



黄燕芬, 周小雷, 李翠, 简少芬, 郭昌锋, 郭晓云. LED光质对太子参生长和主要功能成分的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10):139-150.
HUANG Yanfen, ZHOU Xiaolei, LI Cui, JIAN Shaofen, GUO Changfeng, GUO Xiaoyun. Effects of light quality on the growth and main functional component of *Pseudostellaria heterophylla*[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10):139-150.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.12

LED光质对太子参生长和主要功能成分的影响

黄燕芬 周小雷 李翠 简少芬 郭昌锋 郭晓云*

(广西壮族自治区药用植物园 国家中医药传承创新中心/广西药用资源保护与遗传改良重点实验室/
广西壮族自治区中药资源智慧创制工程研究中心, 南宁 530023)

摘要 为探究不同LED光质对太子参生长和主要功能成分含量的影响,以太子参实生苗为研究材料,设置LED光源为蓝光(B)、红光(R)和红蓝光组合($R:B=2:1$ 、 $R:B=4:1$ 、 $R:B=6:1$ 、 $R:B=8:1$ 、 $R:B=10:1$)共7个不同光质的处理,测定各处理下30和120 d太子参生长指标及120 d太子参主要功能成分含量及产量,综合生长与含量的隶属函数值,确定太子参的最适光处理。结果表明:光质对太子参生长影响显著,不同生长时期的植株响应有所不同。红光及红蓝组合光显著提高30 d太子参除根数以外的生长指标,120 d太子参的生长随着红光比例的增加表现出先增加后下降的趋势。红光下30 d太子参叶片总叶绿素含量显著低于红蓝组合光,而120 d太子参叶片叶绿素含量在多数处理间差异不显著。不同光质对太子参功能成分含量和产量影响显著,红光显著提高总皂苷和太子参环肽B含量,单一蓝光显著降低多糖含量,所有处理下氨基酸含量低于药材标准品,以上成分产量随红光比例的增加呈先上升后下降的趋势,在 $R:B=8:1$ 下显著高于其他处理。综上,红蓝组合光处理下太子参植株生物量和功能成分积累较高,但在不同时期的最佳组合比例不同, $R:B=10:1$ 有利于太子参苗期植株生长, $R:B=8:1$ 有利于中后期太子参根生长及功能成分积累。

关键词 太子参; 红蓝光; 生长指标; 功能成分含量

中图分类号 S636.2

文章编号 1007-4333(2024)10-0139-12

文献标志码 A

Effects of light quality on the growth and main functional component of *Pseudostellaria heterophylla*

HUANG Yanfen, ZHOU Xiaolei, LI Cui, JIAN Shaofen, GUO Changfeng, GUO Xiaoyun*

(Guangxi Key Laboratory of Medicinal Resources Protection and Genetic Improvement/ Guangxi Engineering Research Center of TCM Resource Intelligent Creation/ National Center for TCM Inheritance and Innovation,
Guangxi Botanical Garden of Medicinal Plants, Nanning 530023, China)

Abstract In order to study the effects of different light quality on the growth, content and yield of main functional component of *Pseudostellaria heterophylla* seedlings, LEDs were precisely modulated to B (blue light), different red-blue light combinations ($R:B=2:1$, $R:B=4:1$, $R:B=6:1$, $R:B=8:1$, $R:B=10:1$), and R (red light). The growth, content and yield of the main functional components of seedlings of the tested plants were determined at 30 and 120 days under the different treatments. The results showed that: Light qualities displayed significant effects on the growth of seedlings, and the response of plants at different growth stages was different. The red light and red-blue combined light significantly increased the growth indices except root number of 30 d-seedlings, whereas, the growth of 120 d-plants showed a trend of

收稿日期: 2024-02-01

基金项目: 广西科技基地和人才专项(桂科AD22080012); 广西药用植物创新团队项目(桂药创2019010); 广西中药材品质创新研究团队项目(GZKJ2305)

第一作者: 黄燕芬(ORCID:0009-0008-8296-3738), 高级工程师, 主要从事药用植物栽培研究, E-mail: 42663811@qq.com

通讯作者: 郭晓云(ORCID:0009-0000-7585-2310), 博士, 副研究员, 主要从事药用植物精准栽培研究, E-mail: 924991240@qq.com

increasing first and then decreasing with the increase of red light ratio. The total chlorophyll content of *P. heterophylla* leaves at 30 d under red light was significantly lower than that under red and blue combined light, while it was not significantly different among most treatments at 120 d. Light quality exerted significant effects on the content and yield of functional components in *P. heterophylla*. Red light significantly increased the content of total saponins and heterophyllin B, and blue light significantly decreased the content of polysaccharides. The content of amino acids under all the treatments was lower than that of the standard substance of medicinal materials. In summary, the biomass and functional components of *P. heterophylla* were higher under red and blue combined light treatments, but the optimal combination ratio was different indifferent stages. The comprehensive evaluation in this study demonstrated that $R:B=10:1$ promoted the growth of seedlings at early growth stage, and $R:B=8:1$ was beneficial to the root growth and functional component accumulation of plants in the middle and late stages.

Keywords *Pseudostellaria heterophylla*; red and blue light; growth indexes; functional component content

植物在整个生命周期中都依赖光,光质为光合作用提供能量,并在光形态建成的复杂过程中影响调控植物发育的信号途径^[1]。光质影响着植物的生长、形态建成和生理代谢^[2]。LED光源以低能耗、光谱可组合调制、冷光源和智能可控等优点被广泛应用于研究光质对植物生长发育、产量及品质的影响^[3]。因此,在设施农业生产中采用先进的LED补光灯对植物生长调控具有重要意义^[4]。前人研究显示,红、蓝光为植物正常发育的必需光质,红光在光合机构的发育中发挥重要作用,调节光合产物转运及光形态建成^[5-8];蓝光调节叶绿体发育、气孔开放和次生代谢^[7-9];红蓝组合光可以代替连续全光谱光源进行植物栽培^[3]。有研究表明,调控红蓝光的比例可以改变植物的形态、代谢及生理特性。紫叶生菜、茶树、积雪草的生长指标和功能性成分含量分别在不同的红蓝光比例下达到最高^[10-12];辣椒不仅生长指标随着红光比例的升高而增大,叶绿素荧光特性也发生变化^[13];黄瓜和番茄的光形态建成、光合生理及叶片元素含量都受到不同比例红蓝组合光的显著影响^[14]。由此可见,光质能够调控植物的生长发育,而不同植物由于基因型和生长环境的不同而表现出不同的响应。

太子参为石竹科植物孩儿参(*Pseudostellaria heterophylla* (Miq.) Pax)的干燥块根,具有益气健脾和生津润肺的功效^[16]。现代研究表明,太子参兼有药用和营养双重功效^[17],其富含多糖、环肽、蛋白质和氨基酸等功能成分,能降低血糖血脂、调节免疫系统功能、抗氧化、保护心肌和缓解疲劳等。2016年,太子参被卫生部列入“可用于保健食品的物品”名单^[18]。添加太子参作为主要原料的保健食品主要有江中牌健胃消食片和复方太子参颗粒等^[18]。多

