

不同强度的红蓝光质对丹参根系形态和有效成分积累的影响

冯思念¹, 王 瑞¹, 顾 雯¹, 余冰雨¹, 王幼平¹, 冯立国², 张顺仓^{1*}

1. 扬州大学生物科学与技术学院, 江苏 扬州 225009

2. 扬州大学园艺与植物保护学院, 江苏 扬州 225009

摘 要: **目的** 研究不同强度的白光、红光和蓝光对丹参根系形态和有效成分积累的影响。**方法** 分别利用4个光照强度的白光、红光和蓝光处理丹参植株,测定各处理组中丹参侧根数、侧根直径等根系形态学指标和7种有效成分的含量。**结果** 在选定的光强范围内,不同的光质对丹参地上部分形态指标的影响不同。100、200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的红光可以促进侧根的发生,200、300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的蓝光则可显著提高根生物量。不同成分的积累对光质和光强的响应不同,丹参酮类成分的合成积累较酚酸类成分对光响应更为敏感。**结论** 光对丹参根系形态和有效成分积累具有双重的调控作用,合理地利用光质和光强是提高丹参药材产量和品质的有效途径之一。

关键词: 光强; 光质; 根系形态; 有效成分; 丹参

中图分类号: R282.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2019)21-5313-06

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2019.21.026

Effects of red light and blue light on root morphology and accumulation of bioactive compounds in *Salvia miltiorrhiza*

FENG Si-nian¹, WANG Rui¹, GU Wen¹, SHE Bing-yu¹, WANG You-ping¹, FENG Li-guo², ZHANG Shun-cang¹

1. College of Bioscience and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

Abstract: **Objective** Investigate the effects of different intensity of white light, red light and blue light on root morphology and bioactive compounds accumulations of *Salvia miltiorrhiza*. **Methods** The seedlings of *S. miltiorrhiza* were treated with 4 intensities of white light, red light and blue light, respectively, the morphologic index of root such as the lateral root number, lateral root diameter as well as the content of seven bioactive compounds were determined. **Results** The influences of different light quality on the above-ground morphological indexes of *S. miltiorrhiza* were distinct. Red light of 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ and 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ promoted the occurrence of lateral root, and blue light of 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ and 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ significantly increased the root biomass. The accumulation of different bioactive compounds was distinctly affected by light quality and light intensity, the accumulation of tanshinones was more sensitive to the light treatments than that of phenolic acids. **Conclusion** Light regulates the lateral root development and accumulations of bioactive compounds simultaneously, the application of artificial light is a promising method to improve the yield and quality of *S. miltiorrhiza*.

Key words: light intensity; light quality; root morphology; bioactive compounds; *Salvia miltiorrhiza* Bge.

丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bge. 为唇形科鼠尾草属多年生草本植物,以根茎入药,是我国常用的中药材之一,具有活血化瘀、安神消胀、抗氧化、抗感染、抗血小板聚集等作用^[1-3]。丹参药材的价格由根系形态和有效成分含量2个主要因素决定,市场

上以根粗皮红,头大无芦者为佳^[4]。

光是影响植物生长发育的重要环境因子,参与光形态建成^[5]、侧根发育^[6]及种子萌发^[7]等各个生理过程。同时光也调控多种植物中次生代谢物的合成积累,如 Lee 等^[8]用 LED 光源对甜荞 *Fagopyrum*

收稿日期: 2019-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700257); 江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB180032); 中国博士后科学基金面上项目(2015M571826); 扬州大学大学生学术科技创新基金项目(x20170809, x20180661); 江苏省生物技术品牌专业

作者简介: 冯思念, 生物科学专业本科生, 主要从事药用植物的相关学习和研究。E-mail: 3292343594@qq.com

*通信作者 张顺仓, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事药用植物次生代谢调控研究。E-mail: zhangsc@yzu.edu.cn

esculentum Moench 和苦荞 *F. tataricum* (L.) Gaertn. 种芽补充不同的光质,发现红光可以显著提高甜荞种芽中芦丁、苾草素等成分的含量。Shiga 等^[9]用红光、蓝光和白光分别处理罗勒 *Ocimum basilicum* L. 苗,发现红光处理 14 d 后植株中迷迭香酸的质量分数达到了 6 mg/g 鲜质量,显著高于对照组。本研究设置不同的光照强度,探讨白光、红光及蓝光 3 种光质对丹参部分生长指标、根系形态指标及有效成分含量的影响,以期利用光质提高丹参药材的产量和品质提供理论参考。

