



范诗濛, 冯嘉欣, 孔维一, 等. 不同 LED 光质对紫花苜蓿种子萌发及幼苗酚类化合物合成的影响[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(4): 625-634.

FAN Shimeng, FENG Jiabin, KONG Weiyi, et al. Effects of different LED light quality on alfalfa seed germination and phenolic compounds synthesis of seedlings[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 625-634.

## 不同 LED 光质对紫花苜蓿种子萌发 及幼苗酚类化合物合成的影响

范诗濛<sup>1,2</sup>, 冯嘉欣<sup>2</sup>, 孔维一<sup>2</sup>, 郭海林<sup>2</sup>, 宗俊勤<sup>2</sup>, 刘建秀<sup>2</sup>, 陈静波<sup>2\*</sup>, 徐志刚<sup>1\*</sup>

(1. 南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095; 2. 江苏省植物资源研究与利用重点实验室/  
江苏省中国科学院植物研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** [目的] 本文旨在研究不同 LED 光质对紫花苜蓿种子萌发及幼苗光合色素和酚类化合物含量的影响, 为紫花苜蓿芽苗菜生产和植物工厂化生产的光质调控技术提供基础。 [方法] 以黑暗处理(D)为对照, 研究 10 种 LED 光质(红光 R660 和 R630, 蓝光 B450 和 B465, 绿光 G520, 黄光 Y590, 红蓝光组合 R5B2、R1B1 和 R2B5, 白光 W) 对紫花苜蓿 'WL656' 种子萌发、幼苗生长、解剖及酚类化合物合成的影响。 [结果] 不同处理对紫花苜蓿种子发芽率、发芽势、发芽指数无显著影响。单色光处理中, 2 种纯红光均促进紫花苜蓿幼苗胚根伸长; B465 处理使幼苗下胚轴直径、表皮细胞厚度、皮层厚度和单个导管面积均显著增加, B450 使维管束直径显著增加。不同单色光对叶绿素 a 含量无显著影响, 而 2 种蓝光处理下叶绿素 b 含量最低, R660 处理下类胡萝卜素含量最高; 2 种纯蓝光均对幼苗中花青素、总酚和类黄酮的积累有促进作用, 而在 G520、Y590 和 D 处理下幼苗几乎不含花青素。R630 提高下胚轴中查尔酮合成酶(CHS)活性, G520 显著提高子叶中 CHS 活性; W 提高幼苗下胚轴的花青素合成酶(ANS)活性, Y590 提高幼苗中 ANS 活性。3 种红蓝光组合中, 随着红光比例降低, 茎直径、皮层厚度和下胚轴 CHS 活性降低, 根长、表皮细胞厚度、维管束直径和下胚轴中花青素含量先减少后增加, 子叶中光合色素含量和 CHS 活性上升。下胚轴中总酚和类黄酮含量在 R2B5 处理中最高, 子叶中 3 种酚类化合物含量无差异。下胚轴中 ANS 活性在 R1B1 处理下最高, 子叶中 ANS 活性在 R5B2 处理下最高。 [结论] 纯红光促进种子发芽后的幼苗伸长, 纯蓝光促进幼苗中花青素、类黄酮和总酚生成, 红蓝光组合对幼苗生理特性影响较为复杂。综合考虑生长生理指标, R2B5 处理下生长量适中, 叶绿素和酚类物质含量较高, 是较适合紫花苜蓿幼苗生长的 LED 光质。

**关键词:** 紫花苜蓿; LED; 发芽; 光合色素; 酚类化合物

中图分类号: S541.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-2030(2024)04-0625-10

## Effects of different LED light quality on alfalfa seed germination and phenolic compounds synthesis of seedlings

FAN Shimeng<sup>1,2</sup>, FENG Jiabin<sup>2</sup>, KONG Weiyi<sup>2</sup>, GUO Hailin<sup>2</sup>, ZONG Junqin<sup>2</sup>,  
LIU Jianxiu<sup>2</sup>, CHEN Jingbo<sup>2\*</sup>, XU Zhigang<sup>1\*</sup>

(1. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources/Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** [Objectives] The purpose of this study was to explore the effects of different LED light quality on the germination of alfalfa seeds and the content of photosynthetic pigments and phenolic compounds in seedlings, so as to provide a basis for further light quality control technology for the sprout vegetable production and industrial production of alfalfa plants. [Methods] The effects of 10 different LED light quality (red light R660 and R630, blue light B450 and B465, green light G520, yellow light Y590, red and blue combination R5B2, R1B1 and R2B5, white light W) on seed germination, seedling growth, anatomy, and phenolic compound synthesis of alfalfa 'WL656' were studied using dark treatment (D) as the control. [Results] Different treatments had no effect on the germination rate, germination potential and germination index of alfalfa seeds. Among monochromatic light treatments, both pure red lights promoted radicle elongation of alfalfa seedlings; B465 treatment significantly increased the stem diameter, epidermal cell thickness, cortical thickness, and individual vessel area of the hypocotyl of seedlings, and B450 significantly increased the diameter of vascular bundles. Different monochromatic light had no significant effect on chlorophyll a content, while the chlorophyll b content was

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 江苏省属公益类科研院所自主科研课题(JSPKLB202049)

\* 通信作者: 陈静波, 副研究员, 主要从事草类植物研究, E-mail: chenjb19@163.com; 徐志刚, 教授, 主要从事植物光环境生理研究, E-mail: xuzhigang@njau.edu.cn.

lowest under two different blue light treatments, and the carotenoid content was highest under R660 treatment. Both pure blue lights promoted the accumulation of anthocyanins, total phenols and flavonoids in seedlings, but seedlings contained almost no anthocyanins under G520, Y590 and D treatments. R630 increased the chalcone synthase (CHS) activity in the hypocotyl, and G520 significantly increased the CHS activity in cotyledons. W increased the anthocyanin synthase (ANS) activity in the hypocotyl of seedlings, and Y590 increased the ANS activity in seedlings. Among the three combinations of red and blue light, with the decrease of red light ratio, stem diameter, cortical thickness and CHS activity in hypocotyl decreased, the content of root length, epidermal cell thickness, vascular bundle diameter, and anthocyanins of hypocotyls decreased first and then increased, and the content of photosynthetic pigments and CHS activity in seedling cotyledons increased. The content of total phenols and flavonoids in hypocotyl was highest under R2B5 treatment, and there was no difference in the content of three phenolic compounds in cotyledons. ANS activity in hypocotyl was the highest under R1B1 treatment, and ANS activity in cotyledon was the highest under R5B2 treatment. [Conclusions] Pure red light promoted seedling elongation after seed germination, pure blue light promoted the formation of anthocyanins, flavonoids, and total phenols in seedlings, and the influence of red and blue combination light on the physiological characteristics of seedlings was more complicated. Taking into account the growth and physiological indicators, this study preliminarily believed that R2B5 treatment was a suitable LED light quality for the growth of alfalfa seedlings as it had moderate growth, high chlorophyll and phenolic content.

