



黄丽容,李翠,唐春风,黄燕芬,张占江,郭晓云.不同光质对岩黄连生长发育、细胞结构及有效成分含量的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(10):151-160.
HUANG Lirong, LI Cui, TANG Chunfeng, HUANG Yanfen, ZHANG Zhanjiang, Guo Xiaoyun. The effects of different light qualities on the growth and development, cell structure and active ingredient content of *Corydalis saxicola* Bunting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 151-160.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.13

不同光质对岩黄连生长发育、细胞结构及有效成分含量的影响

黄丽容 李翠 唐春风 黄燕芬 张占江 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 为研究植物工厂中不同光质对岩黄连生长发育、细胞结构和有效成分积累的影响,以岩黄连实生苗为试验材料,采用白、红(R)、蓝(B)LED光源设计8个处理:白光(对照)、蓝光(E1)、 $R:B=2:1$ (E2)、 $R:B=4:1$ (E3)、 $R:B=6:1$ (E4)、 $R:B=8:1$ (E5)、 $R:B=10:1$ (E6)和红光(E7),测定不同处理下植株生长指标及岩黄连碱含量,观察叶片解剖结构。结果表明:红光比例增加对植物生长和成分含量有显著影响,E3处理叶柄数目、主根直径和地上干重显著增加,E4处理可优化根冠比,纯红光促进株高和主根生长。叶绿素a含量在蓝光和红光比例高的E5处理较高,E2处理对叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量影响显著。E4处理根部岩黄连碱含量超过地上部分,E3、E5和E7处理岩黄连总生物碱含量增加。细胞结构观察显示,提高红光比例会导致植物组织结构出现差异:E2处理栅栏组织显著;E3和E7处理栅栏细胞分化整齐;E4和E5处理细胞排列紊乱,叶肉层松散;E6处理上皮细胞萎缩,海绵组织疏松增厚,栅栏组织分化不明显。综上,光质调节对岩黄连植物的生长发育和次生代谢产物积累具有显著的调控作用。

关键词 岩黄连; LED光质; 生长指标; 岩黄连碱; 石蜡切片

中图分类号 S636.2

文章编号 1007-4333(2024)10-0151-10

文献标志码 A

The effects of different light qualities on the growth and development, cell structure and active ingredient content of *Corydalis saxicola* Bunting

HUANG Lirong, LI Cui, TANG Chunfeng, HUANG Yanfen, ZHANG Zhanjiang, 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 To study the effects of different light qualities on the growth, development, cellular structure, and accumulation of active components in *Corydalis saxicola* Bunting in a plant factory, the *C. saxicola* seedlings were used as the experimental material and 8 treatment were designed using white, red (R), and blue (B) LED light sources. White light (control), Blue light (E1), $R:B$ ratio of 2:1 (E2), $R:B$ ratio of 4:1 (E3), $R:B$ ratio of 6:1 (E4), $R:B$ ratio of 8:1 (E5), $R:B$ ratio of 10:1 (E6), Red light (E7). The growth indicators of plants and the content of dehydrocavidine under different treatments were measured and the

收稿日期: 2024-02-02

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科AB23026092); 广西自然科学基金面上项目(2023GXNSFAA026509, 2020GXNSFAA159151); 广西中医药管理局广西特色药材关键技术研究推广项目(GZKJ2314); 广西中医药适宜技术开发与推广项目(GZSY22-02); 广西药用资源保护与遗传改良重点实验室项目(KL2022ZZ04, KL2023ZZ09, KL2023KFO4); 广西中药材品质创新研究团队项目(GZKJ2305)

第一作者: 黄丽容(ORCID:0009-0000-5654-3387), 硕士研究生, E-mail: huanglirong2066@126.com

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

anatomical structure of the leaves were observed. The results showed that: The increase in red light ratio had a significant impact on plant growth and component content. While E3 treatment significant increased the number of petioles, the diameter of the main root, and the aboveground dry weight; group E4 can optimize the root-to-shoot ratio; while pure red light promoted the growth of plant height and main root length. The content of chlorophyll a was higher in E5 treatment with high proportion of blue light and red light; group E2 had an advantage in the content of chlorophyll b, total chlorophyll, and carotenoids. At group E4, the content of *Corydalis* alkaloids in the root exceeded that in the aboveground part; the total alkaloid content in groups E3, E5, and E7 increased. Observations of tissue structure showed that an increase in the proportion of red light led to differences in plant tissue structure: group E2 had a significant palisade tissue; groups E3 and E7 had orderly differentiated palisade cells; groups E4 and E5 had disordered cell arrangement and loose mesophyll; group E6 had shrunken epidermal cells, loose and thickened spongy tissue, and unclear palisade tissue differentiation. In summary, light quality regulation has a significant regulation on the growth and development and secondary metabolites accumulation of *C. saxicola*.

Keywords *Corydalis saxicola* Bunting; LED light quality; growth indicators; dehydrocavidine; paraffin sections

岩黄连(*Corydalis saxicola* Bunting)为罂粟科(Papaveraceae)紫堇属(*Corydalis* DC.)多年生草本植物^[1]。全草可入药,具有清热解毒^[2]、抗炎^[3]、抗肿瘤^[4]、保肝^[5]等功效,对肝炎特别是乙型肝炎、肝硬化和肝癌等疾病具有独特的疗效^[6]。我国对肝病用药市场需求巨大^[7],以岩黄连作为主要原料开发治疗肝病的新药已成为了研究热点^[8],市场需求广阔,但岩黄连野生资源分布区狭窄,资源蕴藏量有限^[9],2021年被收录为国家二级保护植物,未来需要人工种植以满足需要。目前,关于岩黄连的研究主要集中在化学成分分析、药理活性和临床应用等方面^[10],而对人工栽培方面的研究,如繁育技术^[11]、肥料需求^[11]等方面的研究尚处于起步阶段。岩黄连对生境要求苛刻^[11],深入开展生态因子对生长发育的影响,对于创造适合的生态环境提高其产量和药材品质、满足生产需求具有重要意义。

光质是不同波长的光谱,能够给植物提供直接能量来源,在植物形态、生长和物质代谢方面发挥重要的作用,是植物生长必需的环境因素之一^[12]。白、红和蓝单色光,及其复合光对植物都有一定的促进作用,红光和蓝光是植物光合作用的基本能源,植物体内的叶绿素能够吸收和转化红、蓝可见光,并通过光合作用将光能转化为化学能,合成植物生长必需的有机物质^[13]。对大多数植物而言,白光能提供植物生长发育所需的各种波长信号和能量^[14],红光能够促进叶片生长^[15]、植物伸长^[16]、抑制叶绿素形成和促进果实的纵向生长^[17],蓝光能够促进叶绿素形成^[13]、果实横向生长、植物花色素苷积累、子叶扩张、调节开花时间和气孔开放^[18],通过调整红、蓝光的比例,可以优化植物的生长发育。有