1 材料与仪器

丹参种子于 2017 年 7 月取自陕西天士力植物药业有限责任公司商洛药材基地,经扬州大学生物科学与技术学院吴晓霞副教授鉴定为唇形科鼠尾草属植物丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bunge。对照品迷迭香酸(批号 20283-92-5)、丹酚酸 B(批号 115939-25-8)、丹酚酸 A(批号 96574-01-5)、二氢丹参酮 I(批号 87205-99-0)购自上海源叶生物科技有限公司;对照品隐丹参酮(批号 110852-200305),丹参酮 II_A(批号 110766-200417)、丹参酮 I(批号 0867-200104)购自中国食品药品检定研究院。所有对照品质量分数均大于 98%。色谱级乙腈购自美国 Tedia 公司。

Agilent 1260 型高效液相色谱仪,Agilent 1260 Infinity II 可变波长检测器(美国 Agilent 公司),5804R 型高速冷冻离心机(德国 Eppendorf 公司),SK5210HP 型超声清洗机(上海人和科学仪器有限公司),LED 灯管(南京欧谱润生物科技有限公司)。

2 方法

2.1 丹参幼苗的培养

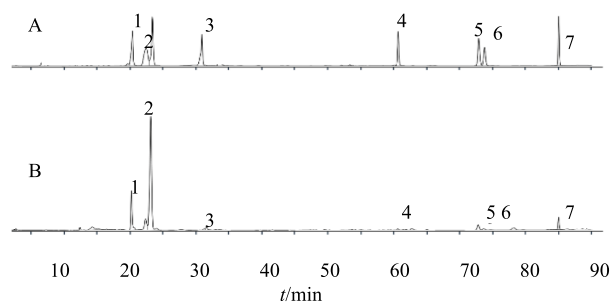
将丹参种子直播于营养钵中,放入植物培养室内进行培养,出苗 60 d 后选取生长良好且长势一致的植株,20 株/组用于光处理。以 1.2 m 的 LED 灯管为光源,分别进行红光、白光和蓝光处理。每种光质设置 50、100、200、300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 4 个光量子通量密度梯度。各光质处理均在同一植物培养室中进行,各处理组植株用黑色不透光不反光遮光布隔开以避免相互影响。植物培养室光暗周期设定为 16 h/8 h,温度设定为 25 $^{\circ}\text{C}$ /20 $^{\circ}\text{C}$ 昼夜变温,利用 Apogee MQ-500 光量子计每 3 天测定 1 次植物表面的光强,并调整光源与植物的距离以保证照射到植物表面的光强恒定。处理 60 d 后收集样品。

2.2 丹参生长指标的测定

用直尺测量每株丹参的株高、冠幅和根长,记录其叶片数、一级侧根数和二级侧根数,并用游标卡尺测量各自侧根的直径。

2.3 丹参酚酸类成分和丹参酮类成分的 HPLC 测定

成分提取和测定方法参照张顺仓等^[10]的方法进行,将样品 45 $^{\circ}\text{C}$ 烘至恒定质量,用研钵研磨成粉后过 40 目筛,精确称取粉末 0.03 g,加 6 mL 甲醇-水(7:3)超声提取 45 min,120 000 $\times g$ 离心 10 min 后取上清,用提取液补足原体积后用于 HPLC 成分测定。色谱条件为以乙腈(A)和 0.01% 磷酸水溶液(pH 2.6,B)为流动相进行二元梯度洗脱,0~10 min,5%~20% A;10~15 min,20%~25% A;15~25 min,25%~20% A;25~28 min,20%~30% A;28~40 min,30% A;40~45 min,30%~45% A;45~50 min,45%~50% A;50~58 min,50%~58% A;58~67 min,58%~50% A;67~70 min,50%~60% A;70~80 min,60%~65% A;80~85 min,65%~100% A。体积流量 1.0 mL/min,柱温 30 $^{\circ}\text{C}$ 。色谱图见图 1。