**Keywords:** alfalfa; LED; germination; photosynthetic pigments; phenolic compounds

芽苗菜是在有光照或黑暗条件下,植物种子或储存养分的器官直接萌发生长出可供直接食用的嫩芽、芽球或幼茎等。黄豆和绿豆等一些豆科植物芽苗菜是我国常见的菜肴原材料,因其具有较高的营养价值和丰富的次生代谢物而被人们喜爱。光质对植物光合器官的结构和功能有很大的影响<sup>[1]</sup>。发光二极管(LED)技术的发展使得人们可以通过操纵光照(如光质和光强)进行光合优化和植物生理调控<sup>[2]</sup>。LED散热少,能量利用率高,在受控的环境条件下替代传统灯具进行人工照明,是一种新型的节能方案<sup>[3]</sup>。利用LED培养芽苗菜可以调节其生长,改变光合色素含量和抗氧化能力等。研究表明,与黑暗处理下的豆芽相比,中等LED光照强度的红蓝白光均可增加黄豆和绿豆芽苗菜中光合色素和花青素的含量,且黄豆芽苗菜中的多酚含量随着红光比例的增加而增加<sup>[4]</sup>;LED蓝光能够提高西兰花芽苗菜营养品质及抗氧化特性;LED白光处理的香椿芽苗菜生长最好且营养成分含量高<sup>[5]</sup>。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)是豆科苜蓿属的多年生植物,具有对不同气候和土壤类型适应性广、品质优良和高效固氮等优点,其粗蛋白含量高、潜在的营养价值高、消化率好,是一种优良牧草,在许多国家广泛种植<sup>[6]</sup>。同时它含有各种氨基酸、维生素、烟酸、叶酸、生物素、肌醇、胆碱和矿物质等丰富的营养成分,是一种营养价值极高的蔬菜作物<sup>[7]</sup>。紫花苜蓿芽苗菜因富含酚类、类黄酮、花青素等物质,同时具有很高的药用价值和保健功能<sup>[8]</sup>。唐丽等<sup>[9]</sup>研究发现,白光有利于提高其干重和硝酸盐含量,红光有利于提高鲜重,蓝光提高了苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性和槲皮素的含量;对紫花苜蓿芽苗菜影响最大的是蓝光,显著提高了其维生素C、酚类物质、可溶性蛋白含量和抗氧化能力,有利于提高其营养品质。冯娜娜<sup>[10]</sup>研究表明,红光处理对紫花苜蓿芽苗菜可溶性糖的积累最有利,蓝光则对可溶性蛋白和花青素含量的积累最有利,而且对PAL活性及抗氧化性的提高效果显著,白光处理则对于总酚和类黄酮物质的产生有利。Fiutak等<sup>[11]</sup>发现,在LED照明下紫花苜蓿芽苗菜子叶重增加,在红绿蓝组合光(RGB)下生长的芽苗菜生物量增加了50%,且总酚含量最高,在RGB和冷白光处理下子叶中叶绿素和类胡萝卜素含量较高。

光质决定某些植物种子是否能够萌发以及萌发后发芽率的高低<sup>[12]</sup>。光质等光照因子的变化会引起种子萌发阶段的生理和生化水平反应变化,从而引起植物形态和功能差异<sup>[13]</sup>。目前关于光质对紫花苜蓿的影响研究多聚焦在紫花苜蓿的芽苗菜时期,鲜有人探究不同光质持续处理对紫花苜蓿种子萌发及幼苗光合色素、解剖结构、酚类化合物及其相关酶活性的影响。种子萌发和幼苗生长期是芽苗菜生产的关键时期,也是紫花苜蓿工厂化生产的第一步,是保证后期植物高效生产的基础。本研究拟通过不同LED光质持续处理紫花苜蓿种子,比较不同光质对其萌发及幼苗酚类化合物含量的影响,以期对紫花苜蓿芽苗菜植物工厂化生产的光质调控技术提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及地点

供试材料紫花苜蓿‘WL656’种子购于北京正道种业有限公司,挑选籽粒饱满、大小均一的种子进行试验。试验于2022年6月至11月在江苏省中国科学院植物研究所草业研究中心光照培养室进行。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 LED 灯光处理方法和种子培养** 设置 10 个 LED 光源处理:2 种红光波长分别为 660 nm(R660)和 630 nm(R630),2 种蓝光波长分别为 450 nm(B450)和 465 nm(B465),绿光波长为 520 nm(G520),黄光波长为 590 nm(Y590),红光(660 nm)与蓝光(450 nm)比例为 5:2(R5B2)、1:1(R1B1)、2:5(R2B5),白光(W);以黑暗(D)中生长的紫花苜蓿种子为对照。LED 灯管购于南京植生谱光电科技有限公司。试验期间各光质处理的光量子通量密度均保持在  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,光照时间为 12 h,每个处理单元四周以反光布遮挡,避免 LED 光的相互干扰。

紫花苜蓿种子发芽试验采用培养皿滤纸法。每个培养皿中均匀排放 50 粒,盖好培养皿盖,置于不同 LED 光质处理的培养架上。1 个培养皿为 1 个重复,每个处理设 4 次重复。培养室内温度( $22\pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 50%~80%。自播种开始便进行不同光质处理,直至幼苗抽出第一片真叶时结束试验。试验期间定期喷洒蒸馏水,保持滤纸湿润。试验重复 2 次。

**1.2.2 指标测定** 1) 种子萌发指标。播种后每日定时观察并记录种子的发芽出苗情况,一旦胚根出现则认为种子已经萌发,记数持续进行到再无种子萌发时,认为种子发芽结束,然后计算发芽率和发芽势。发芽率( $GP$ )=发芽结束时萌发种子总数/供试种子总数 $\times 100\%$ ;发芽势( $GF$ )=发芽中期萌发种子数/供试种子总数 $\times 100\%$ ;发芽指数( $GI$ )=  $\sum (G_t/D_t)$ ,其中  $G_t$  为在第  $t$  天的发芽数, $D_t$  为相应发芽天数;活力指数( $VI$ )=发芽指数 $\times$ 胚芽长度。

2) 幼苗形态指标。发芽结束,从每个培养皿中随机选取 5 株幼苗,用直尺测量根长、茎长。

3) 幼苗下胚轴横切面解剖结构分析。取新鲜的幼苗,用锋利的刀片将下胚轴切割成 0.5 cm 长的小段,装入含 FAA 固定液(福尔马林、冰酸、70%乙醇混合溶液,体积比 1:1:18)的 EP 管中固定 48 h,送武汉赛维尔生物科技有限公司制作石蜡切片,使用显微镜(Olympus BX53)和 MShot Image Analysis System 软件观察切片、拍照、测量数据。