省制定的2022版新冠病毒感染中医药推荐的预防汤剂均含有太子参^[19]。需求量的快速增长对太子参产量和品质提出了更高的要求。目前,露地栽培中影响太子参生长和功能成分含量等方面的研究已经广泛开展^[20-23],太子参种质和肥料需求等研究取得了初步成果,但光质对太子参生长和功能成分积累方面的研究很少。因此,本研究拟以太子参为材料,通过调节LED灯的光质比例,研究光质对太子参生长指标和主要功能成分含量的影响,以期对太子参生长和功能成分积累的光质环境设计提供参考,为人工调控环境下太子参的高产栽培奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2021年8—11月在广西壮族自治区药用植物园植物工厂实验室内完成。试验材料为太子参成熟饱满种子。基质选用南宁普田润生物有机肥有限公司生产的普泉育苗基质。灯板的尺寸为55 cm×60 cm。

1.2 育苗方法

首先,将太子参种子均匀混入湿润的珍珠岩中,置于自封袋在0℃冰箱内层积60 d;然后把已经露白的种子,均匀撒播在育苗盆内;选取生长30 d的长势一致、健壮的植株按8 cm×8 cm的行间距移栽定植至种植盆内。定植30 d后覆土1次。

1.3 光环境设计

设置植物工厂内LED灯为蓝光(B)、红光(R)和红蓝光组合($R:B=2:1$ 、 $R:B=4:1$ 、 $R:B=6:1$ 、 $R:B=8:1$ 、 $R:B=10:1$)共7个不同处理,光周期16 h/8 h,光强200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,各处理的光谱图见图1。植物工厂室内温度为25℃,空气湿度为50%。

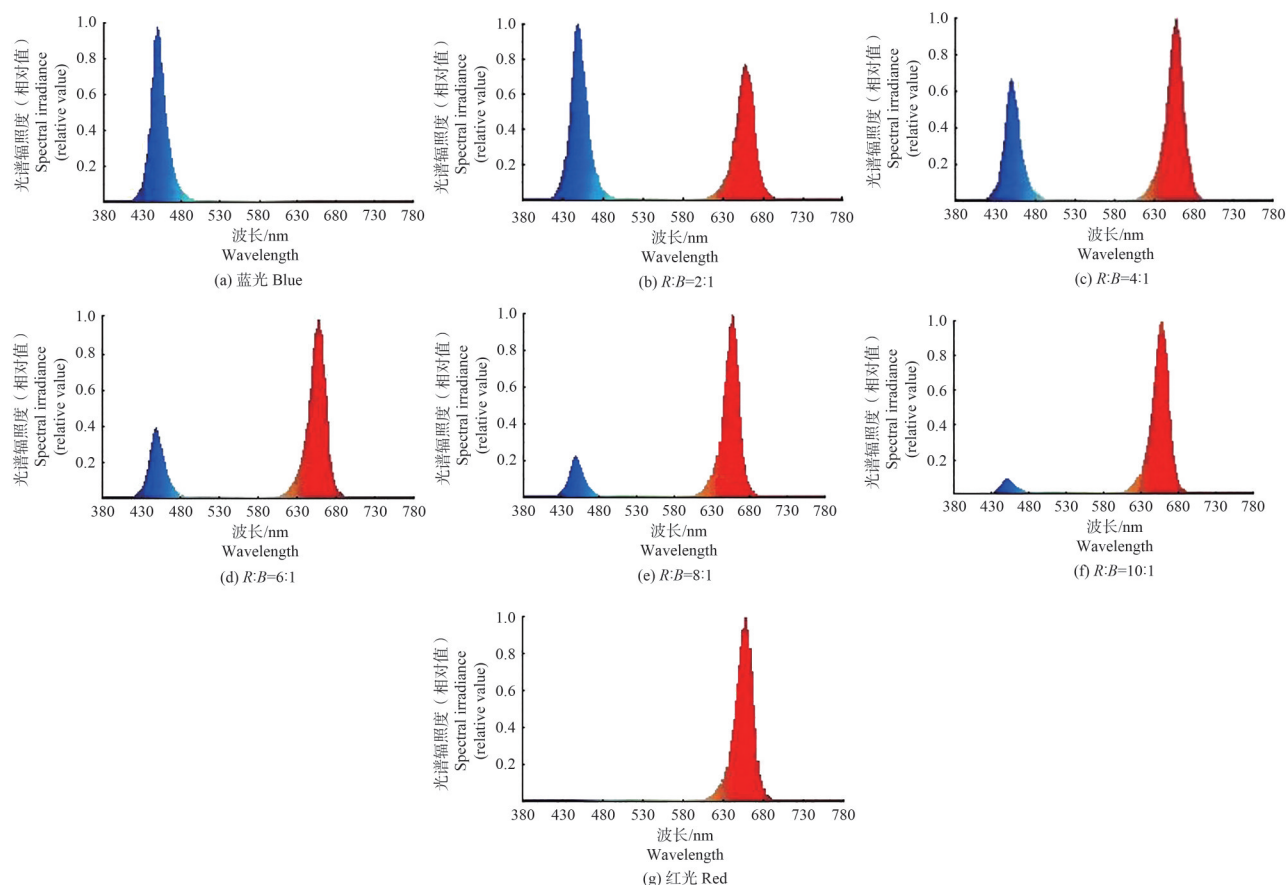


图 1 不同光质光谱图

Fig.1 Spectrogram of different light qualities

1.4 项目测定及方法

1.4.1 形态指标测定

太子参在植物工厂内播种 30 d 后就陆续开花, 生长 120 d 时, 植株进入衰老期, 茎叶出现枯黄, 果实大部分成熟。因此, 选择播种后 30 和 120 d 进行取样, 每个处理选取长势一致的 10~15 株苗, 用清水洗净根部土壤并擦干。茎粗和株高用 50 分度游标卡尺测量, 茎粗测量固定为地上第 3 节的中部; 地上鲜重和块根鲜重用万分之一电子天平称量; 用 $\phi 6$ mm 打孔器在不同植株上取 3 片叶, 采用 95% 乙醇提取法^[24]测定光合色素含量。测量结束后, 将鲜品放入 50℃ 烘箱内烘干至恒重, 用万分之一电子天平称量干重, 并计算壮苗指数和根冠比。计算公式如下:

$$\text{壮苗指数} = (\text{茎粗} / \text{株高} + \text{根干重} / \text{地上部干重}) \times \text{全株干重} \quad (1)$$

$$\text{根冠比} = \text{根干重} / \text{地上部干重} \quad (2)$$

1.4.2 多糖含量测定及产量计算

购买苏州科铭生物技术有限公司多糖含量测

定试剂盒, 利用水提醇沉法提取多糖, 用苯酚-硫酸法测定多糖含量。通过测定 490 nm 吸光值, 来计算多糖含量。多糖提取和测定详见该试剂盒说明书。

多糖质量分数 =

$$313.24 \times (\text{吸光值} + 0.0037) / 0.02 \quad (3)$$

$$\text{多糖产量} = \text{多糖质量分数} \times \text{全株块根干重} \quad (4)$$

1.4.3 氨基酸含量测定及产量计算

购买苏州科铭生物技术有限公司氨基酸含量测定试剂盒, 利用氨基酸的 α -氨基酸可与水合茚三酮反应产生蓝紫色化合物, 在 570 nm 有特征吸收峰, 通过测定 570 nm 吸光值来计算氨基酸含量。氨基酸提取和测定详见该试剂盒说明书。