研究表明,红光和蓝光不同比例混合使用,能够促进油茶(*Camellia oleifera*)苗长高^[19],利于辣椒(*Capsicum annuum*)幼苗生长和光合作用^[20]。因此,为了探究不同光质对岩黄连生长发育的影响,本研究采用了调控LED光源光质比例的方法,通过精确设置红光、蓝光以及红蓝光组合,观察和分析岩黄连在不同光谱环境下的生长反应和发育状况,以期能有效提高岩黄连产量和质量,为岩黄连的产业化应用提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

岩黄连种子于2021年5月17日采自广西省靖西市吞盘乡孟麻村陇那屯(108°22′34.00″E, 22°53′46.40″N),由广西壮族自治区药用植物研究所彭玉德高级工程师鉴定为罂粟科紫堇属植物岩黄连(*Corydalis saxicola* Bunting)。2022年1月20日选用健康饱满的岩黄连种子,播入含基质(V(泥炭土):V(蛭石)=3:1)的穴盘中,于培养室中培育;发芽长至三片叶子后,于2022年2月20日移至盆口直径为9 cm的方形育苗盆中,每2周浇灌等量的1/2 Hogland 营养液,1个月后选取长势均匀的幼苗移入人工气候室并作为试验材料。

1.2 光环境处理

采用白(3 000 K)、红(R, 660 nm)、蓝(B, 460 nm)LED光源,共设计8个处理组:白光(对照)、蓝光(E1)、R:B=2:1(E2)、R:B=4:1(E3)、R:B=6:1(E4)、R:B=8:1(E5)、R:B=10:1(E6)、红光(E7),光周期16 h/8 h,光照强度200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,试验

期间温度为(22±1)℃,空气相对湿度为(60±5)%。处理4个月后,进行相关指标的测定。

1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 植株生长指标测定

统计每组处理的叶柄数,使用卷尺和50分度游标卡尺测量每株岩黄连的株高、茎粗主根长度、主根直径。使用万分之一电子天平称量全株鲜重以及地上部分(茎、叶)、地下部分(根)的鲜重;称量后装入干燥的信封,置干燥箱中105℃中杀青20 min,后于50℃烘箱中烘干至恒重,使用同一天平称量全株干重地上部分干重、地下部分干重。

$$\text{根冠比}=\text{地下干重}/\text{地上干重} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{折干率}/\% &= (\text{每组岩黄连植株总干重}/ \\ &\quad \text{每组岩黄连植株总鲜重}) \times 100\% \quad (2) \end{aligned}$$

1.3.2 光合色素含量测定

选取成熟新鲜的全展叶片,准确称取0.1 g,采用95%乙醇提取,使用紫外分光光度计测定浸提液在波长为665、649和470 nm下的吸光度值,每个处理3个重复。参考王学奎^[21]的方法,计算叶绿素和类胡萝卜素含量。

1.3.3 岩黄连碱含量测定

采用高效液相色谱法测定。方法参考文献[22]。

1.3.4 切片解剖结构

取不同处理的岩黄连主叶脉,长宽约为5 mm,使用FAA固定液(V(50%酒精):V(冰醋酸):V(甲醛)=90:

5:5)浸泡18 h;继而进行脱水与透明处理(洗脱顺序与梯度为:70%酒精3 h、75%酒精45 min、80%酒精45 min、85%酒精45 min、90%酒精45 min、95%酒精45 min、100%酒精2次均为45 min、1%番红溶液停留过夜、1/2无水酒精-1/2透明油(Transparent oil, TO)透明剂混合液45 min、1/3无水酒精-2/3TO透明剂混合液45 min、纯TO透明剂2次均45 min);再经过透蜡、包埋、切片、展片、染色(染色顺序和试剂为:TO透明剂处理3次均5 min、1/2TO透明剂+1/2无水酒精5 s、无水酒精2次均5 s、95%酒精5 s、85%酒精5 s、70%酒精5 s、50%酒精+半滴醋酸10 s、70%酒精10 s、85%酒精10 s、95%酒精+固绿30 s、无水酒精2次均10 s、1/2TO+1/2无水酒精10 s、TO透明剂3次均10 min)和封片,最后得到不同光质处理的岩黄连叶片的石蜡切片,置于显微镜下观察并拍照。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2019软件进行数据整理,使用SPSS 27.0统计分析软件中单因素方差分析对折干率、株高、茎粗和根长等数据进行差异显著性检验($P<0.05$),并用WPS 2019软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同光质对岩黄连生长指标的影响

光质对岩黄连生长影响显著(表1)。蓝光及红

表1 不同光质对岩黄连生长指标的影响
Table 1 Effects of different light qualities on the growth index of *Corydalis saxicola* Bunting

处理 Treatment	叶柄数 Number of petioles	株高/cm Plant height	主根直径/mm Taproot diameter	主根长度/cm Length of taproot	地上干重/g Terrestrial dry matter	根冠比 Root top ratio	折干率/% Drying rate
CK	16.63±3.58 d	23.90±3.43 c	3.66±1.07 c	8.29±3.20 b	2.17±1.01 d	0.06±0.03 b	10.29±1.34 ab
E1	53.25±12.77 a	34.80±3.03 b	7.23±1.53 ab	8.10±1.94 b	7.66±1.46 ab	0.05±0.01 b	9.89±1.70 ab
E2	53.88±19.96 a	37.50±2.09 ab	8.79±1.49 a	7.33±2.82 b	8.73±2.70 a	0.05±0.02 b	10.08±2.04 ab
E3	34.75±5.97 bc	37.40±4.70 ab	6.74±2.47 b	10.25±4.77 ab	5.57±1.52 bc	0.08±0.01 a	10.40±0.68 ab
E4	33.00±14.63 bc	36.22±3.95 ab	8.32±1.26 ab	11.06±3.99 ab	7.25±2.51 ab	0.06±0.02 ab	9.10±0.82 bc
E5	34.50±11.25 bc	35.00±3.42 b	8.77±2.45 a	7.06±1.45 b	6.88±2.38 abc	0.05±0.02 b	9.93±1.58 ab
E6	39.00±15.21 b	39.00±4.21 a	7.43±0.93 ab	12.94±7.09 a	6.52±2.58 abc	0.05±0.01 b	8.38±1.49 c
E7	22.00±6.44 cd	37.12±5.31 ab	6.91±0.69 b	6.61±4.10 b	4.73±0.83 c	0.06±0.01 b	10.99±0.69 a

