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ measured light source. This study provides a basis and reference for plant plant nursery and supplemental light in facilities.

Keywords green light percentage; cucumber seedlings; seedling morphology; photosynthetic traits; carbohydrates

光是植物生长的重要能量来源之一,也是植物生长、物质消耗及光合作用等生理活动的必要条件^[1]。光不仅可以作为能量源参与植物的光合作用,还可以作为信号源调节植物的生长、分化和代谢^[2]。同时,适宜的光处理条件对促进植物生长发育有着重要作用。LED光源由于其波长范围广和能耗低等优点,已作为优质光源广泛应用于设施作物和植物工厂生产中。

植物生长发育与其所处光质密切相关,目前植物上有多种光质的感受体被发现,如:红光、蓝光和UV-B等^[3],但目前尚未发现绿光感受体。红光和蓝光的光谱与植物光合作用吸收光谱十分相似,故而关于植物光生物领域研究多集中在此。但最近研究表明,绿光对于植物生理及生长发育同样有着不可忽视的作用^[4-6]。在植物工厂或植物补光时,绿光鲜少添加入红蓝光中以促进植物生长发育^[7]。

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)作为我国栽培的主要瓜菜之一^[8],在设施内栽培面积甚广。冬季设施内栽培常面临光照强度不足和光照时间过短等问题,单纯补充红蓝光不能完全满足作物生长需求。绿光透射性强可深入植物冠层,故而在红蓝光基础上添加绿光以达到更优补光效果,但需探究其适宜占比比例,使得其促进植物生长且不至于引起“绿光避荫反应”^[9]。通过实验室光谱仪测得,陆地自然太阳光下,绿光约占太阳光中有效辐射(PAR)的10%左右,故本研究设计3个绿光占比(10%、20%及30%),以绿光占比10%为对照,探究3个不同绿光占比对黄瓜幼苗形态生理及光合的影响差异,旨在为设施内黄瓜幼苗生长补光提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2022年10—12月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。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公司。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。

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。在生长约3 d当子叶完全展开时,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),其中日夜温度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

试验光照总强度为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,各处理中绿光光强分别设置为20、40和60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (表1),各处理光谱图如图1所示。

1.3 项目测定

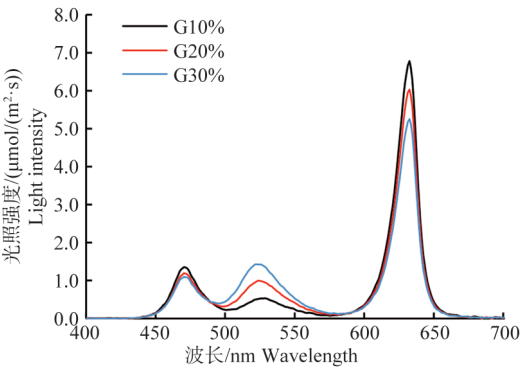
1.3.1 形态指标

随机选取6株黄瓜幼苗,使用刻度尺测定其地上部高度;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;使用电子天平测定其地上部鲜重,记录后将整株植

表1 不同处理的红光、蓝光和绿光光强

Table 1 Intensity of red light, blue light and green light under different treatments				$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
处理 Treatment	红光 Red light	蓝光 Blue light	绿光 Green light	光合有效辐射强度 PPFD
G10%	144	36	20	200
G20%	128	32	40	200
G30%	112	28	60	200

注:G10%、G20%和G30%分别表示绿光占比10%、20%和30%。下同。
Note: G10%, G20% and G30% represent 10%, 20% and 30% the ratio of green light. Tne same below.



G10%、G20%和G30%分别表示绿光占比10%、20%和30%。
G10%, G20% and G30% represent 10%, 20% and 30% the ratio of green light.