4) 幼苗生理特性测定。采用 96%乙醇提取法测定子叶光合色素含量<sup>[14]</sup>;采用 1%盐酸-甲醇溶液(体积比为 1:99)提取法测定子叶和下胚轴花青素、总酚及类黄酮含量<sup>[15]</sup>。采用酶联免疫分析(ELISA)试剂盒(江苏酶免实业有限公司)测定子叶和下胚轴查尔酮合成酶(CHS)和花青素合成酶(ANS)活性<sup>[16]</sup>。

## 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行整理、分析及绘图,采用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同光质对紫花苜蓿种子萌发的影响

本试验观察发现,紫花苜蓿‘WL656’种子播种 24 h 内已经发芽,处理 2 d 达到种子萌发高峰期,处理 3 d 后培养皿中无新增发芽种子。4 d 收获时各处理的种子发芽生长状况如图 1 所示。



图 1 紫花苜蓿种子发芽 4 d 后生长状况

Fig. 1 Growth status of alfalfa seeds after 4 days of germination

R660,R630:红光 Red light 660 nm,630 nm;B450,B465:蓝光 Blue light 450 nm,465 nm;G520:绿光 Green light 520 nm;Y590:黄光 Yellow light 590 nm;R5B2,R1B1,R2B5:红光 Red light(660 nm):蓝光 Blue light(450 nm)=5:2,1:1,2:5;W:白光 White light;D:黑暗 Dark. 下同 The same below.

由表1可知:不同处理的种子在第2天的发芽势均达到80%以上,且处理间无显著差异。整个处理期间,种子的发芽率及发芽指数与发芽势趋势相同,不同处理间无显著差异。种子活力指数在不同光质处理下有差异,与对照黑暗(D)处理的种子相比,所有光照处理均降低了种子活力指数。在同种光质不同波长(R660与R630、B465与B450)处理下种子活力指数的响应表现相近。不同单色光对种子活力指数影响显著,不同红蓝光组合处理下,活力指数表现为R5B2处理显著高于R2B5和R1B1处理,而R2B5和R1B1处理之间差异不显著,即红光比例超过蓝光时种子活力较高。

表1 不同光质对紫花苜蓿种子萌发的影响

Table 1 Effects of different light quality on seed germination of alfalfa

处理 Treatments	发芽势/% Germination force	发芽率/% Germination percentage	发芽指数 Germination index	活力指数 Activity index
R660	86±5.89	85±6.00	41.46±3.09	161.48±12.02 <sup>b</sup>
R630	82±5.42	82±5.42	40.75±2.63	157.70±10.18 <sup>bc</sup>
B450	83±3.00	83±3.00	40.00±1.63	112.40±4.59 <sup>f</sup>
B465	88±5.74	89±6.61	42.54±3.08	118.69±8.59 <sup>ef</sup>
G520	80±5.89	81±6.00	39.17±3.60	131.80±12.12 <sup>de</sup>
Y590	85±5.29	85±4.44	40.04±3.56	150.16±13.35 <sup>bc</sup>
R5B2	81±6.19	82±5.97	39.42±3.54	140.91±12.67 <sup>cd</sup>
R1B1	81±4.76	82±4.44	38.25±4.23	113.79±12.57 <sup>f</sup>
R2B5	80±7.19	80±7.12	38.08±3.83	123.20±12.38 <sup>ef</sup>
W	81±8.85	81±9.31	37.83±2.63	127.31±8.87 <sup>def</sup>
D	81±4.43	81±3.83	39.21±2.07	239.37±12.64 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示不同处理在0.05水平差异显著。下同。The different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

## 2.2 不同光质对紫花苜蓿幼苗形态指标的影响

不同光质处理的紫花苜蓿幼苗形态差异显著(图1,图2)。R5B2与W处理的幼苗根长与D处理无显著差异,但均显著长于2种蓝光(B450和B465)处理(图2-A)。所有处理中,D处理的幼苗茎长最长( $P<0.05$ ),其次R660和R630及Y590处理,再次是G520和B465处理。3种红蓝光组合、B450及W处理的茎长最短( $P<0.05$ )(图2-B)。D处理下,幼苗总长度最长( $P<0.05$ ),其次是R660和R630处理,B450和B465处理均显著减少了幼苗总长度。G520、R5B2、R2B5及W光处理下幼苗总长度差异不显著。红蓝混合光中,R5B2处理的幼苗总长度略高于R2B5和R1B1处理,但差异不显著(图2-C)。

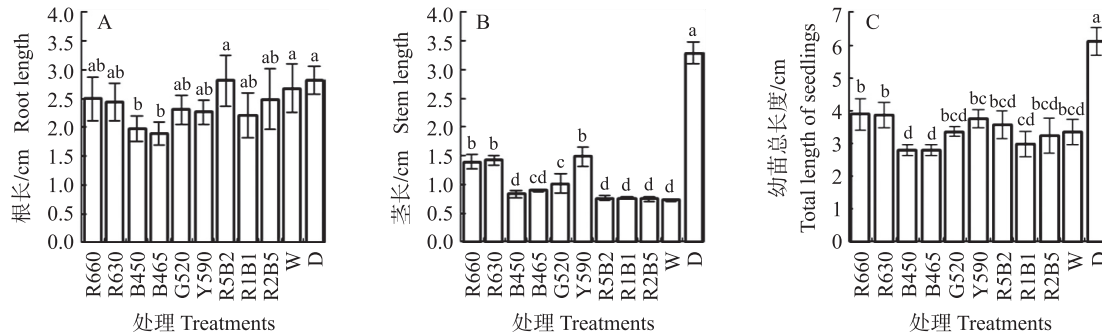


图2 不同光质对紫花苜蓿幼苗根长(A)、茎长(B)和总长度(C)的影响

Fig. 2 Effects of different light qualities on root length (A), stem length (B) and total length (C) of alfalfa seedlings

## 2.3 不同光质对紫花苜蓿幼苗下胚轴解剖结构的影响

不同光质处理后紫花苜蓿幼苗下胚轴横切面的光学显微照片如图3所示。幼苗茎直径在R660和B465处理下显著增加,B450和R5B2处理次之,G520处理最小(图4-A)。表皮细胞厚度则是在B465和R5B2处理下最大,R2B5和W处理次之,D处理下最小(图4-B)。皮层厚度在B465处理下最大,其次是R660和R5B2处理(图4-C)。维管束直径在B450处理下最大,其次是R660和R5B2处理(图4-D)。单个导管面积在B465处理下显著增加,其余各处理无显著差异(图4-E)。B465处理下皮层总厚度/茎直径最大,B450处理下最小(图4-F)。B465处理下维管束直径/茎直径最小( $P<0.05$ ),其余处理无显著差异(图4-G)。红蓝光组合中,随着红光比例增大蓝光比例减小,茎直径和皮层厚度减小,表皮细胞厚度和维管束直径先减小后增大,皮层总厚度/茎直径先增大后减小,单个导管面积和维管束直径/茎直径则无显著差异。