1-迷迭香酸 2-丹酚酸 B 3-丹酚酸 A 4-二氢丹参酮 I 5-隐丹参酮 6-丹参酮 I 7-丹参酮 II_A

1-rosmarinic acid 2-salvianolic acid B 3-salvianolic acid A 4-1,2-dihydrotanshinone I 5-cryptotanshinone 6-tanshinone I 7-tanshinone II_A

图 1 对照品(A)和丹参样品(B)的 HPLC 图

Fig. 1 HPLC chromatogram of standards (A) and samples (B)

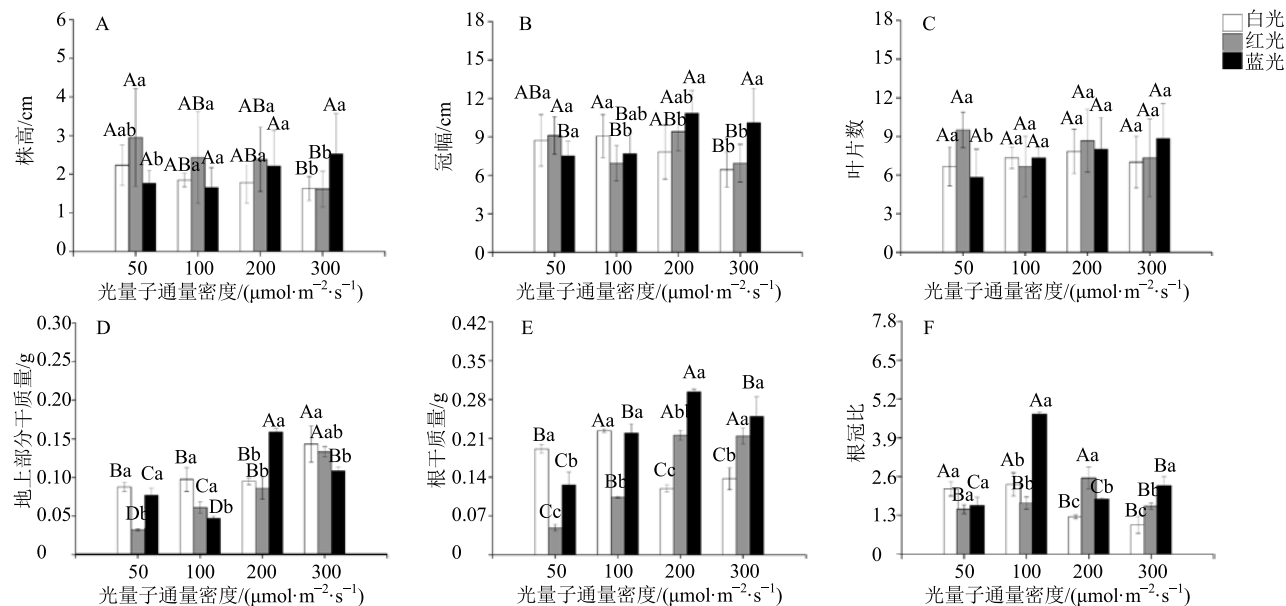
3 结果与分析

3.1 不同强度的红、蓝、白光对丹参部分形态学指标的影响

如图 2-A 所示,除 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组中株高显著高于同种强度的另外 2 种光质外,其他光质处理对丹参株高未产生显著性影响。不同强度的同种光质处理组间相比较,白光和红光处理组中冠幅未呈现明显的规律性,200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组中冠幅较另外 2 个强度的蓝光处理组则显著增大。300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理后丹参植株的冠幅显著高于同强度的白光和红光处理组(图 2-B)。50