图1 不同绿光占比处理光谱图

Fig. 1 Different green light percentage treatment spectra

株放置烘箱短暂杀青后 60℃烘干至恒重。

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,并计算孔隙面积。孔隙面积(μm^2)= $\pi\times$ 孔隙长/ $2\times$ 孔隙宽/2。

1.3.3 叶片结构参数测定

每个处理随机选取3株黄瓜幼苗,取第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,置于显微镜下观察。每个装片选取10个视野,通过ImageJ软件测量叶片厚度、上下表皮

厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度。

1.3.4 光合特性的测定

每个处理随机选取3株黄瓜幼苗,取第1片真叶,使用植物光合测定仪6800(LI-6800,美国)测定蒸腾速率、净光合速率、胞间CO₂浓度及气孔导度。设置叶室温度为24℃,CO₂水平为400 μmol/mol,相对湿度为60%,设定测定光源为R90B10,光照强度为1 000 μmol/(m²·s)。

1.3.5 叶绿素荧光测定

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。每个处理随机选3株黄瓜,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_o;紧接着打开1个持续时间为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_o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。

1.3.6 碳水化合物测定

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^[10],淀粉含量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。可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[10],蔗糖含量测定采用张志良等^[11]的方法。

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 进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 不同绿光占比对黄瓜幼苗形态指标的影响

不同绿光占比处理下黄瓜幼苗的株高、鲜重、干重及总叶面积测定数据如表 1 所示。G30% 处理下的鲜重、干重及总叶面积显著高于 G20% 及

G10% 处理,其中 G30% 处理的鲜重较 G20% 和 G10% 处理分别增加了 29.65% 和 29.26%,G30% 处理干重较 G20% 和 G10% 处理分别增加了 14.28% 和 12.22%,G30% 处理总叶面积较 G20% 和 G10% 处理分别增加了 26.84% 和 23.22%。但各处理在株高和茎粗中无显著性差异,G20% 和 G10% 处理各项指标之间均未出现显著性差异。

表 1 不同绿光占比对黄瓜幼苗形态指标的影响

Table 1 Effects of different green light percentage on morphological indices of cucumber seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	鲜重/g Fresh weight	干重/g Dry weight	总叶面积/cm ² Total leaf area
G10%	21.85±1.28 a	5.30±0.80 a	16.390±5.150 b	1.562±0.655 b	566.963±59.575 b
G20%	20.74±0.79 a	6.99±2.59 a	16.341±2.328 b	1.534±0.289 b	550.773±22.058 b
G30%	21.96±0.37 a	5.95±0.62 a	21.186±1.564 a	1.753±0.074 a	698.613±65.928 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: Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

2.2 不同绿光占比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并测定(表 2),G30% 处理下气孔孔隙长度较 G20% 和 G10% 处理显著增加了 9.73% 和 7.31%,G30% 处理气孔孔隙宽度显著高于 G10% 处理 36.18%。G30% 处理下的气孔长度与孔隙长度均显著高于 G20% 与 G10% 处理,但 G20% 与 G10% 间无显著性差异;G30% 与 G20% 的气孔宽度显著高于 G10% 处理 6.86% 和 8.02%,但 G30% 与 G20% 处理间无显著差异。由

孔隙长和孔隙宽度计算孔隙面积得出,G30% 与 G20% 处理较 G10% 处理的孔隙面积有显著性降低,分别降低了 13.17% 和 23.05%,但在 G30% 与 G20% 间无显著性差异。随着绿光占比的增加,黄瓜叶片的气孔密度也随之增加,G30% 与 G20% 处理的气孔密度显著高于 G10% 处理,其中 G10% 处理较 G20% 和 G30% 处理降低了 14.66% 和 20.22%,但 G30% 与 G20% 处理间无显著性差异。

表 2 不同绿光占比对黄瓜幼苗叶片气孔特征的影响

Table 2 Effects of different percentage of green light on stomatal characteristics of cucumber seedlings

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
G10%	2.933±0.697 b	9.001±1.421 b	14.638±1.040 b	20.351±1.913 b	855.106±188.152 b	32.060±7.038 a
G20%	3.995±0.779 a	8.801±1.331 b	15.811±1.260 a	20.727±1.632 b	980.470±235.521 a	26.054±7.033 b
G30%	4.052±0.686 a	9.657±1.422 a	15.642±1.083 a	21.911±1.701 a	1 027.983±247.246 a	28.328±8.051 b

2.3 不同绿光占比对黄瓜幼苗叶片结构参数的影响

对不同处理叶片石蜡切片进行观察(表 3)发现,不同处理的叶片上、下表皮厚度并无显著性差异,但随着处理间绿光占比的增加,叶片厚度逐渐降低,且 G30% 显著低于 G20% 和 G10% 处理 19.97% 和