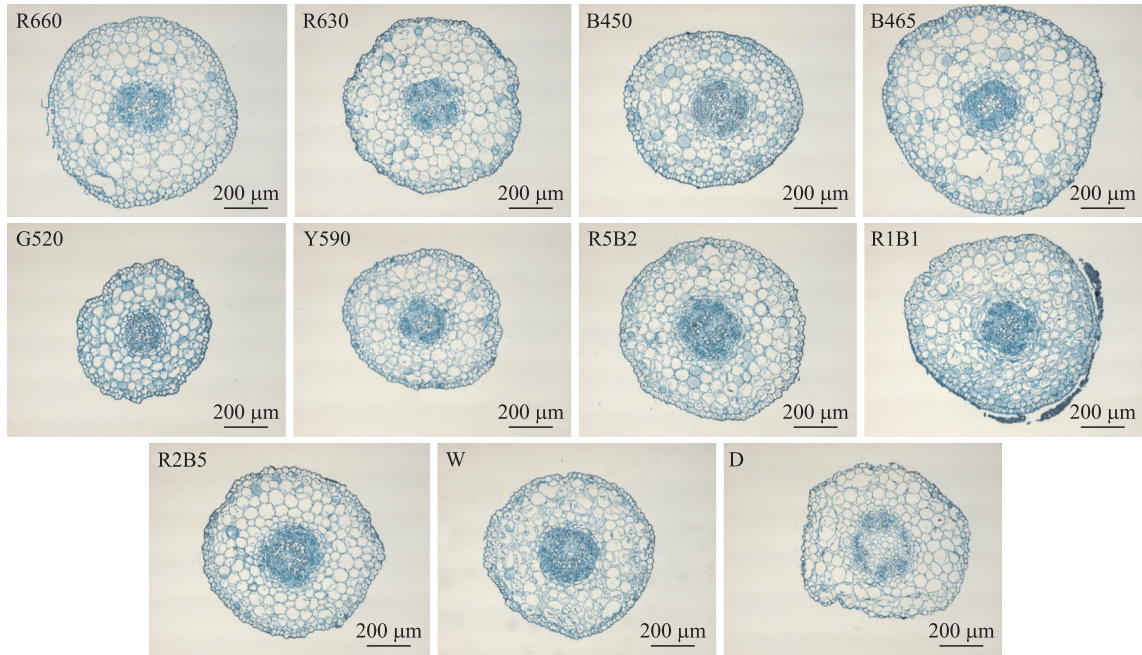


图 3 不同光质下紫花苜蓿幼苗下胚轴横切面的光学显微照片

Fig. 3 Optical micrographs of hypocotyl cross-section of alfalfa seedlings under different light quality

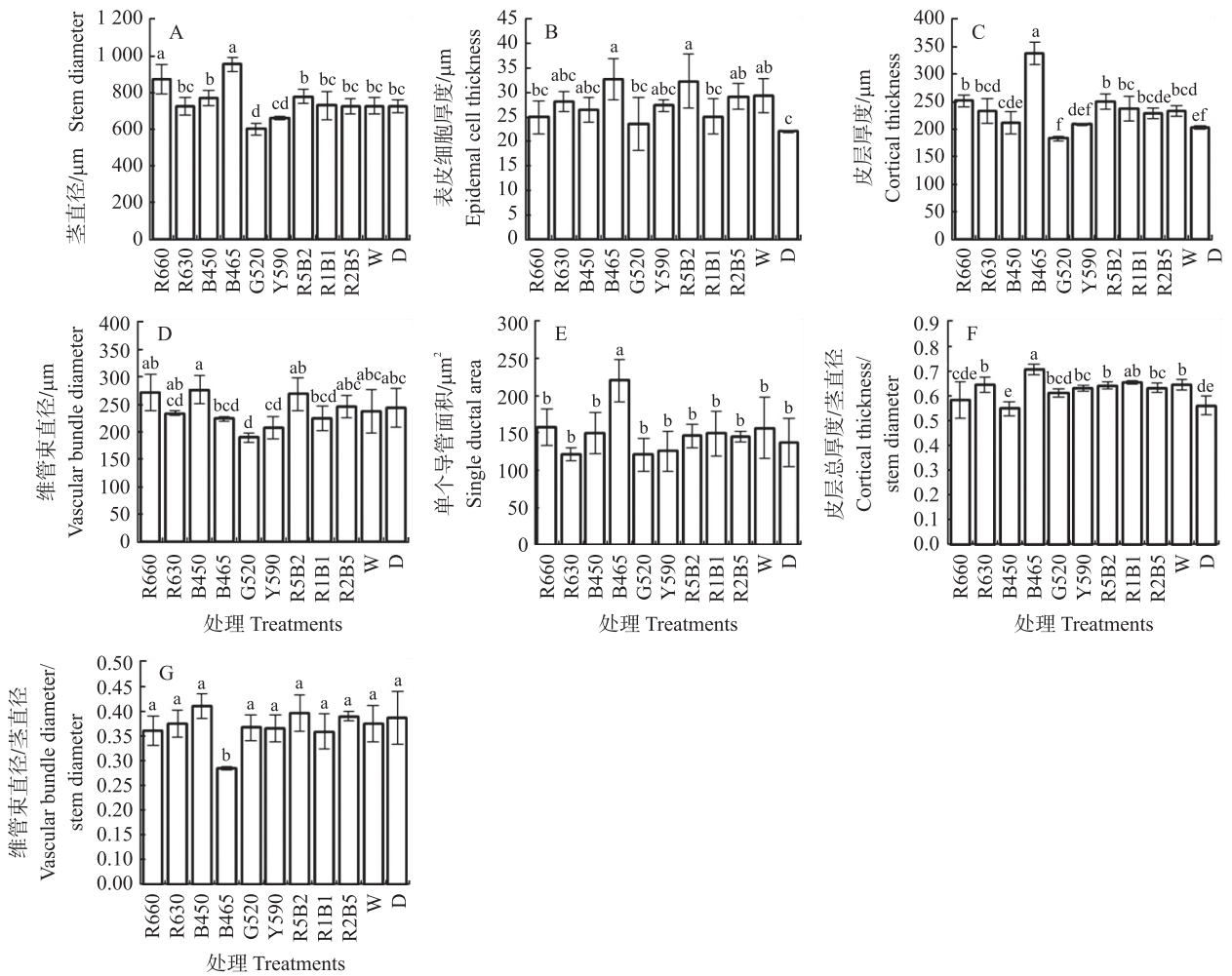


图 4 不同光质对紫花苜蓿幼苗下胚轴解剖结构的影响

Fig. 4 Effects of different light quality on hypocotyl anatomy of alfalfa seedlings