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组中叶片数显著高于同强度的白光和蓝光处理组, 其他处理组间则未呈现明显差异 (图 2-C)。白光和红光处理组中地上部分的生物量随着光照强度的增加呈上升趋势, 蓝光处理组中则未呈现明显的规律性。在光强为 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 蓝光处理组中地上部分生物量最大, 分别达到了同强度白光和红光处理组的 1.67 倍和 1.85 倍 (图 2-D)。根生物量的变化在不同处理组中不同, 白光处理组中根干

质量随着光照强度的升高呈下降趋势, 红光和蓝光处理组中根干重则随着光照强度的增加而升高。在相同强度条件下, 蓝光处理对根生物量积累具有明显的促进作用, 如 200 、 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组中根干质量分别是对应强度白光处理组的 2.46 倍和 1.82 倍 (图 2-E)。根冠比的变化未呈现明显的规律性, 其中光照强度为 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的蓝光处理组根冠比最大, 为 4.69 (图 2-F)。



大写字母代表不同强度的同种光质处理组数据间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 小写字母代表相同强度的不同光质处理组数据间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 图中数据均为 6 个生物学重复的平均值 $\pm$ 标准差, 下同

Different capital letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among results of groups treated with different intensity of white, red and blue light, respectively; Different lowercases indicate significant difference at $P < 0.05$ among results of groups treated with the same intensity of white, red and blue light. The data presented here is the mean of six replicates $\pm$ SD, same as below

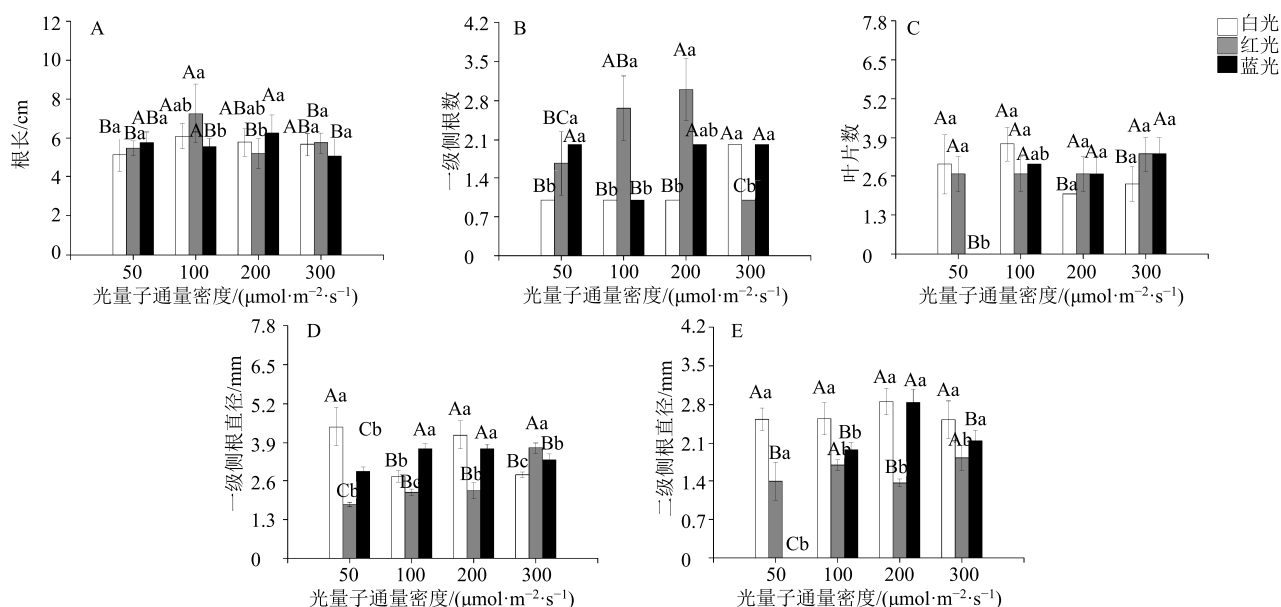
图 2 不同强度的红、蓝、白光对丹参部分形态指标的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 6$)