氨基酸质量分数 =

$$370.4 \times (\text{吸光值} - 0.0737) / 0.01 \quad (5)$$

$$\text{氨基酸产量} = \text{氨基酸质量分数} \times \text{全株块根干重} \quad (6)$$

1.4.4 总皂苷含量测定及产量计算

购买苏州科铭生物技术有限公司总皂苷含量测定试剂盒, 使用超声波提取样品中的皂苷, 利用

香草醛-高氯酸显示体系测定总皂苷含量。通过测定589 nm吸光值,来计算总皂苷含量。总皂苷提取和测定详见该试剂盒说明书。

总皂苷质量分数=

$$488.62 \times (\text{吸光值} + 0.0016) / 0.02 \quad (7)$$

总皂苷产量=总皂苷质量分数×全株块根干重(8)

1.4.5 太子参环肽B含量测定及产量计算

称定0.000 2 g太子参对照药材(上海源叶生物科技有限公司B26071-1g)粉末1份,放于10 mL容量瓶中,加色谱甲醇定容,超声混匀,经0.45 μm微孔滤膜过滤转移到高效液相进样瓶中,即可得到浓度为0.02 mg/mL的太子参环肽B对照品溶液。称取太子参粉末各适量,置于圆底烧瓶中,第1次加10倍量的80%乙醇加热回流提取2 h,过滤;第2次加10倍量的80%乙醇加热回流提取2 h,过滤;将2次的滤液合并,置于水浴锅蒸干,加色谱甲醇超声溶解,定容至10 mL容量瓶中,经0.45 μm微孔滤膜过滤,即得供试品溶液。采用HPLC分析,YMC-Pack ODS-A色谱

柱(250 mm×4.6 mm,5 μm),以0.05%磷酸水溶液-乙腈为流动相进行梯度洗脱,流速为1.0 mL/min,检测波长203 nm,柱温25℃。供试品进样量10 μL,记录峰面积并计算样品的质量分数。

环肽B产量=环肽B质量分数×全株块根干重(9)

1.5 数据统计及分析

试验所得数据均采用Excel软件进行整理和作图。试验数据用SPSS软件进行分析,采用单因素方差分析进行显著性分析,检验的显著性水平定为 $P<0.05$;用隶属函数值分析对各处理进行综合排名。

2 结果与分析

2.1 不同LED光质对太子参生长指标的影响

不同LED光质对太子参生长有显著影响(图2和3)。蓝光下30 d太子参的株高最低,随着红光加入,红蓝组合光下株高相对于蓝光显著提高,在单一红光下达到最大值;120 d太子参的株高在蓝光最低,



比值代表红蓝光比例。R表示红光,B表示蓝光。下同。

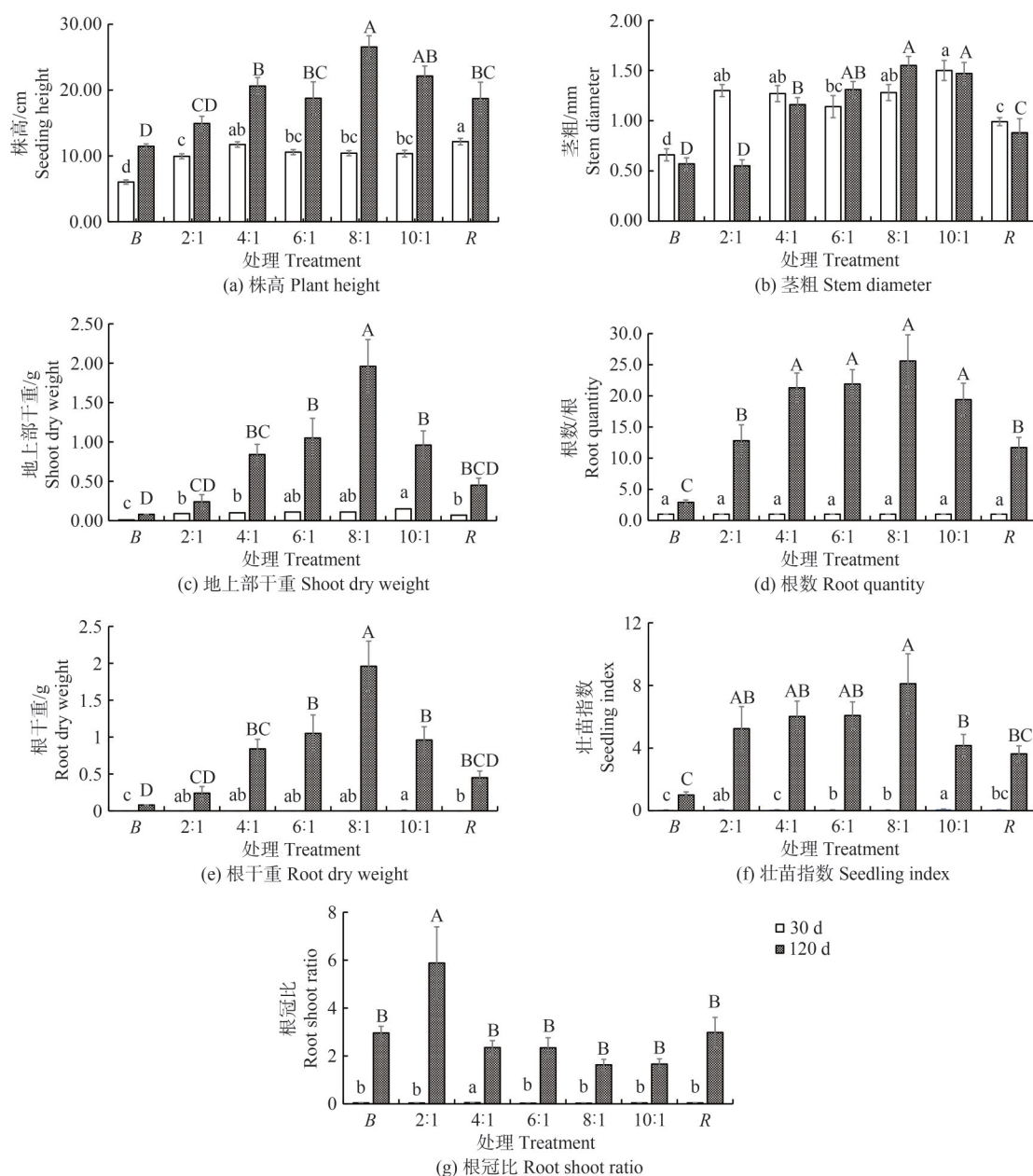
Ratios represent the ratio of red and blue light. R for red light and B for blue light. The same below.