## 2.4 不同光质对紫花苜蓿幼苗子叶光合色素含量的影响

紫花苜蓿幼苗子叶中叶绿素 a 在 R2B5 光质处理下含量最多,显著高于 B450 处理,其他光质处理间无显著差异;D 处理叶绿素 a 含量显著低于光质处理(图 5-A)。叶绿素 b 含量在 R660 和 R2B5 光质处理下最多,显著高于 B450 和 B463 处理( $P<0.05$ ),D 处理的子叶中没有检测到叶绿素 b(图 5-B)。R2B5 处理的子叶中叶绿素 a+b 含量最高,其余处理除 B450 外均次之,但与 R2B5 处理相比差异不显著(图 5-C)。2 种蓝光处理下子叶中的叶绿素 a/b 值最高( $P<0.05$ ),且 B465 处理显著高于 B450 处理,D 处理的子叶几乎无叶绿素,故其叶绿素 a/b 在所有处理中显著最低,红蓝光组合处理中不同比例红蓝光对子叶叶绿素 a/b 无显著影响(图 5-D)。在所有光质处理中,R660 和 W 处理下紫花苜蓿幼苗子叶中的类胡萝卜素含量最高,R630 处理的含量最低,而黑暗处理的子叶类胡萝卜素含量少于光质处理;红蓝光组合中,随着红光比例降低,蓝光比例升高,紫花苜蓿幼苗子叶中类胡萝卜素的含量呈增加趋势,但处理间差异不显著(图 5-E)。

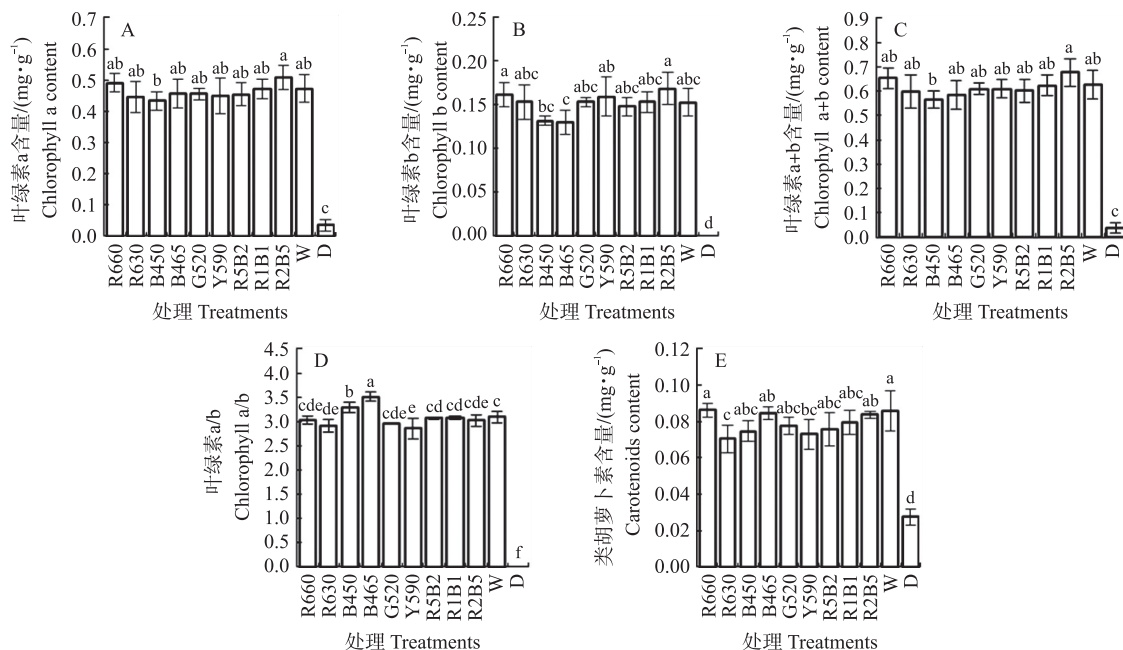


图 5 不同光质对紫花苜蓿幼苗子叶光合色素含量的影响

Fig. 5 Effects of different light quality on photosynthetic pigment content of cotyledons of alfalfa seedlings

## 2.5 不同光质对紫花苜蓿幼苗酚类化合物含量的影响

**2.5.1 花青素** 由图 6 可见: B450 和 B465 处理的幼苗下胚轴和子叶的花青素含量最高( $P<0.05$ ), G520、Y590 及 D 处理下最低。在红蓝光组合中,随着红光减少蓝光增多,紫花苜蓿幼苗下胚轴的花青素含量均呈现出增加的趋势(图 6-A),子叶中的则差异不显著(图 6-D)。

**2.5.2 总酚** 从图 6 可见:下胚轴对各不同光质处理间的响应差异比子叶大。幼苗下胚轴在 2 种蓝光处理下总酚含量显著高于其他处理,Y590 处理最低,幼苗下胚轴中的总酚含量随着蓝光比例增加而增加(图 6-B)。子叶中 B450 处理的总酚含量最高,其次为 B465 和 R630 处理,其他处理间差异不显著,其中不同红蓝光组合处理对子叶总酚含量也无显著差异(图 6-E)。D 处理的幼苗下胚轴和子叶总酚含量均显著低于各光质处理,但子叶中总酚含量( $1.626 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )又远高于下胚轴( $0.854 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )。

**2.5.3 类黄酮** 不同光质处理对紫花苜蓿幼苗下胚轴和子叶中类黄酮含量的影响与总酚含量变化趋势类似,表现为对下胚轴的影响大,对子叶的影响小(图 6)。下胚轴中蓝光处理下类黄酮含量最高,Y590 和 D 处理最低,红蓝光组合中随蓝光比例增加类黄酮含量有增加的趋势(图 6-C)。子叶中类黄酮含量也是蓝光处理的最高,其他处理含量差异较小,红蓝光比例对子叶类黄酮含量没有显著影响(图 6-F)。与总酚不同的是,D 处理子叶中类黄酮含量显著高于 R660,说明子叶类黄酮含量受光照影响较小。

## 2.6 不同光质对紫花苜蓿幼苗酚类化合物相关酶活性的影响

**2.6.1 查尔酮合成酶(CHS)活性** R630 处理的下胚轴 CHS 活性最高,显著高于其他处理(Y590 除外)(图 7-A)。在 G520 和 R2B5 处理下子叶 CHS 活性显著高于其他处理(图 7-B)。在红蓝光组合处理中,