Fig. 2 Effects of different intensity of red light and blue light on some morphological indices of *S. miltiorrhiza* ($\bar{x} \pm s, n = 6$)

3.2 不同强度的红、蓝、白光对丹参根系形态的影响

不同强度的同种光质处理组间相比, 丹参根长只在个别处理组呈现出明显的变化, 如 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组显著小于其他 3 个白光处理组, $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组显著大于其他 3 个红光处理组, $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组显著小于其他 3 个蓝光处理组 (图 3-A)。4 个不同强度的白光处理组中, 一级侧根数最多的是 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组。4 个不同强度的红光处理组中, $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组一级侧根数显著高于另外 2 组。值得注意的是 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组一级侧根数显著高于相同强度的另外 2 种光质, 如 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组一级侧根数是相同强度白

光和蓝光处理组的 3 倍 (图 3-B)。除 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组中未出现二级侧根外, 其他处理组中二级侧根数没有呈现明显的变化 (图 3-C)。4 个强度的白光处理组中, 一级侧根直径最大的是 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组, 4 个强度的蓝光处理组中一级侧根直径差异不大。与其他两种光质相比, 红光处理显著降低了一级侧根直径, 如当光照强度为 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 红光处理组一级侧根直径分别是白光处理组和蓝光处理组的 54.46% 和 61.58% (图 3-D)。与一级侧根直径相似, 红光处理显著降低了二级侧根直径, 当光照强度为 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 红光处理组二级侧根直径分别是白光处理组和蓝光处理组的 47.72% 和 47.89% (图 3-E)。

图 3 不同强度的红、蓝、白光对丹参根系形态的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)Fig. 3 Effects of different intensity of red light and blue light on root morphology of *S. miltiorrhiza* ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)

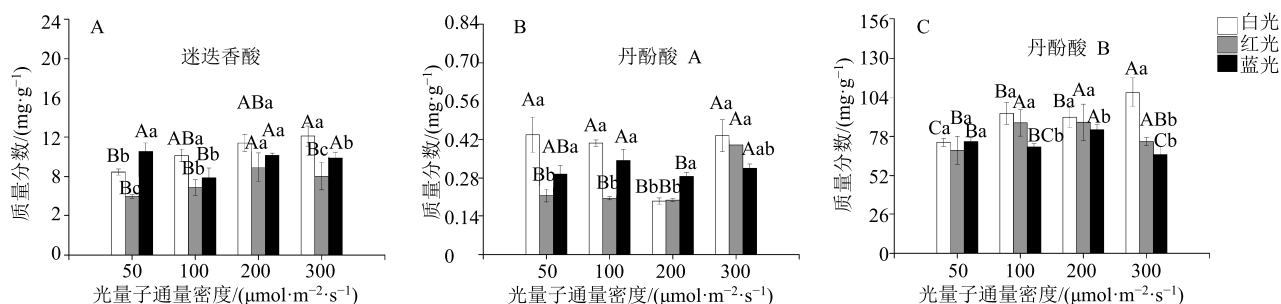
3.3 不同强度的红、蓝、白光对丹参中丹酚酸类成分积累的影响

不同的光质处理对丹参 3 种酚酸类成分积累的影响各不相同。在 4 个白光处理组中迷迭香酸的含量随着光照强度的增加呈升高趋势, 如 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组中迷迭香酸的含量是 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组的 1.52 倍。在 4 个红光处理组中迷迭香酸的含量随着光照强度的增加则呈先升高后降低的趋势, 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组中迷迭香酸的含量是 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组的 1.51 倍。当光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时蓝光更有利于迷迭香酸的积累, 当光照强度为 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 白光更有利于迷迭香酸的积累 (图 4-A)。丹酚酸 A 的积累受光处理的影响未呈现一定的规律性, 但 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的 3 种光质处理组中丹酚酸 A 的含量

均为同种光质 4 个强度组中最低 (图 4-B)。丹酚酸 B 的积累与迷迭香酸呈现出相似的趋势, 白光处理组中含量随着光照强度的增强而上升, 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组中丹酚酸 B 的含量为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组的 1.45 倍。红光和蓝光处理组中迷迭香酸的含量随着光照强度的增加呈现先升高后降低的趋势。总体而言, 白光更有利于丹酚酸 B 的积累 (图 4-C)。