图2 太子参生长状况

Fig. 2 Growth status of *Pseudostellaria heterophylla*

随着红光比例的增加株高逐渐增大,在 $R:B=8:1$ 处理达到最高值,在单一红光下有所下降(图 3(a))。30 d 太子参茎粗在红蓝组合光和红光下显著高于蓝光($P<0.05$),随着红光比例的增加,茎粗表现出先增加后下降的趋势;120 d 太子参的茎粗大小顺序为红蓝组合光 $R:B=4:1\sim 10:1>R>(B, R:B=2:1)$ (图 3(b))。蓝光处理下,30 d 太子参的地上部干重

显著低于其他处理,随着红光占比的增加表现出先增加后降低的趋势,在 $R:B=10:1$ 达到最大值;120 d 太子参的地上部干重变化趋势与 30 d 相似,但最大值出现在 $R:B=8:1$ (图 3(c))。株高、茎粗和地上干重在不同光质处理下的表现表明,在一定范围内,较高占比的红光处理可以促进太子参地上部分的生长。



不同小写字母表示不同处理在 30 d 时差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示不同处理在 120 d 时差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$) between different treatments for 30 days, while uppercase for 120 days. The same below.

图 3 LED 光质对 30 和 120 d 太子参生长指标的影响

Fig. 3 The effects of different LED light quality treatments on growth indexes of 30 and 120 d *P. heterophylla*

30 d各光处理下太子参的根数都只有1根,120 d太子参的根数在 $R:B=4:1\sim 10:1$ 下显著高于其他处理,其中在 $R:B=8:1$ 下根数最多,为25.6根(图3(d))。30 d太子参的根干重在不同处理下的高低顺序为红蓝组合光>红光>蓝光,红蓝组合光处理间差异不显著;120 d太子参的根干重随着红光比例的增加先上升后下降,在 $R:B=8:1$ 下最高,为1.96 g(图3(e))。结果表明,30和120 d太子参的根系生长均在红蓝组合光下最好,但两者的最佳红蓝光比例不同。

30 d太子参的壮苗指数在蓝光和 $R:B=4:1$ 下显著低于其他红蓝组合光,与红光处理差异不显著($P>0.05$);120 d太子参的壮苗指数在蓝光下显著低于红蓝组合光,与红光处理差异不显著(图3(f))。结果表明,30和120 d太子参生长状况在多数红蓝组合光下优于单一蓝光,特定比例红蓝组合光下优于单一蓝光和红光;不同时期生长状况表现最好的红蓝光比例不同。

30 d太子参的根冠比在光质 $R:B=4:1$ 下显著高于其他光处理,其他光处理间差异不显著;120 d太子参的根冠比在光质 $R:B=2:1$ 下显著高于其他光处理,其他光处理间差异不明显(图3(g))。表明太子参根冠比在特定比例红蓝光下较高,但在不同生长时期该比例不同。

综上所述,光质不但显著影响太子参的生长,而且影响生物量分配,单光质(单一红光和单一蓝

光)和中低红光比例不利于太子参生长,较高红光比例 $R:B=10:1$ 和 $8:1$ 分别最有利于30和120 d太子参生长,中低比例的红光有利于生物量向根系分配。

2.2 不同LED光质对太子参叶片光合色素含量的影响

不同光质对太子参光合色素的影响有显著差异(图4)。30 d太子参的叶绿素a及总叶绿素(叶绿素a+b)含量在红光处理下显著低于红蓝组合光,红蓝组合光处理间差异不显著,单一蓝光及红光和红蓝组合光处理间差异均不显著(图4(a)~(c));30 d太子参的叶绿素b含量在 $R:B=4:1$ 显著高于红光,其他处理与红光、 $R:B=4:1$ 差异均不显著(图4(b))。120 d太子参的叶绿素a含量各处理间差异不显著(图4(a));叶绿素b含量在光质 $R:B=6:1$ 下显著低于蓝光、 $R:B=2:1$ 、 $R:B=4:1$ 和红光,其他处理间差异不显著(图4(b));总叶绿素含量 $R:B=6:1$ 处理显著低于蓝光、 $R:B=2:1$ 和 $R:B=4:1$,其他处理间差异不显著(图4(c))。蓝光下30 d太子参的类胡萝卜素含量显著低于红蓝组合光,与红光处理差异不显著(图4(d)); $R:B=4:1$ 和红光处理下120 d太子参的类胡萝卜素含量显著高于 $R:B=8:1$ 处理,与其它处理差异不显著(图4(d))。综上所述,红蓝光组合比例不影响太子参叶绿素a含量,对叶绿素b、总叶绿素及类胡萝卜素含量的影响随着生长时间的不同而不同,单一红光和蓝光随着生长时间的不