19.22%;但在 G20% 和 G30% 间无显著性差异。G30% 处理的栅栏组织厚度显著低于 G20% 和 G10% 处理 12.23% 和 11.53%;G20% 处理虽低于 G10% 处理,但 2 个处理间无显著性差异。随着绿光占比的增加,海绵组织厚度随之降低,且在 3 个处理间存在显著性差异,G10% 较 G20% 组增加了

表3 不同绿光占比对黄瓜幼苗叶片结构参数的影响

Table 3 Effects of different percentage green light intensity on structural parameters of cucumber seedling leaves

参数 Parameter	G10%	G20%	G30%
上表皮厚度/ μm Upper epidermisthickness	11.286 $\pm$ 0.563 a	10.614 $\pm$ 0.658 a	10.005 $\pm$ 0.381 a
栅栏组织厚度/ μm Palisade tissue thickness	40.404 $\pm$ 4.485 a	39.250 $\pm$ 5.241 a	34.970 $\pm$ 2.587 b
海绵组织厚度/ μm Spongy tissue thickness	72.604 $\pm$ 1.462 a	68.408 $\pm$ 1.350 b	49.501 $\pm$ 1.315 c
下表皮厚度/ μm Inferior epidermisthickness	5.970 $\pm$ 0.398 a	5.429 $\pm$ 0.284 a	5.240 $\pm$ 0.344 a
叶片厚度/ μm Blade thickness	135.726 $\pm$ 2.725 a	134.877 $\pm$ 3.340 a	113.132 $\pm$ 2.840 b
栅海比 P/S	0.556 $\pm$ 0.029 b	0.573 $\pm$ 0.038 b	0.706 $\pm$ 0.019 a

6.13%，较G30%组增加了46.67%；虽然随着绿光占比的增加，叶片组织中栅栏组织和海绵组织均出现下降趋势，但P/S比却随之升高，且G30%处理显著高于G20%与G10%处理23.21%和26.97%。

2.4 不同绿光占比对黄瓜幼苗光合特性的影响

对于各处理下黄瓜幼苗光合相关性状进行测定，结果如表4所示。随着绿光占比的增加，各处理

间净光合速率(Pn)、气孔导度(Gsw)及气孔蒸腾速率(E)均呈上升趋势，其中G30%处理的净光合速率较G10%处理显著提高77.37%，G30%处理气孔导度较G10%显著提高33.43%，G30%气孔蒸腾速率较G20%和G10%处理显著提高26.86%和47.66%，但各处理间胞间CO₂浓度(Ci)无显著性变化。

表4 不同绿光占比对黄瓜幼苗光合特性的影响

Table 4 Effects of different percentage of green light on photosynthetic characteristics of cucumber seedlings

处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Pn	蒸腾速率/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) E	胞间CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Ci	气孔导度/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Gsw
G10%	3.308 $\pm$ 0.971 b	0.007 $\pm$ 0.006 b	386.391 $\pm$ 24.979 a	0.031 $\pm$ 0.009 b
G20%	5.080 $\pm$ 2.686 ab	0.008 $\pm$ 0.011 b	368.661 $\pm$ 80.219 a	0.037 $\pm$ 0.010 ab
G30%	5.867 $\pm$ 0.538 a	0.010 $\pm$ 0.004 a	393.098 $\pm$ 35.127 a	0.042 $\pm$ 0.008 a

2.5 不同绿光占比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(表5)，随着绿光占比的增加，各项叶绿素荧光参数都发生显著变化。其中，3个处理间Fv/Fm值差异显著，G30%处理较G20%和G10%显著下降5.21%和7.24%，G20%处理较G10%显著下降2.14%。ΦPSII、ETR及qL变化趋势相同，G30%处理显著低于G20%和G10%，但G10%和G20%处理间无显著性差异；G30%处理的ETR值较G20%和G10%处理分别显著下降34.77%和40.50%。ΦNO值随着绿光占比比例的增加而增加，且3个处理间出现显著性差异。G30%处理的ΦNPQ和NPQ值显著高于G20%和G10%处理，但