注:CK表示白光处理(对照);E1表示蓝光处理;E2表示红光:蓝光=2:1处理;E3表示红光:蓝光=4:1处理;E4表示红光:蓝光=6:1处理;E5表示红光:蓝光=8:1处理;E6表示红光:蓝光=10:1处理;E7表示红光处理。同列不同小写字母表示不同处理在0.05水平差异显著($P<0.05$)。

Note: CK represents white light treatment (control); E1 represents blue light treatment; E2 represents red light: blue light=2:1 treatment; E3 represents red light: blue light=4:1 treatment; E4 represents red light: blue light=6:1 treatment; E5 represents red light: blue light=8:1 treatment; E6 represents red light: blue light=10:1 treatment; E7 represents red light treatment. Different lowercase letters in the same column indicate that there was a significant difference in the value at the 0.05 level ($P<0.05$).

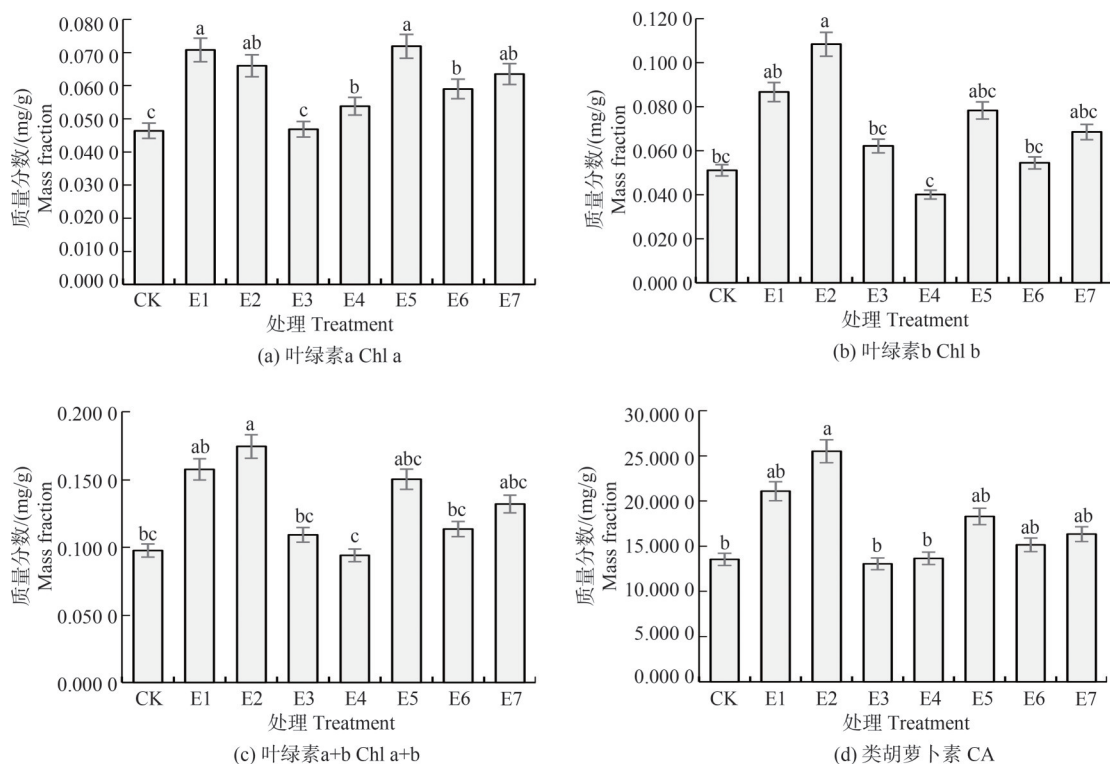
蓝光组合处理下叶柄数显著高于CK(白光),在单一蓝光(E1)处理和 $R:B=2:1$ (E2)时较高,分别为53.25和53.88;红光处理(E7)与对照差异不显著,说明蓝光和蓝光占比较高的红蓝组合光有利于叶柄的形成。

岩黄连植株的株高、主根直径、地上干重在单一红光、单一蓝光和红蓝组合光下显著高于CK。在E1到E7处理中,E6的株高显著高于E5,其余处理间差异不显著;E5到E7,随着红光占比增加,主根直径有下降的趋势;地上干重在E2处理最高,E7处理最低,从 $R:B=2:1$ 到 $R:B=10:1$,红光占比逐渐增加,地上干重没有显著变化,只有单一红光处理显著低于 $R:B=2:1$ 。以上结果说明相对于白光,红、蓝光及其组合光有利于株高、主根直径的生长及地上部生物量的积累,而多数红、蓝及其组合光处理之间差异不显著。

主根长度在E6处理显著高于其他处理,且其他处理与CK差异不显著;根冠比在E3处理显著高于其他处理,其他处理与CK差异亦不显著。说明白光、单一红、蓝光及多数红蓝组合光对主根长度及根冠比没有明显影响,只有特定比例的红蓝组合光有利于根的伸长及根的同化物分配。

2.2 不同光质对岩黄连叶片光合色素含量的影响

光质对叶片叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量影响显著(图1)。E3处理下叶片叶绿素a含量与CK差异不显著,其他处理显著高于CK,在E1、E2、E5和E7处理含量较高(图1(a))。E2处理下,叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素质量分数均达到最大值,分别为0.1084、0.1744、25.5078 mg/g,均显著高于CK;其它处理与CK差异不显著(图1(b)~(d))。说明相对于白光,除了 $R:B=4:1$,其他红、蓝及红蓝组合光都有利于叶绿素a积累, $R:B=$



CK表示白光处理(对照);E1表示蓝光处理;E2表示红光:蓝光=2:1处理;E3表示红光:蓝光=4:1处理;E4表示红光:蓝光=6:1处理;E5表示红光:蓝光=8:1处理;E6表示红光:蓝光=10:1处理;E7表示红光处理。下同。不同小写字母表示不同处理差异显著($P<0.05$)。CK represents white light treatment (control); E1 represents blue light treatment; E2 represents red light:blue light=2:1 treatment; E3 represents red light:blue light=4:1 treatment; E4 represents red light:blue light=6:1 treatment; E5 represents red light:blue light=8:1 treatment; E6 represents red light:blue light=10:1 treatment; E7 represents red light treatment. The same below. Different lowercase letters indicate that there was a significant difference in the value at the 0.05 level ($P<0.05$).