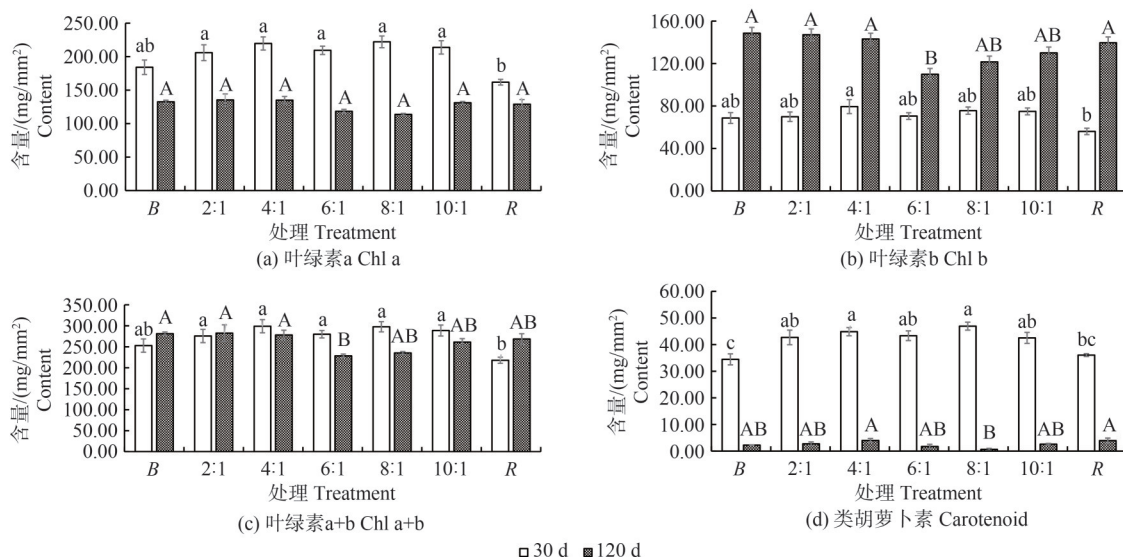


图4 LED光质对30和120 d太子参光合色素含量的影响

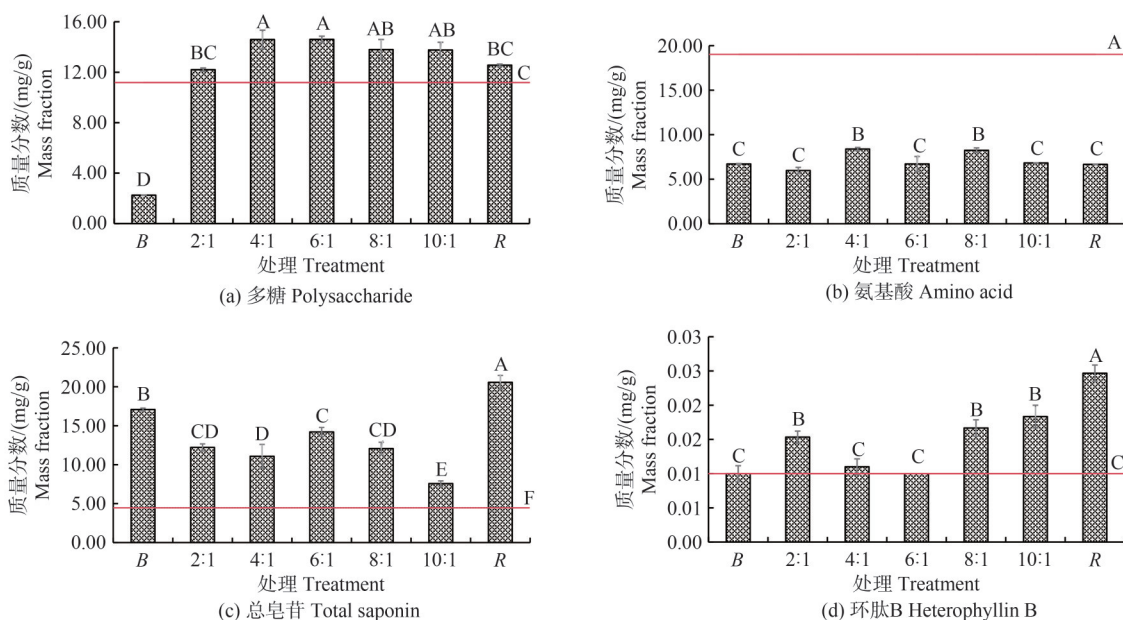
Fig. 4 The effects of different LED light quality treatments on photosynthetic pigment of 30 and 120 d *P. heterophylla*

同对太子参光合色素含量具有不同的影响。

2.3 不同 LED 光质对 120 d 太子参主要功能成分含量的影响

不同光质对 120 d 太子参的主要功能成分含量有显著影响(图 5)。120 d 太子参多糖质量分数在蓝光下显著低于其他处理和对照药材(图中红线),含量仅约为对照药材的 20%,在 $R:B=2:1$ 和红光下与对照药材无显著差异,在其他红蓝光组合下显著高于对照药材,含量为对照药材的 1.01~1.30 倍(图 5(a))。120 d 太子参氨基酸质量分数在各光质处理下均显著低于对照药材,为对照药材的 31%~44%,在 $R:B=4:1$ 和 $8:1$ 处理下显著高于其余处理(图 5(b))。对照药材的总皂苷质量分数显著低于本研究所有处理($P<0.05$),红光下总皂苷质量分

数高于对照药材 4.61 倍,且显著高于其他光质处理;单一蓝光处理仅次于单一红光; $R:B=10:1$ 处理总皂苷质量分数最低,显著低于其他光质处理,但高于对照药材 1.70 倍(图 5(c))。不同光质下,120 d 太子参的环肽 B 质量分数均等于或高于对照药材,红光下 120 d 太子参的环肽 B 质量分数显著高于其它光质和对照药材,高于对照药材 2.47 倍;蓝光、 $R:B=4:1$ 和 $6:1$ 处理与对照药材无显著差异(图 5(d))。综上所述,适宜的光质处理能促进太子参多糖、总皂苷和环肽 B 含量的积累,中高红光占比的组合光质有利于多糖含量的积累, $R:B=4:1$ 和 $8:1$ 处理有利于氨基酸含量的积累,红光有利于提高总皂苷和太子参环肽 B 含量。



红线表示太子参对照药材相应功能成分的质量分数。

The red line represents the mass fraction of corresponding functional components in the reference medicinal material of *P. heterophylla*.

图 5 LED 光质对 120 d 太子参主要功能成分含量的影响

Fig.5 The effects of different LED light quality treatments on content of main functional components of 120 d *P. heterophylla*

2.4 不同 LED 光质对 120 d 太子参主要功能成分产量的影响

不同光质处理 120 d 太子参,各成分的产量呈先上升后下降的趋势(图 6)。多糖(图 6(a))、氨基酸(图 6(b))、总皂苷(图 6(c))和环肽 B(图 6(d))产量在光质 $R:B=8:1$ 下最高,且显著高于其他光质处理($P<0.05$);在蓝光下最低,且显著低于其他处

理($P>0.05$)。表明光质 $R:B=8:1$ 最有利于主要功能成分产量积累,蓝光最不利于主要功能成分产量积累。

2.5 各种指标的隶属函数值分析

对株高、茎粗、地上部干重、根干重、壮苗指数、根冠比、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量和类胡萝卜素含量共 10 个指标进行不同光质

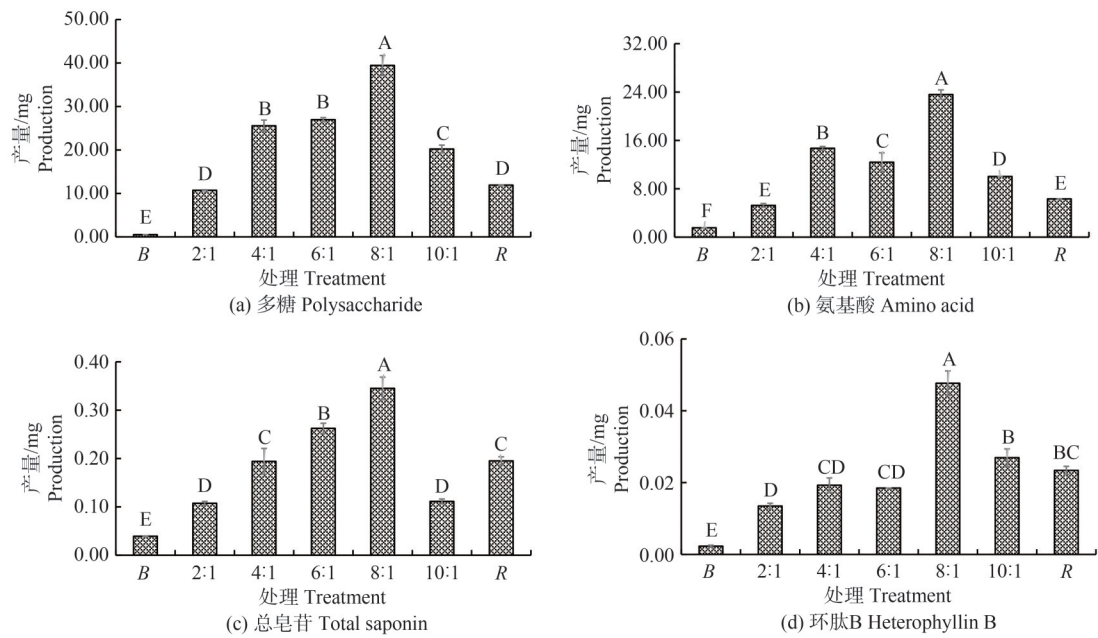


图6 LED光质对120 d太子参主要功能成分产量的影响

Fig. 6 The effects of different LED light quality treatments on production of main functional components of 120 d *P. heterophylla*