随着红光减少蓝光增多,幼苗下胚轴的 CHS 活性降低,子叶中则呈增加趋势。

**2.6.2 花青素合成酶(ANS)活性** 白光 W 处理的下胚轴中 ANS 活性最高,显著高于其他处理(图 7-C)。子叶中则在 Y590 和 R5B2 处理下 ANS 活性最高,其次为 B450 和 G520 处理(图 7-D)。红蓝光组合中仅 R1B1 处理对下胚轴 ANS 活性有促进作用,子叶中仅 R5B2 处理有促进作用。

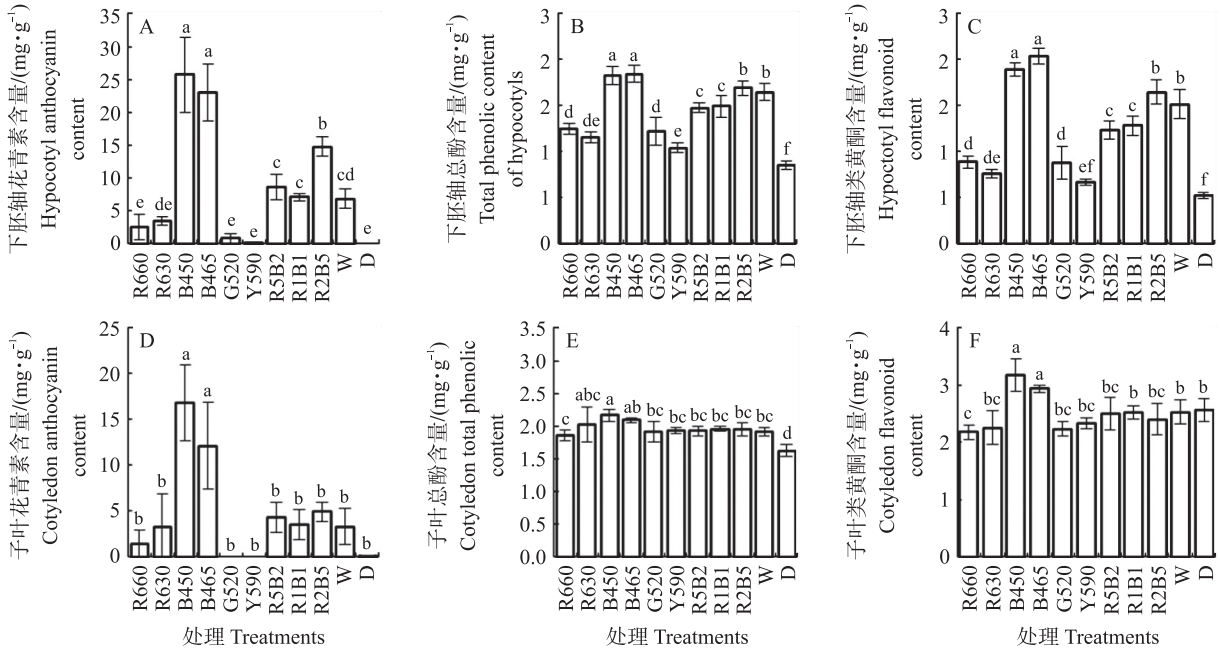


图 6 不同光质对紫花苜蓿幼苗酚类化合物含量的影响

Fig. 6 Effects of different light quality on phenolic compounds content in alfalfa seedlings

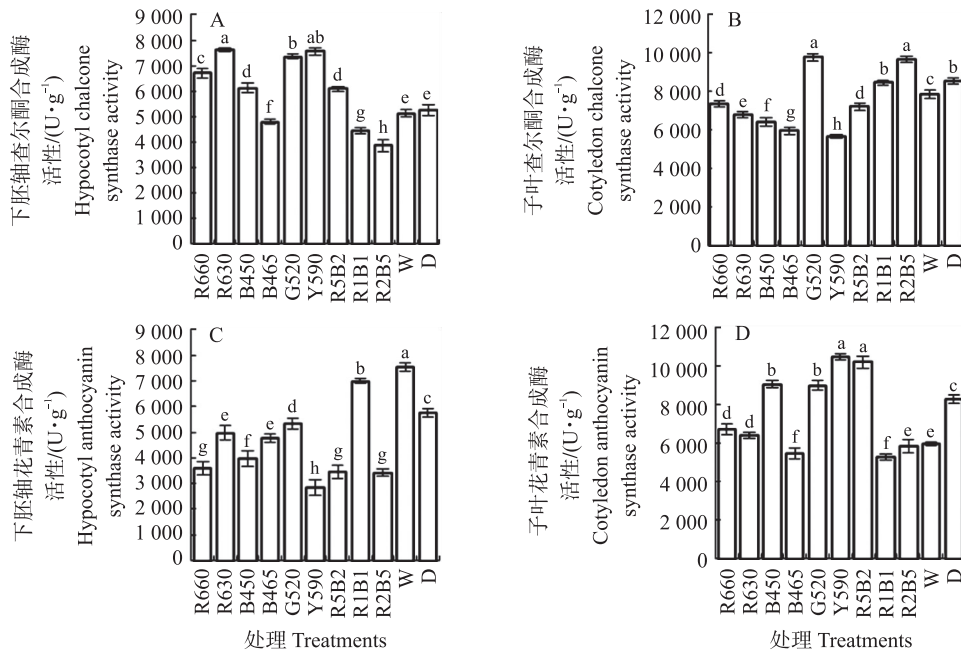


图 7 不同光质对紫花苜蓿幼苗酚类化合物相关酶活性的影响

Fig. 7 Effects of different light quality on phenolic compound-related enzyme activities in alfalfa seedlings

### 3 讨论与结论

本试验得出有无光照或不同的光质均不影响紫花苜蓿种子的萌发,这与同属豆科绿豆种子的研究结果一致<sup>[17]</sup>,但不同处理对种子发芽后幼苗根和茎伸长影响较大。植物通常在高强度的蓝光下茎伸长会被抑制,而红光则会促进其生长。本试验中紫花苜蓿种子在对照黑暗(D)处理下,幼苗总长度显著增加,其次是 2 种红光(R660 和 R630),而 2 种蓝光(B450 和 B465)均显著减少了幼苗总长度,这与前人研究结论

一致<sup>[10]</sup>。不同配比的红蓝光组合处理下的根长更接近于红光处理,而茎长更接近于蓝光处理。由此推出,培养皿条件下种子胚根的生长主要受红光影响,而茎的生长主要受蓝光影响。黄光和绿光对茎伸长的影响相较于白光有显著促进作用,但又显著低于暗处理,这与大豆芽苗菜的研究结果类似<sup>[18]</sup>。