图1 不同光质对岩黄连光合色素含量的影响

Fig. 1 Effects of different light qualities on photosynthetic pigment content of *Corydalis saricola* Bunting

2:1 有利于叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素积累。

2.3 不同光质对植株岩黄连碱含量的影响

对不同光质处理的岩黄连地上部分和地下部分(根)进行含量测定,结果如图 2 所示。除了 E4 处理,根岩黄连碱的含量大于地上部分的岩黄连碱含量,在其余处理中,根的岩黄连碱的含量均小于地上部分的岩黄连碱含量。在 E3、E5 和 E7 处理中,

地上部分的岩黄连碱含量分别为:1.072%、1.106% 和 1.051%,地上部分的岩黄连碱含量相对于其他处理均较高;而在 E3、E4、E5 处理中,根的岩黄连碱含量分别为:0.841%、0.792% 和 0.783%,且相对于其他处理,岩黄连碱的含量相对较高;此外,总生物碱含量也在 E3、E5 和 E7 处理达到最大,分别是白光处理的 2.69 倍、2.66 倍和 2.52 倍。

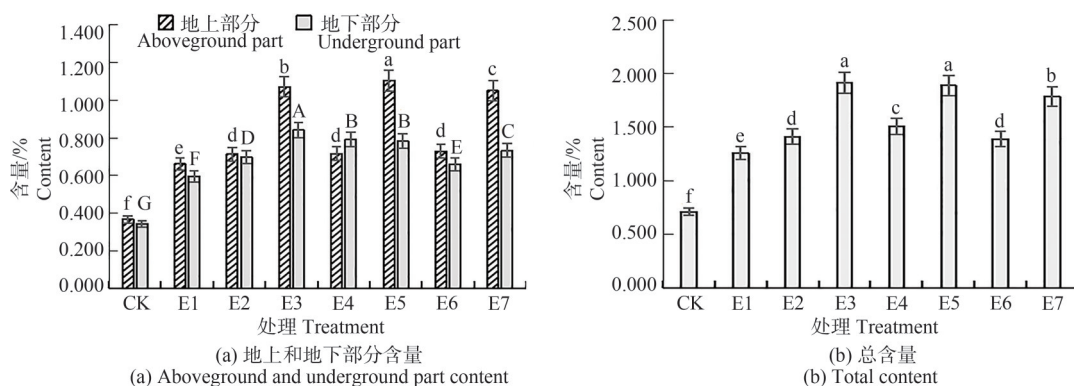


图 2 (a) 中,不同小写字母表示不同处理地上部分差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示不同处理地下部分差异显著 ($P < 0.05$)。

In Fig 2(a), different lowercase letters indicates that there is a significant difference in the value of the above-ground part under different treatments ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicates that there is a significant difference in the value of the underground part under different treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同光质对岩黄连碱含量的影响

Fig. 2 Effect of different light quality on the content of coptisine

2.4 不同光质对岩黄连叶片解剖结构的影响

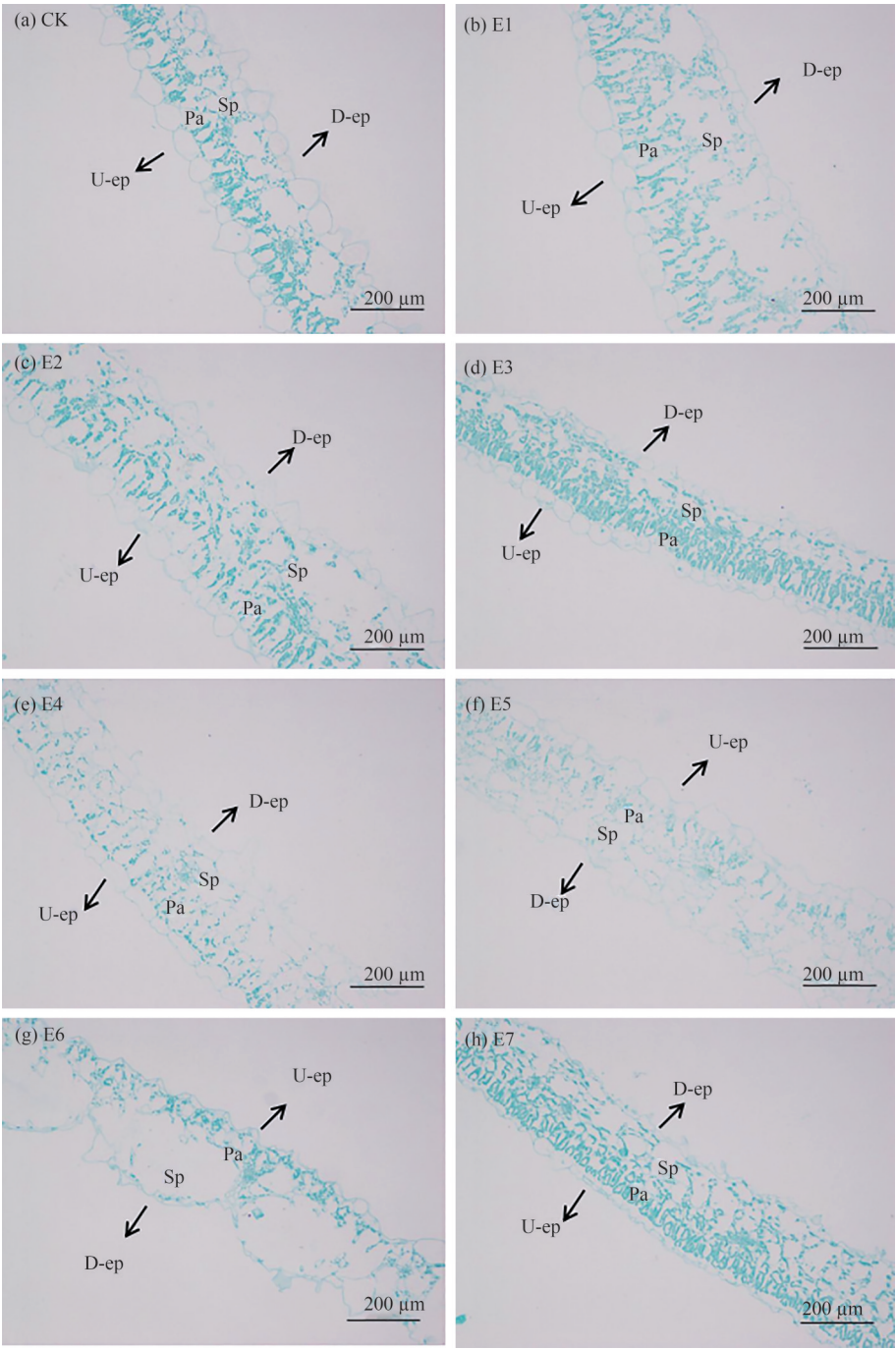
岩黄连的叶肉细胞包括上表皮细胞、栅栏组织、海绵组织和下表皮细胞。本研究以不同光质及配比处理的岩黄连实生苗叶片为材料,在 E1 处理中,海绵组织细胞体积增大,这可能表明在蓝光下,岩黄连叶片的海绵组织细胞具有更好的生长条件。而在 E6 处理中(图 3(g)),海绵组织排列疏松且厚度增大,说明这种光质条件下叶片的海绵组织细胞分裂和生长较为活跃,但结构可能不如其他处理紧密。随着红光比例的增加,E2 处理(图 3(c))开始出现较为明显的栅栏组织,而 E3(图 3(d))和 E7 处理(图 3(h))的栅栏组织细胞分化明显,排列整齐紧凑,这可能表明适量的红光有利于栅栏组织的发育和细胞的有序排列。相反,在 E4(图 3(e))和 E5 处理(图 3(f))中,栅栏组织细胞和海绵组织细胞排列不整齐,叶肉层结构松散,界限不清,这可能反映出光质配比不当对栅栏组织会产生不利影响。在 E7 处理(图 3(h))中,上表皮细胞和下表皮细胞的厚度变小,这可能与光质对细胞壁厚度和细胞结构的影