下30 d太子参的隶属函数值分析,对株高、茎粗、地上部干重、根干重、壮苗指数、根冠比、叶绿素a含量、叶绿素b含量、总叶绿素含量、类胡萝卜素含量、根数、多糖质量分数、氨基酸质量分数、总皂苷质量分数、环肽B质量分数、多糖产量、氨基酸产量、总皂苷产量和环肽B产量共19个指标进行不同光质下120 d太子参的隶属函数值分析,进一步计算D值,D值越高,表明光质处理的效果越好(表1)。30和120 d太子参的D值分别在R:B=10:1和8:1下最高,说明相较于其他光质,R:B=10:1适宜30 d太子参生长,R:B=8:1适宜120 d太子参生长与主要功能成分含量积累。

表1 不同处理下不同生长时间的综合性评价

Table 1 Comprehensive evaluation of different treatments

处理 Treatment	30 d		120 d	
	D	排名 Ranking	D	排名 Ranking
蓝光 Blue	0.098 7	7	0.084 4	7
R:B=2:1	0.507 6	5	0.233 4	6
R:B=4:1	0.691 8	2	0.541 2	2
R:B=6:1	0.580 0	4	0.526 9	4
R:B=8:1	0.654 2	3	0.851 0	1
R:B=10:1	0.907 0	1	0.540 4	3
红光 Red	0.403 8	6	0.446 3	5

注:D为综合指标指数(得分)。
Note:D is the comprehensive evaluation value.

3 讨 论

3.1 不同 LED 光质对太子参生长的影响

光照是影响植物形态建成和生长发育的重要外界环境因素。研究 LED 光源在不同植物生长中的适宜配比,是众多学者一直在探索的热点,也成为了植物工厂产业化的关键技术之一。在自然光谱中,只有 380~780 nm 的可见光可被植物吸收利用。研究显示,叶绿素在波峰为 660 nm 的红光和 450 nm 的蓝光区域有 2 个吸收峰值,红光和蓝光是叶绿体感应的主要光质。但是,在植物生长发育过程中,单色红光或者蓝光不足以保证植物良好生长^[25],红蓝组合光下植物生长表现优于单色光^[26]。本研究表明,红蓝组合光对促进太子参生长的作用显著,植株无论在生长 30 或 120 d 时,在红蓝组合光下的生长状况优于单一红光或蓝光,这与陈莹等^[27]对甘草苗期生长的研究结果一致。

本研究中,不同光质对 30 d 时太子参地上部分生长的影响显著,而对地下部分生长的影响随处理时间的变化而变化。处理 30 d 时,太子参株高、茎粗和地上部干重在红蓝组合光与单一光质之间、红蓝组合光处理之间存在显著差异,但此时的根数在所有处理间差异不显著,根干重在红蓝组合光处理间差异不显著;处理 120 d 时,根数和根干重在红蓝组合光与单一光质之间、红蓝组合光处理之间都存在显著差异,说明光质调控太子参生长的效果在地上部分较快表现出来,在地下部分需要的时间较长。

光质不仅影响植物同化产物的积累,还影响同化产物的分配^[13, 28]。本研究中,30 和 120 d 太子参的根冠比分别在 $R:B=4:1$ 和 $2:1$ 下显著高于其它处理,可见红蓝光组合且比例适当时根生长良好,提高了根冠比。太子参的药用部位为根,增加根冠比能够增加有效单株产量,是选择适宜光环境时的一个重要参数。

3.2 不同 LED 光质对太子参叶片光合色素含量的影响

叶绿素作为光合作用的光敏催化剂,其含量及比例是植物适应并利用光能的关键指标^[29]。在光合作用中,叶绿素 a 和叶绿素 b 是参加光合作用的主要色素^[2],吸收蓝光;类胡萝卜素吸收红光^[30]。相关研究表明,光质会影响植物光合色素的形成和积

累。方平等^[31]的研究发现,人参叶片在蓝光下叶绿素含量明显高于其他处理,表明蓝光对人参叶片叶绿素的合成有关键作用。章雷^[5]研究表明,随着光质处理时间变长,银杏叶片叶绿素含量整体不断积累提高,蓝光可显著提高其总叶绿素及类胡萝卜素含量,红光则相反。黄燕芬等^[12]研究不同光质对水培积雪草试验中发现,蓝光占比高的光质有利于水培积雪草光合色素合成。本研究发现,30 d 太子参的叶绿素 a 和总叶绿素含量在红蓝组合光下显著高于红光,与蓝光下的差异不显著,说明蓝光的加入对叶绿素有增加趋势,与章雷^[5]对银杏和方平等^[31]对人参的研究结果一致。但 120 d 太子参的叶绿素 a 在各处理下差异不显著,叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素随着蓝光比例的增加表现出先降低后增加的趋势,与上述结果不一致。这可能是不同物种间对光质的响应不同,也可能是 120 d 时,太子参植株趋于衰老而表现出的不同生理生化特性。

3.3 不同 LED 光质对太子参功能成分含量的影响

光质对药用植物中有效成分的合成与积累有重要的调节作用^[15],因此调控光质是提高品质的有效办法^[12, 32-33]。研究显示,红光可以通过促进碳水化合物积累促进生长^[31]。本研究中,所有包含红光(红蓝组合光和单一红光)的处理太子参多糖含量高于单一蓝光处理,与前人研究结果一致。

氨基酸在植物体内发挥重要作用,包括蛋白质的合成以及转化为碳水化合物等^[34]。本研究中,太子参氨基酸含量在 $R:B=4:1\sim 8:1$ 处理下,即在红蓝光组合中红光占据中高比例时高于其他处理,这与葛诗蓓等^[11]对茶叶的研究结果一致,与李聪聪等^[35]对生菜的研究结果不同,这可能是物种不同导致,也可能是本研究测定部位不同引起的差异。环肽 B 具有抗炎症、抗癌等药理活性,是太子参中的一种活性成分,研究表明,环肽 B 的含量与氮代谢相关^[36],氮代谢是植物体内基本的代谢途径,影响着植物的产量和品质。前人研究显示,光质既能直接影响氮代谢相关生理活动产物,也可间接调节,在相关产物含量、相关酶活性方面都有体现^[2]。本研究中,光质对氨基酸和多肽含量都具有显著影响,再次证明光质能够调控植物氮代谢。

光质是影响植物次生代谢物合成与积累的因素之一。本研究中,太子参总皂苷含量在单一蓝光和单一红光下显著高于其他处理,这与张勤涛等^[32]

对滇重楼研究结果一致,但与方平等^[31]对人参的研究结果不一致。可见,光质对不同植物次生代谢成分的影响存在差异。太子参的主要功能成分在不同光质下存在差异,可能与其生物合成途径的关键酶基因受光质诱导的程度不同有关。

3.4 不同LED光质对太子参功能成分产量的影响

为了综合评价不同光质对药用植物活性成分含量与产量的影响,进一步计算主要活性成分的产量。很多研究表明,含量和产量最高的不一定是同一个光质。孙菲阳^[37]对刺五加的研究发现,刺五加叶的5种活性物质含量在 $R:B=2:1$ 处理下最高,其中3种活性物质产量在 $R:B=5:1$ 处理下最高,2种活性物质产量在 $R:B=2:1$ 处理下最高。本试验中,120 d太子参4个功能成分多糖、氨基酸、总皂苷和环肽B产量均在光质 $R:B=8:1$ 下最高,这与黄燕芬等^[12]和陈莹等^[27]的研究结果一致。