G20%与G10%处理间无显著性差异。

2.6 不同绿光占比对黄瓜幼苗碳水化合物含量的影响

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6所示。随着绿光占比的增加，黄瓜幼苗中可溶性蛋白含量呈下降趋势，但各处理间无显著性差异。G10%处理的淀粉含量显著高于G20%和G30%处理56.34%和56.09%。随着绿光占比的增加，黄瓜幼苗中蔗糖含量随之增加，但各处理间无显著性差异。

3 讨 论

3.1 不同绿光占比对黄瓜幼苗形态指标及碳水化合物的影响

植物光感受器影响着众多生理过程，光敏色素

表 5 不同绿光占比黄瓜叶绿素荧光参数的影响			
Table 5 Effects of different percentage green light intensity on chlorophyll fluorescence parameters of cucumber			
参数 Parameter	G10%	G20%	G30%
Fv/Fm	0.843±0.008 a	0.825±0.016 b	0.782±0.009 c
ΦPSII	0.359±0.026 a	0.328±0.032 a	0.213±0.029 b
ETR	139.500±32.000 a	127.250±12.250 a	83.000±11.300 b
ΦNO	0.297±0.032 c	0.332±0.035 b	0.347±0.030 a
ΦNPQ	0.344±0.051 b	0.341±0.003 b	0.439±0.001 a
NPQ	1.157±0.025 b	1.038±0.119 b	1.275±0.113 a
qL	0.223±0.063 a	0.203±0.121 a	0.171±0.050 b
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 6 不同绿光占比对黄瓜幼苗碳水化合物的影响				
Table 6 Effects of different percentage of green light on carbohydrate of cucumber seedlings				
处理 Treatment	可溶性糖质量分数/ (mg/100 g) Soluble sugar mass fraction	可溶性蛋白质量分数/ (mg/g) Soluble protein mass fraction	淀粉质量分数/(mg/g) Starch mass fraction	蔗糖质量分数/(mg/g) Sucrose mass fraction
G10%	70.416±3.785 a	7.949±0.578 a	15.814±2.764 a	0.748±0.054 a
G20%	70.351±3.211 a	7.579±0.961 a	10.131±1.156 b	0.878±0.131 a
G30%	72.080±5.116 a	7.394±0.581 a	10.115±0.679 b	1.059±0.239 a

是植物用来调整生长以适应阴影环境的主要机制^[12]。由于绿光透射性强,当植物受到遮阴时其冠层会感受到蓝绿光比值的变化。已有研究表明在红蓝背景光中添加绿光将会诱导植物出现“避荫现象”,且此现象是依赖绿光的^[9]。随着绿光占比的增加,植物叶片接受到的绿光/蓝光比值(G/B)也随之增加,为植物提供了“绿光避荫现象”诱导信号;植物收到遮荫信号后,将会出现叶面积增大、茎伸长等生理反应捕获更多光能以应对避荫^[6]。Kang 等^[13]研究发现绿光增加了生菜的叶长, Kim 等^[14]研究发现绿光下生菜的叶面积显著增加。这与本研究所得结果一致,随着绿光占比的增加, G30% 较 G20% 和 G10% 处理的鲜重、干重及叶面积均显著性增加。但叶绿素对光的吸收峰值为红、蓝光,对于绿光吸收利用极低,故而在降低红蓝光提升绿光占比的各处理中,植物在环境光下的光合能力随之下下降,则光合产物同样随之下下降。本试验结果表明,随着绿

光占比的增加,黄瓜幼苗中淀粉含量呈现下降趋势。表明提高绿光占比,降低红蓝光比例,在一定程度上降低了植物光合产物产量。

3.2 不同绿光占比对黄瓜幼苗气孔和叶片结构的影响

气孔导度受到气孔密度及气孔开度的共同影响^[15]。本研究通过对气孔孔隙面积进行测量计算发现,随着绿光占比的增加, G30% 和 G20% 处理较 G10% 处理气孔孔隙面积显著下降,可见添加绿光影响了叶片气孔开放程度,这与 Liu 等^[16]研究一致。有研究表明,将成熟叶暴露在弱光条件下会触发控制气孔发育的长距离信号,并导致幼叶气孔密度降低^[17]。由于绿光透射率较强,随着绿光占比的增加,透射到成熟叶片的绿光占比随着增加,导致叶片气孔密度增大,这与 Li 等^[18]、Son 等^[19]的研究结果一致。