响有关。以上结果说明光质显著调节岩黄连叶片细胞结构,特别是栅栏和海绵组织的形态。适量的红光有利于栅栏组织的分化和海绵组织的紧密排列,而不合适的光质配比会削弱细胞结构,影响叶片功能。同时,表皮细胞厚度的变化可能由光质对细胞壁和细胞膜的影响引起,进而影响叶片的保护和光合作用效率(图 3)。

3 讨论

3.1 不同光质对岩黄连生长的影响

光质可以影响植物形态发育、光合特性和代谢等过程^[23]。白光中不同波长的光质对植物的生长发育具有重要影响^[24-25]。在植物生长和发育过程中,仅使用单色红光或蓝光并不足以支持植物的健康生长^[26]。本研究发现红蓝光组合光对岩黄连的生长具有显著的促进作用,这与已有研究^[27-28]中关于红蓝光组合能促进植物生长的理论相符。特别是红光与蓝光比例为 10:1 和 4:1 时,对岩黄连根系发展和生物量积累有显著的正面影响,这与徐文栋



U-ep:上表皮细胞;Pa:栅栏组织;Sp:海绵组织;D-ep:下表皮细胞。
U-ep: Upper epidermal cells; Pa: Fence organization; Sp : Sponge tissue; D-ep: Inferior epidermal cells.

图3 不同光质处理岩黄连叶片横切面结构比较

Fig. 3 Comparison of leaf transverse section structure of *Corydalis saxicola* under different light quality treatments

等^[29]对黄瓜幼苗的研究结果相一致,进一步证实了红蓝光组合在植物生长发育中的重要性。

在本研究中,折干率作为衡量药材品质和确定药材采收期的重要指标^[30-31],蓝光、红蓝比为2:1和10:1时,岩黄连采收质量较好。此外,红光:蓝光=

10:1处理显著提高了植株的株高,而随着红光比例的增加,主根直径呈现下降趋势,这可能暗示红光在一定程度上抑制了主根生长。在红光:蓝光=2:1的处理下,地上干重达到最高值,而在单一红光处理下最低,表明红蓝光的适宜配比对植物生物量积

累至关重要。此外,研究结果表明,红光与蓝光以 10:1 和 4:1 的特定比例组合时,岩黄连的主根长度和根冠比显著增加,表明这种特定光质对比对岩黄连根系发展具有显著的促进作用。这些发现与王改萍等^[32]对银杏苗木的研究结果相似,进一步证实了精确的光质调控对于岩黄连生长的重要性。因此,在岩黄连的栽培过程中,合理调整红蓝光的比例对于优化根系生长具有决定性的作用。

3.2 不同光质对岩黄连叶片光合色素含量的影响

光合色素是植物进行光合作用不可或缺的物质基础^[33-34]。叶绿素 a 是光合作用反应中心的色素,其含量直接决定光合效率,缺乏叶绿素 a 会降低光合作用^[35]。叶绿素 b 协助叶绿素 a,两者协同吸收红光和蓝紫光,共同调节叶片的颜色并保护植物免受环境胁迫的影响^[36]。类胡萝卜素作为辅助色素,保护叶绿素并参与光合作用^[37-38]。本试验结果与 Ren 等^[39]研究一致。此外,本研究在红光与蓝光比例为 2:1 时显著促进了叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素的积累,与李聪聪等^[40]的研究结果相吻合,进一步证实了特定光质比例对植物色素合成的重要性。

本研究虽揭示了特定光质比例对光合色素积累的正面影响,但光质如何调控光合色素合成的分子机制仍待阐明。未来的研究需深入探索光质对光合色素合成的影响机制,以及不同光谱成分与红蓝光组合对光合作用的影响,进而发展光质调控的栽培策略。

3.3 不同光质对岩黄连生物碱含量的影响

本研究探讨了光质对药用植物岩黄连活性成分积累的影响,为相关研究提供了新的见解。研究表明光质能显著影响青钱柳的生物量和叶三萜质量分数,其中白光处理下的三萜类化合物含量最高,从而确认了光质在药用植物活性成分合成中的作用^[41]。韦记青等^[42]的研究进一步揭示了岩黄连对光照强度和 CO₂ 浓度的响应,间接反映了光质对岩黄连碱等活性成分合成的潜在影响。

本研究通过测定不同光质处理下岩黄连的岩黄连碱含量,发现除了红光:蓝光=6:1 外,根中的岩黄连碱的含量普遍大于地上部分的岩黄连碱含量,表明植物的不同部位对光质的需求和响应存在差异。特定光质条件,岩黄连根部的生物碱合成得到促进,这对于提高根部药用成分的含量具有重要意义。