不同光质会影响紫花苜蓿下胚轴皮层和导管组织结构。本试验中随着蓝光比例的增加下胚轴的茎直径减小,这与前人探究荞麦芽苗菜的研究结果有所出入<sup>[19]</sup>,可能是由于植物品种不同对光的响应不同。B465处理的幼苗下胚轴皮层厚度占茎比最大,说明此种光质处理可能最有利于植物营养生长和抗逆性增加<sup>[20]</sup>,而作为主要营养物质储存组织的皮层,皮层总厚度/茎直径比值大有利于提高苜蓿芽苗菜的营养品质。本研究中,相较于R660和B450,3种红蓝光组合处理均增加了皮层总厚度/茎直径比值,说明红蓝组合光可能更有利于植株营养生长。B465下的单个导管面积显著高于其他处理,有利于提高植物运输能力,这与水稻的研究结果类似<sup>[21]</sup>。

光合色素是植物进行光合作用的基础。本研究发现,紫花苜蓿幼苗子叶中叶绿素和类胡萝卜素含量均随着组合中蓝光比例的增加而增加。前人研究表明在红蓝光质处理下,适当补充绿光可以促进植物生长,但绿光过量则会抑制生长<sup>[22]</sup>。本试验中,绿光和黄光对紫花苜蓿子叶中的光合色素含量无明显影响,具体原因待进一步探究。在蓝光下叶绿素a+b低于白光和红光,但其叶绿素a/b值较高,这与前人研究结论一致<sup>[23]</sup>。因此,通过调节光质中红蓝光的配比可以实现调节紫花苜蓿植物体内光合色素含量的效果,进而调节植物生长发育状态和光合作用能力,提高生产效率<sup>[24]</sup>。

酚类化合物可以调控植物的着色程度,具有抗衰老、清除自由基的作用,对人体有保健作用。查尔斯合成酶(CHS)是花青素生物合成途径中的第一个关键酶,为后续花青素合成提供基本碳骨架,而花青素合成酶(ANS)有催化花青素由无色变为有色的着色功能<sup>[25]</sup>。蓝光通常被认为能够促进植物体内的花青素积累<sup>[26]</sup>。本试验也发现2种蓝光(B450和B465)均能促进紫花苜蓿幼苗下胚轴和子叶的花青素、总酚与类黄酮的积累。B450处理对子叶ANS活性的促进作用最强,这与紫叶生菜的研究结果类似<sup>[27]</sup>。白光处理对幼苗下胚轴中总酚和类黄酮含量增加的影响不及蓝光,这与冯娜娜<sup>[10]</sup>的研究结果不同,原因可能是冯娜娜设置的光质处理是先黑暗处理发芽后再进行光质处理,本试验是自播种后持续光质处理,且本试验选用的紫花苜蓿品种和设置的白光波长与其不同。子叶中不同红蓝光比例对总酚和类黄酮含量差异影响不明显,该结论与前人对水培生菜研究有所出入<sup>[28]</sup>,原因可能是子叶与成熟叶片对光响应不同所致。本试验中,红蓝组合光对CHS活性促进作用大于纯蓝光,这与前人对生菜的研究结果类似<sup>[29]</sup>;但本试验结果同时得出红光对CHS活性促进作用大于蓝光,这与生菜上的研究结果相反,这可能是由于品种和光质波长不同导致的<sup>[29]</sup>。在绿光和黄光下,幼苗花青素含量极低,在紫色芹菜叶柄上也发现类似结果<sup>[30]</sup>。黑暗D处理下CHS和ANS活性均较高,但仍不能合成大量花青素,可能由于合成路径上游缺乏原料。本试验中,紫花苜蓿幼苗下胚轴和子叶中的CHS活性均没有与其花青素、总酚和类黄酮的含量构成正相关关系。这可能是由于CHS作用于花青素合成代谢路径中比较上游阶段的位置,酚类化合物合成还存在其他代谢路径,且供试材料为新生幼苗,此阶段光质对花青素合成的影响可能与成熟植株存在差异。

综上,本研究发现不同光质不影响紫花苜蓿的发芽,但对幼苗生长、光合色素和酚类化合物的合成有显著影响。综合考虑生长生理指标,初步认为红光(660 nm)与蓝光(450 nm)比例为2:5处理的紫花苜蓿生长量适中,叶绿素和酚类物质含量较高,是较适合紫花苜蓿幼苗生长的LED光质。本试验结果为紫花苜蓿工厂化生产的光质调控技术提供了理论基础。

#### 参考文献 References:

- [1] 姚翔宇,李广存,徐建飞,等.光照对雾培马铃薯前期生长及块茎形成的影响[J].南京农业大学学报,2023,46(1):14-22. DOI: 10.7685/jnau.202112016.  
Yao X Y, Li G C, Xu J F, et al. Effects of light on early growth and tuber formation of aeroponic potatoes[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(1): 14-22 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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.
- [3] 刘晓英,张珂,束胜,等.设施栽培光照关联温度调控的潜在优势和理论基础[J].南京农业大学学报,2023,46(5):823-832. DOI: 10.7685/jnau.202210007.  
Liu X Y, Zhang K, Shu S, et al. Potential advantages and theoretical basis of light associated temperature regulation in protected cultivation[J].