4 结 论

光质对太子参生长和活性成分积累具有显著影响,相对于单一光质,红蓝组合光处理下植株表现更好,但在不同时期的最佳组合比例不同。综合生长、生物量、功能成分含量和产量,在太子参苗期,用 $R:B=10:1$ 光质处理促进植株生长;在太子参生长中后期,用 $R:B=8:1$ 光质处理,有利于根生长和功能成分积累。在实际生产中,可以通过不同的光质组合来促进太子参生产,提高目标活性成分含量,为定向精准栽培提供参考。

参考文献 References

- [1] Wei Y M, Wang S W, Yu D S. The role of light quality in regulating early seedling development[J]. *Plants*, 2023, 12(14): 2746
- [2] 任毛飞, 毛桂玲, 刘善振, 王慰亲, 郑华斌, 唐启源. 光质对植物生长发育、光合作用和碳氮代谢的影响研究进展[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(7): 1211-1228
- Ren M F, Mao G L, Liu S Z, Wang W Q, Zheng H B, Tang Q Y. Research progress on the effects of light quality on plant growth and development, photosynthesis, and carbon and nitrogen metabolism[J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(7): 1211-1228 (in Chinese)
- [3] 刘文科. 植物工厂LED照明理论与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2022
- Liu W K. *LED Lighting in Plant Factory: Theory and Applications*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2022 (in Chinese)
- [4] 马丽媛, 李艳, 张冠智, 李洋, 武永军, 杨振超. LED不同光周期和占空比组合对生菜生长、光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. *中国农业大学学*

- 报, 2023, 28(4): 91-100
- Ma L Y, Li Y, Zhang G Z, Li Y, Wu Y J, Yang Z C. Effects of different LED light supply modes on the growth, photosynthesis and fluorescence of lettuce[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(4): 91-100 (in Chinese)
- [5] 章雷. 不同光质下银杏生长及黄酮醇积累规律探究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022
- Zhang L. Study on the growth and flavonol accumulation of *Ginkgo biloba* under different light quality [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022 (in Chinese)
- [6] 宋莹. 不同光质对刺五加生理代谢影响[D] 哈尔滨: 东北林业大学, 2021
- Song Y. Effects of different light quality on physiological metabolism of *Acanthopanax Senticosus* [D] Harbin: Northeast Forestry University, 2021 (in Chinese)
- [7] 李坤, 毛纯, 刘军, 吴芳兰, 杨梅. LED光质对走马胎生长和生理及活性成分含量的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(5): 819-828
- Li K, Mao C, Liu J, Wu F L, Yang M. Effects of LED light quality on growth, physiology and active component contents of *Ardisia gigantifolia*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(5): 819-828 (in Chinese)
- [8] Zhang Y Q, Kaiser E, Zhang Y T, Yang Q C, Li T. Red/blue light ratio strongly affects steady-state photosynthesis, but hardly affects photosynthetic induction in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. *Physiologia Plantarum*, 2019, 167(2): 144-158
- [9] Yang L, Fanourakis D, Tsaniklidis G, Li K, Yang Q C, Li T. Contrary to red, blue monochromatic light improves the bioactive compound content in broccoli sprouts[J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2139
- [10] 代绿叶, 钟梦江, 韩莹琰. 不同LED光质对紫叶生菜生理特性及品质的影响[J]. *北京农学院学报*, 2023, 38(3): 52-58, 64
- Dai L Y, Zhong M J, Han Y Y. Effects of different LED light quality on physiological characteristics and quality of purple-leaf lettuce[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2023, 38(3): 52-58, 64 (in Chinese)
- [11] 葛诗蓓, 金迪迪, 杨明来, 王辉, 张兰, 韩文炎, 李鑫. 不同比例红蓝光对茶叶品质成分的影响与相关调控机理研究[J]. *浙江农业学报*, 2022, 34(10): 2105-2111
- Ge S B, Jin D D, Yang M L, Wang H, Zhang L, Han W Y, Li X. Effects and regulation mechanism of different proportions of red and blue light on quality components in tea (*Camellia sinensis* L.) plant [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2022, 34(10): 2105-2111 (in Chinese)
- [12] 黄燕芬, 林宣伶, 万凌云, 韦坤华, 郭晓云. LED光质对积雪草生长及总苷含量的影响[J]. *照明工程学报*, 2023, 34(5): 19-23
- Huang Y F, Lin X L, Wan L Y, Wei K H, Guo X Y. Effects of different LED light qualities on the growth and total glycoside content percentage of hydroponic *Centella asiatica* [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2023, 34(5): 19-23 (in Chinese)
- [13] 刘玉兵, 陈海燕, 王军伟, 黄科, 李洁, 刘明月. LED红蓝光质调控辣椒幼苗生长的光合机制研究[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(7): 145-153
- Liu Y B, Chen H Y, Wang J W, Huang K, Li J, Liu M Y. Photosynthetic regulation mechanism of red and blue LED light quality on growth of pepper seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(7): 145-153 (in Chinese)
- [14] Liang Y, Kang C Q, Kaiser E, Kuang Y, Yang Q C, Li T. Red/blue light ratios induce morphology and physiology alterations differently in cucumber and tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 281: 109995