3.4 不同光质对岩黄连细胞结构的影响

不同光质对植物细胞结构的影响表现在多个层面,它能调控叶绿体的发育、细胞的分裂与伸长、气孔的开闭等关键过程^[43]。近期研究亦指出红蓝光比例显著影响植物叶片的解剖结构和光合特性,在樱桃番茄幼苗中, $R:B=3:1$ 的光质处理促进了栅栏细胞的紧密排列和海绵组织的致密化^[44]。这与本研究中观察到的红光比例增加促进栅栏组织分化和海绵组织致密排列的现象一致。本研究中, $R:B=4:1$ 和红光处理下栅栏组织的明显出现,可能表明光合作用活动的增强。然而, $R:B=10:1$ 处理叶片的上皮细胞变小变薄,海绵组织排列疏松,厚度增大,栅栏组织分化不明显,这可能是植物对过量红光的适应性反应。与白光相比,红光处理中上表皮细胞和下表皮细胞厚度的减小,可能是植物为了增加光透过率和优化光能吸收而进行的结构调整。

本研究特别指出了红蓝光比例对植物叶片结构和光合作用效率的显著影响,适宜的红蓝光平衡促进了叶片结构的优化和光合作用的增强,而红光过量则可能导致光质失衡,影响叶片功能和光合作用效率。未来研究需深入探索光质如何通过分子层面影响叶片结构和光合效率,以及不同光谱成分与红蓝光的相互作用。此外,基于光质调控的栽培策略将对提升人工光照环境下的植物生产效率和光能利用具有重要意义。

4 结 论

不同光质对岩黄连的生长和细胞结构有显著影响。蓝光和红蓝光组合能促进叶柄形成,株高、主根直径和地上干重在红蓝光组合下也较高。特定红蓝光比例光($R:B=10:1$)有利于主根伸长,而根冠比在红蓝比为 4:1 时显著高于对照。叶绿素和类胡萝卜素含量在红蓝光组合下最高,尤其是 $R:B=2:1$ 时。岩黄连碱含量在红光及红光占比较高的红蓝光组合光中地上部分显著高于根部,总生物碱含量也最高。叶片细胞结构观察显示,红光促进栅栏组织分化,蓝光使海绵组织细胞变大,而红蓝光组合光为 10:1 导致上表皮细胞变薄,海绵组织疏松。综上,红蓝光组合光对岩黄连生长和次生代谢产物积累具有积极作用,调控光质可为岩黄连栽培提供优化条件。

参考文献 References

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1999
Editorial Committee of Flora of China. *Chinese Academy of Sciences* [M]. Beijing: China Science Press, 1999 (in Chinese)
- [2] 韦莹, 李翠, 白隆华, 黄宝优, 张占江, 黄浩. 生长抑制剂对岩黄连种质离体保存的影响[J]. 时珍国医国药, 2021, 32(9): 2262-2265
Wei Y, Li C, Bai L H, Huang B Y, Zhang Z J, Huang H. Influence of plant growth inhibitors on in vitro conservation of *Corydalis saxicola* germplasm [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2021, 32(9): 2262-2265 (in Chinese)
- [3] Jang S I, Kim B H, Lee W Y, An S J, Choi H G, Jeon B H, Chung H T, Rho J R, Kim Y J, Chai K Y. Stylopine from *Chelidonium majus* inhibits LPS-induced inflammatory mediators in RAW 264.7 cells [J]. *Archives of Pharmacol Research*, 2004, 27(9): 923-929
- [4] Li M M, Wang J Y, Mo B W, Zeng J R, Yao D, Chen F, Jiang M, Rao L Z, Du Y J. Total alkaloids of *Corydalis saxicola* bunting inhibits migration of A549 cells by suppressing Cdc42 or Vav1 [J]. *Oncology Letters*, 2018, 15(1): 475-482
- [5] Wang T, Zhao L J, Li P, Jiang H, Lu G C, Zhang W D, Li H L, Yuan B J. Hepatoprotective effects and mechanisms of dehydrocavidine in rats with carbon tetrachloride-induced hepatic fibrosis [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2011, 138(1): 76-84
- [6] 张晓, 李保宏, 张永康, 梁红宝, 姚景春, 刘忠, 秦国飞, 张贵民. 岩黄连的化学成分及生物活性研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(9): 2861-2871
Zhang X, Li B H, Zhang Y K, Liang H B, Yao J C, Liu Z, Qin G F, Zhang G M. Research progress on chemical constituents and biological activities of *Corydalis saxicola* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2022, 53(9): 2861-2871 (in Chinese)
- [7] 王永, 周梦夏, 李向军. 治疗肝腹水中药专利的整体态势分析[J]. 中国现代应用药学, 2017, 34(9): 1252-1255
Wang Y, Zhou M X, Li X J. Patent analysis of traditional Chinese medicine in the treating liver ascites [J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2017, 34(9): 1252-1255 (in Chinese)
- [8] 李红婷, 金书屹, 韩凤, 罗川, 谢国勇, 秦民坚. 岩黄连防治肝病的药理作用及相关机制研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(12): 51-54
Li H T, Jin S Y, Han F, Luo C, Xie G Y, Qin M J. Pharmacological action and mechanism of Yanhuanglian in the prevention and treatment of hepatopathy [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2022, 41(12): 51-54 (in Chinese)
- [9] Li C, Liu H, Qin M, Tan Y J, Ou X L, Chen X Y, Wei Y, Zhang Z J, Lei M. RNA editing events and expression profiles of mitochondrial protein-coding genes in the endemic and endangered medicinal plant, *Corydalis saxicola* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15, 1332460
- [10] Qin F, Chen Y, Wang F F, Tang S Q, Fang Y L. *Corydalis saxicola* bunting: A review of its traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and clinical applications [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(2): 1626
- [11] 韦忠福, 王冬梅, 杨得坡, 蒋林, 韦贵剑, 唐志, 陈元生, 陆建强. 濒危野生药材岩黄连人工栽培技术[J]. 时珍国医国药, 2006, 17(12): 2404-2405
Wei Z F, Wang D M, Yang D P, Jiang L, Wei G J, Tang Z, Chen Y S, Lu J Q. Cultivation technology of *Corydalis saxicola* Bunting [J]. *LiShiZhen Medicine and Materia Medica Research*, 2006, 17(12): 2404-2405 (in Chinese)
- [12] 王政, 孙宇科, 尚文倩, 何松林, 刘艳楠, 申玉晓. LED不同照光方式对百合组培苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2022(6): 70-76
Wang Z, Sun Y K, Shang W Q, He S L, Liu Y N, Shen Y X. Effects of different illumination methods of led on growth of *Lilium brownii* in vitro [J]. *Northern Horticulture*, 2022(6): 70-76 (in Chinese)
- [13] 王哲, 王宇航, 解山森, 樊怀福. 植物工厂LED光质调控对生菜幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2023(3): 76-81
Wang Z, Wang Y H, Xie S S, Fan H F. Effect of LED light quality control on lettuce seedling growth in plant factory [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(3): 76-81 (in Chinese)
- [14] 田翠翠, 陆勤勤, 邓银银, 胡传明, 周伟. 光质对条斑紫菜自由丝状体生长和生理指标的影响[J]. 海洋科学, 2023, 47(3): 49-56
Tian C C, Lu Q Q, Deng Y Y, Hu C M, Zhou W. Effects of different light qualities on growth and physiological characteristics of *Neopyropia yezoensis* free-living conchocelis [J]. *Marine Sciences*, 2023, 47(3): 49-56 (in Chinese)
- [15] 刘增喜, 冯棣, 许可欣, 祝海燕, 孙小桡, 张敬敏, 于丽艳, 桑晓明. 蓝光对盐胁迫下番茄幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(7): 126-131
Liu Z X, Feng D, Xu K X, Zhu H Y, Sun X A, Zhang J M, Yu L Y, Sang X M. Effect of blue light on the growth of tomato seedlings under salt stress [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(7): 126-131 (in Chinese)
- [16] Vladimirovna G K, Vladimirovna O A, Mikhailovna E B, Aleksandrovna K, M, Viktorovna Z T. Effects of red and blue LED light on the growth and photosynthesis of barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 42(3): 1804-1820
- [17] 周华, 陈铭, 刘淑娟, 李彦强, 谭胤静, 余发新, 刘立盘. LED光质对“余干”辣椒生殖生长和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2017(20): 88-92
Zhou H, Chen M, Liu S J, Li Y Q, Tan Y J, Yu F X, Liu L P. Effects of LED quality on reproductive growth and fruit nutrition quality of ‘Yugan’ Pepper [J]. *Northern Horticulture*, 2017(20): 88-92 (in Chinese)
- [18] 唐大为, 张国斌, 张帆, 潘香梅, 郁继华. LED光源不同光质对黄瓜幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 44-48
Tang D W, Zhang G B, Zhang F, Pan X M, Yu J H. Effects of different LED light qualities on growth and physiological and biochemical characteristics of cucumber seedlings [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2011, 46(1): 44-48 (in Chinese)
- [19] 姚小华, 龙伟, 陈芬, 胡鹏, 曹永庆. 光质对油茶嫁接苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(34): 33-36
Yao X H, Long W, Chen F, Hu P, Cao Y Q. Effect of light quality on the growth of grafted seedlings in *Camellia oleifera* L [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(34): 33-36 (in Chinese)
- [20] 张谨薇, 孟清波, 马万成, 杨凯丽, 王兴龙, 穆亚宁, 李青云. LED光源对辣椒幼苗生长和光合特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(6): 60-63, 67
Zhang J W, Meng Q B, Ma W C, Yang K L, Wang X L, Mu Y N, Li Q Y. Effects of LED light on the growth and photosynthetic characteristics of pepper seedling [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(6): 60-63, 67 (in Chinese)
- [21] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2006
Wang X K. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [22] 黄丽容, 韦莹, 雷明, 张占江, 檀龙颜, 李翠. 钙胁迫对瑶药岩黄连生长、光合特性及有效成分含量的影响[J]. 中药材, 2022, 45(12): 2817-2821