早期研究表明,叶片结构受环境因素的影

响^[20],较高的光强度主要会增加叶片厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度^[21]。随着绿光添加比例的提高,植物光环境中的G/B比值增加,在一定程度上引起“绿光避荫反应”^[9]。本试验中随着绿光占比的增加,其栅栏组织和海绵组织厚度随之降低,“避荫反应”状态随之加深。

3.3 不同绿光占比对黄瓜幼苗光合相关性状及叶绿素荧光参数的影响

前人研究表明,使用植物光合测定仪透明叶室测定不同绿光占比下生菜光合能力,其绿光处理略低于不添加绿光的红蓝对照组^[18]。由于植物叶绿素对光的吸收峰值为红、蓝光,对于绿光吸收利用极低,故而在降低红蓝光提升绿光占比的各处理中,其环境光合能力必然出现随之下降趋势。本试验在理论黄瓜光饱和光强度下测定黄瓜幼苗最大光合潜力值,结果显示随着绿光占比的增加,各处理净光合速率、气孔导度及蒸腾速率随之上升。本研究结果与Claypool等^[22]研究结果一致。在植物光合测定仪光强为 $1\,000\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下测定高比例绿光处理的黄瓜幼苗净光合速率显著高于低比例处理。

PSII最大光量子效率(F_v/F_m)表示PSII如何有效地利用吸收的光能来减少PSII的主要醌受体(Q_A)^[23],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^[24]。本研究表明 F_v/F_m 值在3个处理间差异显著,G30%和G20%处理 F_v/F_m 平均值低于0.83,表示其受到“绿光避荫效应”的胁迫。 ΦPSII 用于表示植物光合作用过程中电子转移的量子产率,反映反应中心部分闭合时的实际光能捕获速率,PSII主要由450~640 nm的波长激发,蓝光在PSII激活中起着重要作用^[22]。故而本试验中随着绿光占比的增加,蓝光比例的减小,其 ΦPSII 呈现下降趋势。ETR表示光合电子传递速率,与 F_v/F_m 和 ΦPSII 均为评价光合效率的指标。本研究表明三者的G30%处理均显著低于其余2个处理,表明随着绿光占比的增加,其光合效率呈现下降趋势。 ΦNPQ 表示通过调节性的光保护机制耗散为热的能量^[25-26]。植物对于绿光吸收效率较低,故而随着绿光占比的增加,其耗散量子产额增加。本研究表明G30%处理下 ΦNPQ 显著高于其余处理,表明绿光剂量已高于植物所需。

4 结 论

在固定红蓝光比例及总光强的基础上,一定程度提高绿光占比对于植物生长及生物量积累有促进作用,其气孔密度呈现显著上升趋势,黄瓜幼苗光合潜力增加,但G30%处理的绿光降低了PSII活性中心效率,造成“绿光避荫效应”胁迫。故而本研究得出绿光占比为20%的光质更适宜黄瓜幼苗生长。