- Journal of Nanjing Agricultural University,2023,46(5):823-832(in Chinese with English abstract).
- [4] Mastropasqua L,Dipierro N,Paciolla C. Effects of darkness and light spectra on nutrients and pigments in radish, soybean, mung bean and pumpkin sprouts[J]. Antioxidants,2020,9(6):558.
- [5] 莫言玲,罗亚兰,刘兴华,等. 不同LED光质对芥菜芽苗菜生长、营养品质和抗氧化特性的影响[J]. 中国蔬菜,2023(11):56-62.  
Mo Y L,Luo Y L,Liu Y H,et al. Effects of different LED light qualities on growth,nutritional quality and antioxidant activity of mustard sprouts[J]. China Vegetables,2023(11):56-62(in Chinese with English abstract).
- [6] Huang Z,Liu Y,Cui Z,et al. Soil water storage deficit of alfalfa(*Medicago sativa*) grasslands along ages in arid area (China) [J]. Field Crops Research,2018,221:1-6.
- [7] Rafińska K,Pomastowski P,Wrona O,et al. *Medicago sativa* as a source of secondary metabolites for agriculture and pharmaceutical industry[J]. Phytochemistry Letters,2017,20:520-539.
- [8] 梁泰帅,赵肖琼,陈乐,等. 外源DA-6对UV-B辐射胁迫下紫花苜蓿幼苗生长调节及花青素合成代谢的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医,2023(12):107-113,124.  
Liang T S,Zhao X Q,Chen L,et al. Effects of exogenous DA-6 on growth regulation and anthocyanin anabolism of alfalfa seedlings under UV-B radiation stress[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine,2023(12):107-113,124(in Chinese with English abstract).
- [9] 唐丽,鲁燕舞,崔瑾. 光质对苜蓿芽苗菜营养品质和抗氧化特性的影响[J]. 食品科学,2014,35(13):32-36.  
Tang L,Lu Y W,Cui J. Effects of light quality on nutritional quality and antioxidant properties of *Medicago sativa* sprouts[J]. Food Science,2014,35(13):32-36(in Chinese with English abstract).
- [10] 冯娜娜. 不同光质对紫花苜蓿芽苗菜品质和抗氧化性影响的研究[D]. 新乡:河南师范大学,2016.  
Feng N N. Effects of different light qualities on quality and antioxidant properties of alfalfa (*Medicago Sativa* L.) sprouts vegetables [D]. Xinxiang:Henan Normal University,2016(in Chinese with English abstract).
- [11] Fiutak G,Michalczyk M,Filipeczak-Fiutak M,et al. The impact of LED lighting on the yield,morphological structure and some bioactive components in alfalfa(*Medicago sativa* L.) sprouts[J]. Food Chemistry,2019,285:53-58.
- [12] 任毛飞,毛桂玲,刘善振,等. 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,et al. 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 with English abstract).
- [13] Haliapas S,Yupsanis T A,Syros T D,et al. *Petunia × hybrida* during transition to flowering as affected by light intensity and quality treatments[J]. Acta Physiologiae Plantarum,2008,30(6):807-815.
- [14] 冯一峰,王艳,唐都,等. 红枣叶片叶绿素提取方法的比较[J]. 中国酿造,2014,33(6):50-53.  
Feng Y F,Wang Y,Tang D,et al. Comparison of extraction methods of chlorophyll from jujube leaves[J]. China Brewing,2014,33(6):50-53(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘海英,邢晨涛,李凤阳,等. 响应面法优化紫色菊花花瓣中花青素苷的提取工艺[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(6):58-64.  
Liu H Y,Xing C T,Li F Y,et al. Optimizing extraction technology of anthocyanin from purple *Chrysanthemum* petals based on response surface methodology[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2017,45(6):58-64(in Chinese with English abstract).
- [16] 王建林,张毅,冯西博,等. 不同供钾处理对有色大麦籽粒花青素合成关键酶活性及其花青素积累速率的影响[J]. 高原农业,2023(3):221-232,323.  
Wang J L,Zhang Y,Feng X B,et al. Effects of different application rates of potassium fertilizer on the activities of key enzymes in anthocyanin synthesis and the rate of anthocyanin accumulation in colored barley[J]. Journal of Plateau Agriculture,2023(3):221-232,323(in Chinese).
- [17] 雷桓,陈慧仁,余丹,等. 不同光质照射对绿豆种子萌发及内源激素的影响[J]. 湖南农业科学,2020(11):24-26,39.  
Lei H,Chen H R,Yu D,et al. Effects of different wavelength lights on germination and endogenous hormones of mung bean(*Vigna radiata*) seeds[J]. Hunan Agricultural Sciences,2020(11):24-26,39(in Chinese with English abstract).
- [18] 齐学会,张晓燕,鲁燕舞,等. 光质和光周期对大豆芽苗菜生长及总酚类物质含量的影响[J]. 中国蔬菜,2014(7):29-34.  
Qi X H,Zhang X Y,Lu Y W,et al. Effects of light quality and photoperiod on growth and total phenolics content of soybean sprouts[J]. China Vegetables,2014(7):29-34(in Chinese with English abstract).
- [19] 吕铮. 不同LED光质对荞麦芽苗菜生长及品质的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2023.  
Lv Z. The effect of different LED light quality on the growth and quality of buckwheat sprouts[D]. Changchun:Jilin Agricultural University,2023(in Chinese with English abstract).
- [20] 萨如拉,张志强,伟勒斯,等. 两个苜蓿品种营养器官解剖结构特征比较[J]. 西北植物学报,2020,40(11):1881-1887.  
Sa R L,Zhang Z Q,Wei L S,et al. Comparative study on anatomical structure of vegetative organs of two different alfalfa varieties[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2020,40(11):1881-1887(in Chinese with English abstract).
- [21] 郭银生,张晓燕,邬奇,等. 光质对‘抗优63’杂交水稻幼苗器官结构及光合特性的影响[J]. 南京农业大学学报,2013,36(2):38-44.  
DOI:10.7685/j.issn.1000-2030.2013.02.007.  
Guo Y S,Zhang X Y,Wu Q,et al. Effects of light quality on the organs structure and photosynthesis characteristics of the hybrid rice‘Kangyou 63’ seedlings[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2013,36(2):38-44(in Chinese with English abstract).

- [22] 王晓晶. LED 绿光对蔬菜生长及品质的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2019.  
Wang X J. Effects of LED green light on growth and quality of vegetable [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [23] Landi M, Zivcak M, Sytar O, et al. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: a review [J]. *Biochimica et Biophysica Acta Bioenergetics*, 2020, 1861(2): 148131.
- [24] 林魁, 黄枝, 徐永. 光质对生菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(8): 32-39.  
Lin K, Huang Z, Xu Y. Effects of light quality on seed germination and seedling growth of lettuce [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(8): 32-39 (in Chinese with English abstract).
- [25] 刘淑华, 臧丹丹, 孙燕, 等. 花青素生物合成途径及关键酶研究进展[J]. 土壤与作物, 2022, 11(3): 336-346.  
Liu S H, Zang D D, Sun Y, et al. Research advances on biosynthesis pathway of anthocyanins and relevant key enzymes [J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(3): 336-346 (in Chinese).
- [26] Park Y G, Jeong B R. How supplementary or night-interrupting low-intensity blue light affects the flower induction in *Chrysanthemum*, a qualitative short-day plant [J]. *Plants*, 2020, 9(12): 1694.
- [27] 熊伟任, 雷雨田, 杨永森, 等. 不同波长蓝光对紫叶生菜品质形成的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 143-148.  
Xiong W R, Lei Y T, Yang Y S, et al. Effect of blue light at different wavelengths on quality formation of *Lactuca sativa* [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 143-148 (in Chinese).
- [28] 王奇, 刘文科. LED 红蓝光生育期光质变化模式对水培生菜生长与品质的影响[J]. 中国照明电器, 2022(10): 9-14.  
Wang Q, Liu W K. Effect of LED red and blue light quality change mode on growth and quality of hydroponic lettuce during growth period [J]. *China Light & Lighting*, 2022(10): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- [29] Soufi H R, Roosta H R, Stepień P, et al. Manipulation of light spectrum is an effective tool to regulate biochemical traits and gene expression in lettuce under different replacement methods of nutrient solution [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 8600.
- [30] 钟秀来, 罗庆, 张德军, 等. 不同光质条件下紫色芹菜花青素响应机理分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(19): 6529-6535.  
Zhong X L, Luo Q, Zhang D J, et al. Response mechanism analysis of anthocyanin in purple celery under light quality condition [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(19): 6529-6535 (in Chinese with English abstract).

责任编辑: 沈 波