- Huang L R, Wei Y, Lei M, Zhang Z J, Tan L Y, Li C. Effects of calcium stress on the growth, photosynthetic characteristics and the content of effective components of Yao medicine *Corydalis saxicola* Bunting[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2022, 45(12): 2817-2821 (in Chinese)
- [23] Seródio J, Lavaud J. A model for describing the light response of the nonphotochemical quenching of chlorophyll fluorescence [J]. *Photosynthesis Research*, 2011, 108(1): 61-76
- [24] 王建平, 王纪章, 周静, 贺通, 李萍萍. 光照对农林植物生长影响及人工补光技术研究进展[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(1): 215-222
- Wang J P, Wang J Z, Zhou J, He T, Li P P. Recent progress of artificial lighting technique and effect of light on plant growth [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2020, 44(1): 215-222 (in Chinese)
- [25] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1217-1234
- Xu D Q, Gao W, Ruan J. Effects of light quality on plant growth and development[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1217-1234 (in Chinese)
- [26] 杜玉芬, 高志, 狄清华, 杨凤娟, 王秀峰, 魏琨, 米庆华, 李岩. LED 红、蓝、白组合光对茄子幼苗质量和果皮品质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3175-3182
- Du Y F, Gao Z, Di Q H, Yang F J, Wang X F, Wei M, Mi Q H, Li Y. Effects of combined red, blue and white LED light on the quality of eggplant seedlings and fruit peels [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3175-3182 (in Chinese)
- [27] 黄碧阳, 林碧英, 李彩霞, 申宝营, 廖自月, 刘亚男, 刘旭, 尚英杰. LED 红蓝光配比对菠菜生长及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 131-135
- Huang B Y, Lin B Y, Li C X, Shen B Y, Liao Z Y, Liu Y N, Liu X, Shang Y J. Effects of red and blue ratios of LED on growth and quality of spinach [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(7): 131-135 (in Chinese)
- [28] 陈鹏涛, 夏木凤, 申宝营, 李莹, 彭泽波, 陈春霞. 光质对不同紫叶生菜生长及光合色素的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(11): 1910-1912, 1915
- Chen P T, Xia M F, Shen B Y, Li Y, Peng Z B, Chen C X. Effect of light quality on the growth and photosynthetic pigment of lettuce with different purple leaves [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, 58(11): 1910-1912, 1915 (in Chinese)
- [29] 徐文栋, 刘晓英, 焦学磊, 徐志刚. 不同红蓝配比的 LED 光调控黄瓜幼苗的生长[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1273-1279
- Xu W D, Liu X Y, Jiao X L, Xu Z G. Different ratio of red and blue LED regulation growth and development of cucumber seedlings [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1273-1279 (in Chinese)
- [30] 周芳, 曹国瑞, 李金玲, 刘佳微, 吴雪建, 龚洋, 黄天忠, 唐乐. 不同有机肥料种类及用量对连作白术产量与品质的影响[J]. 中药材, 2020, 43(10): 2350-2356
- Zhou F, Cao G F, Li J L, Liu J W, Wu X J, Gong Y, Huang T Z, Tang L. Effects of different organic fertilizers and dosages on the yield and quality of continuous cropping *Atractylodes macrocephala* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2020, 43(10): 2350-2356 (in Chinese)
- [31] 律广富, 郑永春, 林贺, 林君伟, 林喆. 吉林省桦甸地区 8 种中药材折干率调查分析[J]. 吉林中医药, 2013, 33(8): 818-820
- Lv G F, Zheng Y C, Lin H, Lin J W, Lin Z. Investigation and analysis on the drying rate of 8 Chinese herbal medicines in Huadian area of Jilin Province [J]. *Jilin Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2013, 33(8): 818-820 (in Chinese)
- [32] 王改萍, 章雷, 曹福亮, 丁延朋, 赵群, 赵慧琴, 王峥. 红蓝光质对银杏苗木生长生理特性及黄酮积累的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2024, 48(2): 105-112
- Wang G P, Zhang L, Cao F L, Ding Y P, Zhao Q, Zhao H Q, Wang Z. Effect of red and blue light quality on growth physiological and flavonoid content of *Ginkgo biloba* seedlings [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2024, 48(2): 105-112 (in Chinese)
- [33] 许中秋, 隋德宗, 谢寅峰, 王俊毅. 两个乌桕新品种苗木光合特性比较[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2021, 45(1): 93-100
- Xu Z Q, Sui D Z, Xie Y F, Wang J Y. Comparison of photosynthetic characteristics of two new *Triadica sebifera* varieties [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2021, 45(1): 93-100 (in Chinese)
- [34] 周成波, 张旭, 崔青青, 李曼, 张文东, 艾希珍, 毕焕改, 刘彬彬, 李清明. LED 补光光质对小白菜生长及光合作用的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1030-1038
- Zhou C B, Zhang X, Cui Q Q, Li M, Zhang W D, Ai X Z, Bi H G, Liu B B, Li Q M. Effects of supplementary light quality on growth and photosynthesis of pakchoi (*Brassica campestris*) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(6): 1030-1038 (in Chinese)
- [35] 陈子旭, 张逸霄, 李小燕, 吴新国, 陈兰洲, 王高鸿, 彭婷婷. 草甘膦农药对西藏土壤蓝藻 *Loriellopsis cavernicola* 的光合作用抑制机制研究[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(6): 293-301
- Chen Z X, Zhang Y X, Li X Y, Wu X G, Chen L Z, Wang G H, Peng T T. Inhibition mechanism of glyphosate agrichemical on photosynthesis in Xizang soil *Cyanobacterium Loriellopsis cavernicola* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023, 18(6): 293-301 (in Chinese)
- [36] 郭静, 李晓光, 李明, 李凤娟, 周宏, 王春光. 施肥对红松嫁接樟子松生长和生理特性的影响[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(4): 33-40
- Guo J, Li X G, Li M, Li F J, Zhou H, Wang C G. Effects of fertilization on the growth and physiological characteristics of *Pinus koraiensis* grafted with *Pinus sylvestris* var *mongolica* [J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2023, 10(4): 33-40 (in Chinese)
- [37] 张琦, 李凌雪, 何健龙, 王宁, 刘凯, 刘丽娟, 徐智广. 铜藻应对强光胁迫的光合适应[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2024, 52(1): 103-114
- Zhang Q, Li L X, He J L, Wang N, Liu K, Liu L J, Xu Z G. Photosynthetic adaptation of *Sargassum horneri* in response to strong light stress [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2024, 52(1): 103-114 (in Chinese)
- [38] 刘春琪, 林鸿伟, 杜学林, 黄海茵, 刘超, 王凤兰. 三角梅叶色嵌合体表型观察及分析[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2023, 36(4): 13-18, 31
- Liu C Q, Lin H W, Du X L, Huang H Y, Liu C, Wang F L. Phenotypic observation and analysis of leaf color chimeras in *Bougainvillea* [J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2023, 36(4): 13-18, 31 (in Chinese)
- [39] Ren M F, Liu S Z, Tang C Z, Mao G L, Gai P P, Guo X L, Zheng H B, Tang Q Y. Photomorphogenesis and photosynthetic traits changes in rice seedlings responding to red and blue light [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(14): 11333
- [40] 李聪聪, 吉家曾, 陈增举, 丁慧霞, 彭旭. 红蓝光质对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)
- [41] 刘洋, 陈培, 周明明, 李娜, 方升佐. 光质对不同家系青钱柳生物量和叶三萜类化合物积累的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(6): 1097-1104