参考文献 References

- [1] 崔世钢,陈苗,张永立,何林,吴兴利.基于LED光源水培生菜最佳光配方的筛选[J].江苏农业科学,2020,48(16):152-155
Cui S G, Chen M, Zhang Y L, He L, Wu X L. Screening of optimal light formula of hydroponic lettuce based on LED light source [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(16): 152-155 (in Chinese)
- [2] Bian Z H, Cheng R F, Wang Y, Yang Q C, Lu C G. Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 153: 63-71
- [3] Smith H L, McAusland L, Murchie E H. Don't ignore the green light: Exploring diverse roles in plant processes [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(9): 2099-2110
- [4] Wang Y H, Folta K M. Contributions of green light to plant growth and development [J]. *American Journal of Botany*, 2013, 100(1): 70-78
- [5] Materová Z, Sobotka R, Zdvihalová B, Oravec M, Nezval J, Karlický V, Vrábl D, Štroch M, Špunda V. Monochromatic green light induces an aberrant accumulation of geranylgeranylated chlorophylls in plants [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 116: 48-56
- [6] Lanoue J, Little C, Hawley D, Hao X M. Addition of green light improves fruit weight and dry matter content in sweet pepper due to greater light penetration within the canopy [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 304: 111350
- [7] Johkan M, Shoji K, Goto F, Hahida S, Yoshihara T. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 75: 128-133
- [8] 袁泉,卢威,王君,陈茹,李衍素,于贤昌,贺超兴,孙敏涛,闫妍.基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜产量和品质的影响[J].农业工程学报,2023,39(11):1-9
Yuan Q, Lu W, Wang J, Chen R, Li Y S, Yu X C, He C X, Sun M T, Yan Y. Effects of the irrigation strategies of accumulated solar radiation on cucumber yield and quality under different soil textures in the greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 1-9 (in Chinese)
- [9] Zhang T T, Maruhnich S A, Folta K M. Green light induces shade avoidance symptoms [J]. *Plant Physiology*, 2011, 157(3): 1528-1536
- [10] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006
Gao J F. *Experimental Guidance for Plant Physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)

- [11] 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
Zhang Z L, Qu W J. *Experimental Instruction of Plant Physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003 (in Chinese)
- [12] Franklin K A. Shade avoidance[J]. *New Phytologist*, 2008, 179(4): 930-944
- [13] Kang W H, Park J S, Park K S, Son J E. Leaf photosynthetic rate, growth, and morphology of lettuce under different fractions of red, blue, and green light from light-emitting diodes (LEDs) [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2016, 57(6): 573-579
- [14] Kim H H, Goins G D, Wheeler R M, Sager J C. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes [J]. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 2004, 39(7): 1617-1622
- [15] Fanourakis D, Giday H, Milla R, Pieruschka R, Kjaer K H, Bolger M, Vasilevski A, Nunes-Nesi A, Fiorani F, Ottosen C O. Pore size regulates operating stomatal conductance, while stomatal densities drive the partitioning of conductance between leaf sides [J]. *Annals of Botany*, 2015, 115(4): 555-565
- [16] Liu B, Liu H T, Zhong D P, Lin C T. Searching for a photocycle of the cryptochrome photoreceptors [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2010, 13(5): 578-586
- [17] Ehonen S, Hölttä T, Kangasjärvi J. Systemic signaling in the regulation of stomatal conductance [J]. *Plant Physiology*, 2020, 182(4): 1829-1832
- [18] Li L E, Tong Y X, Lu J L, Li Y M, Liu X, Cheng R F. Morphology, photosynthetic traits, and nutritional quality of lettuce plants as affected by green light substituting proportion of blue and red light [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 627311
- [19] Son K H, Oh M M. Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and blue light-emitting diodes [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2015, 56(5): 639-653
- [20] Song Z H, Ni X B, Yao J A, Wang F. Progress in studying heteromorphic leaves in *Populus euphratica*: Leaf morphology, anatomical structure, development regulation and their ecological adaptation to arid environments [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2021, 16(4): 1870842
- [21] Wu Y S, Gong W Z, Yang W Y. Shade inhibits leaf size by controlling cell proliferation and enlargement in soybean [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 9259
- [22] Claypool N B, Lieth J H. Green light improves photosystem stoichiometry in cucumber seedlings (*Cucumis sativus*) compared to monochromatic red light [J]. *Plants*, 2021, 10(5): 824
- [23] Janeeshma E, Johnson R, Amritha M S, Noble L, Raj Aswathi K P, Telesiński A, Kalaji H M, Auriga A, Puthur J T. Modulations in chlorophyll a fluorescence based on intensity and spectral variations of light [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(10): 5599
- [24] 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
- [25] Schöttler M A, Tóth S Z, Boulouis A, Kahlau S. Photosynthetic complex stoichiometry dynamics in higher plants: Biogenesis, function, and turnover of ATP synthase and the cytochrome b₆f complex [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(9): 2373-2400
- [26] 李泽, 谭晓风, 卢锟, 张琳, 龙洪旭, 吕佳斌, 林青. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1515-1524
- Li Z, Tan X F, Lu K, Zhang L, Long H X, Lv J B, Lin Q. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1515-1524 (in Chinese)

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, 中文核心论文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。