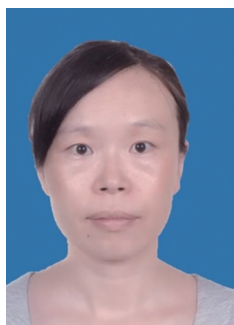
- [15] 刘紫祺. 不同光照条件对西洋参生长、皂苷合成及病害发生的影响[D]. 北京:北京协和医学院,2022
- Liu Z Q. Effects of different light conditions on the growth, accumulation of ginsenosides and disease occurrence of *Panax quinquefolius* L [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2022 (in Chinese)
- [16] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典一部: 2020 年版[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2020
- Chinese Pharmacopoeia Commission. *People's Republic of China (PRC) Pharmacopoeia-Part 1: 2020 Edition* [M]. Beijing: China Medical Technology Press, 2020 (in Chinese)
- [17] 潘慧青, 张炎达, 王振华, 王新, 叶祖云. 太子参连作效应及其微生物菌肥应用研究进展[J]. 现代农业科技, 2023, (11):45-48, 56
- Pan H Q, Zhang Y D, Wang Z H, Wang X, Ye Z Y. Research progress on *Pseudostellaria heterophylla* (Miq) Pax continuous cropping obstacles and its microbial fertilizer application [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(11):45-48, 56 (in Chinese)
- [18] 杨倩, 蔡茜茜, 林佳铭, 陈桂清, 汪少芸. 太子参的生物活性及其在食品工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11):335-341
- Yang Q, Cai X X, Lin J M, Chen G Q, Wang S Y. Biological activities of *Radix Pseudostellariae* and its application in food industry [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(11):335-341 (in Chinese)
- [19] 倪建成, 范永飞, 叶祖云. 太子参化学成分、药理作用和应用的的研究进展[J]. 中草药, 2023, 54(6):1963-1977
- Ni J C, Fan Y F, Ye Z Y. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects and application of *Pseudostellaria heterophylla* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2023, 54(6):1963-1977 (in Chinese)
- [20] 巫小宏, 娄芳, 李卫, 李廷钊, 刘红昌. 太子参不同种植材料的比较[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(3):530-531
- Wu X H, Lou F, Li W, Li T Z, Liu H C. Comparison of different planting materials for *Pseudostellaria heterophylla* [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(3):530-531 (in Chinese)
- [21] 宋荣晶, 卢先文, 董静. 太子参栽培技术措施探究[J]. 南方农业, 2020, 14(15):20-22
- Song R J, Lu X W, Dong J. Exploration of cultivation techniques and measures for *Pseudostellaria heterophylla* [J]. *South China Agriculture*, 2020, 14(15):20-22 (in Chinese)
- [22] 王福花, 陈香艳, 丁文静. 药食兼用中药材太子参的特征特性及优质高效栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2019(10):266-267, 281
- Wang F H, Chen X Y, Ding W J. Characteristics and high-quality and efficient cultivation techniques of *Pseudostellaria heterophylla*, a Chinese herbal medicine for both medicine and food [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(10):266-267, 281 (in Chinese)
- [23] 赵智煌, 张进强, 江维克, 袁青松, 杨野, 肖承鸿, 杨昌贵, 周涛. 不同施肥措施对太子参产量与品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(5):44-51
- Zhao Z H, Zhang J Q, Jiang W K, Yuan Q S, Yang Y, Xiao C H, Yang C G, Zhou T. Effects of different fertilization patterns on yield and quality of *Pseudostellaria heterophylla* [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2023, 51(5):44-51 (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 樊晓雅, 初燕芳, 袁玉麟. LED 灯在植物工厂中的应用及对植物生长的影响[J]. 乡村科技, 2020, 11(29):107-109
- Fan X Y, Chu Y F, Yuan Y L. Application of LED lamp in plant factory and its influence on plant growth [J]. *Rural Science and Technology*, 2020, 11(29):107-109 (in Chinese)
- [26] Shao M J, Liu W K, Zhou C B, Wang Q, Li B S. Alternation of temporally overlapped red and blue light under continuous irradiation affected yield, antioxidant capacity and nutritional quality of purple-leaf lettuce [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 295:110864
- [27] 陈莹, 张铮茹, 张远帆, 王桂荣, 白钰, 张雯潇, 孙志蓉. 不同光质对甘草苗期生长及活性成分含量的影响[J]. 中国现代中药, 2023, 25(1):123-136
- Chen Y, Zhang Z R, Zhang Y F, Wang G R, Bai Y, Zhang W X, Sun Z R. Light quality affects growth and active component content of *Glycyrrhiza uralensis* seedlings [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2023, 25(1):123-136 (in Chinese)
- [28] 苗妍秀, 陈青云, 曲梅, 高丽红, 侯雪平, 李斌. 黄瓜红蓝光质育苗对其定植后生长、光合特性以及产量的影响[J]. 园艺学报, 2019, 46(7):1388-1398
- Miao Y X, Chen Q Y, Qu M, Gao L H, Hou L P, Li B. Effects of red and blue lights on growth, photosynthetic characteristics and yield of cucumber plants [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46(7):1388-1398 (in Chinese)
- [29] 张俊杰, 刘青, 韦霄, 张建军, 郭庭鸿. 光强对金丝李幼苗生长及光合特性的影响[J]. 林业科学, 2022, 58(5):53-64
- Zhang J J, Liu Q, Wei X, Zhang J J, Guo T H. Influence of light intensity on growth and photosynthetic characteristics of *Garcinia paucineirois* seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(5):53-64 (in Chinese)
- [30] 朱华, 王颖, 王冰冰, 张森, 董雪静, 罗慧敏, 李金薇, 陈龙. 不同光质对铁皮石斛显微结构及多糖含量的影响[J]. 分子生物育种, 2023. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231025.1322.012>
- Zhu H, Wang Y, Wang B B, Zhang M, Dong X J, Luo H M, Li J W, Chen L. Effects of different light quality on microstructure and polysaccharide content of *Dendrobium officinale* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231025.1322.012> (in Chinese)
- [31] 方平, 杨鹤, 牛晨, 董兴敏, 许永华, 刘志. 不同 LED 光质对人参种苗叶片生理特性和超微结构的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(12):3864-3871
- Fang P, Yang H, Niu C, Dong X M, Xu Y H, Liu Z. Effects of different LED light quality on the physiological characteristics and ultrastructure of ginseng seedling leaves [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(12):3864-3871 (in Chinese)
- [32] 张勤涛, 梁社往, 曹嘉芮, 何忠俊, 莫健雷. LED 不同光质对滇重楼生长、光合特性、皂苷含量及产量的影响[J]. 照明工程学报, 2018, 29(4):45-49
- Zhang Q T, Liang S W, Cao J R, He Z J, Mo J L. Effects of different LED light quality on growth, photosynthesis, saponins content and yield of *Paris polyphylla* var *yunnanensis* [J]. *China illuminating engineering journal*, 2018, 29(4):45-49 (in Chinese)
- [33] Gao S, Kong Y W, Lv Y, Cao B L, Chen Z J, Xu K. Effect of different LED light quality combination on the content of vitamin C, soluble sugar, organic acids, amino acids, antioxidant capacity and mineral elements in green onion (*Allium fistulosum* L) [J]. *Food Research International*, 2022, 156:111329
- [34] Wu G Y. Functional amino acids in nutrition and health [J]. *Amino Acids*, 2013, 45(3):407-411
- [35] 李聪聪, 吉家曾, 陈增举, 丁慧霞, 彭旭. 红蓝光质配比对两种叶色生菜生长及品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(12):2238-2241
- Li C C, Ji J Z, Chen Z J, Ding H X, Peng X. Effects of red and blue light component on growth and quality of two leaf-color lettuce cultivars [J].

- Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(12): 2238-2241 (in Chinese)
- [36] 刘洋, 欧小宏, 胡艺谱, 徐娇, 何华, 周涛. 硝态氮对太子参生长与环肽B含量的影响[J]. 北方园艺, 2024(7): 104-111
Liu Y, Ou X H, Hu Y P, Xu J, He H, Zhou T. Effect of nitrate on the growth and heterophyllin B of *Pseudostellaria heterophylla*[J]. *Northern Horticulture*, 2024(7): 104-111 (in Chinese)
- [37] 孙菲阳. 光质调控刺五加叶片生理代谢的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023
Sun F Y. Regulation of light quality on physiological metabolism of *Acanthopanax senticosus* (Rupr & Maxim) Harms leaves [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 黄燕芬, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 药用植物工厂化栽培。主持广西中医药管理局科研课题和广西地方标准各1项。参与省(部)级以上科研项目10余项, 发表学术论文20余篇, 获国内授权专利3项。



通讯作者简介: 郭晓云, 博士, 副研究员。主要研究方向: 药用植物保育、药用植物生态学和药用植物工厂化栽培。先后主持和主要参与国家自然科学基金、广西重点研发项目等10余项, 出版教材或专著6部, 发表学术论文20余篇, 授权专利6件、软件著作权1个。