- Liu Y, Chen P, Zhou M M, Li N, Fang S Z. Effects of light quality on biomass and triterpenoid accumulation in leaves of *Cyclocarya paliurus* from different families[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2020, 37(6):1097-1104 (in Chinese)
- [42] 韦记青, 蒋水元, 唐辉, 蒋运生, 漆小雪, 王满莲. 岩黄连光合与蒸腾特性及其对光照强度和CO₂浓度的响应[J]. *广西植物*, 2006, 26(3):317-320
- Wei J Q, Jiang S Y, Tang H, Jiang Y S, Qi X X, Wang M L. Photosynthetic and transpiration characteristics of *Corydalis saxicola* and its response to light intensity and concentration of CO₂ [J]. *Guthaia*, 2006, 26(3):317-320 (in Chinese)
- [43] 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. Advance on the effects of different light environments on growth, physiological biochemistry and morphostructure of plant[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2010, 29(4):353-359, 370 (in Chinese)
- [44] 董飞, 王传增, 张现征, 秦瑜, 刘世琦. 不同光质对樱桃番茄幼苗生理与光合特性的影响[J]. *植物生理学报*, 2017, 53(7):1208-1214
- Dong F, Wang C Z, Zhang X Z, Qin Y, Liu S Q. Effects of different light qualities on physiological and photosynthetic characteristics of cherry tomato seedlings[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(7):1208-1214 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 黄丽容, 硕士研究生, 中药学专业, 主要从事药用资源保护与开发利用研究。发表学术论文10余篇, 参与获得专利1项, 参与申请并获得《栽培岩黄连药材采收与贮藏技术规程》团体标准1项。



通讯作者简介: 郭晓云, 博士, 副研究员。主要研究领域: 植物生态学、设施农业、保护生物学。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项目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。