3.4 不同强度的红、蓝、白光对丹参中丹参酮类成分积累的影响

随着光照强度的增加, 4 个白光处理组中二氢丹参酮 I 的含量呈现先上升后下降的趋势, 4 个红光处理组中其含量则呈现先下降后上升的趋势。200、300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组中二氢丹参酮 I 的含量显著高于 50、100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组。值得注意的是, 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的白光处理可显著

图 4 不同强度的红、蓝、白光对丹参丹酚酸类成分积累的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)Fig. 4 Effects of different intensity of red light and blue light on accumulation of phenolic acids in *S. miltiorrhiza* ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)

提高二氢丹参酮I的积累,该组中二氢丹参酮I的含量分别是相同强度红光和蓝光处理组中的 10.00 倍和 3.08 倍(图 5-A)。隐丹参酮的积累同样受光质处理的影响,除 4 个白光处理组间含量无显著变化外,蓝光与红光处理后隐丹参酮的含量随着光照强度的增加呈现下降趋势,如 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组中隐丹参酮含量是 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组的 2.66 倍(图 5-B)。光质处理后丹参酮 I 的含量被显著改变,但未呈现一定的规律性,白光处理组中 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组质量分数最高,达到了 0.53 mg/g,红光处理组中 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组

含量最高,达到了 0.36 mg/g,蓝光处理组中 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组质量分数最高,达到了 0.44 mg/g(图 5-C)。较低强度的光质处理更利于丹参酮 II_A 的积累,如 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组中丹参酮 II_A 的含量是 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组含量的 1.57 倍,100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组中丹参酮 II_A 的含量是 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理组含量的 2.08 倍,50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组中丹参酮 II_A 的含量是 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理组含量的 1.65 倍。相同光照强度条件下,白光处理更有利于丹参酮 II_A 的积累(图 5-D)。

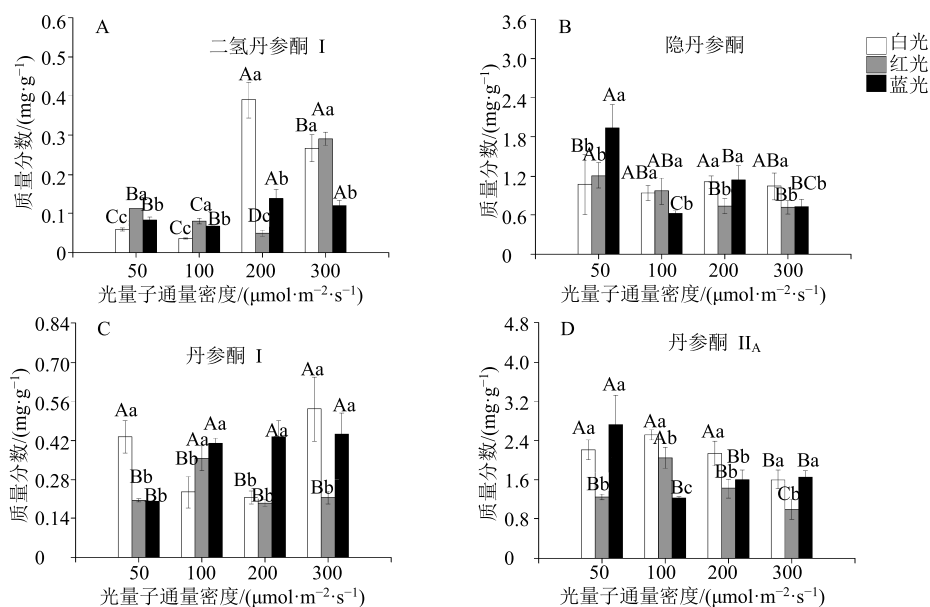


图 5 不同强度的红、蓝、白光中对丹参丹参酮类成分积累的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 6$)

Fig. 5 Effects of different intensities of red light and blue light on accumulation of tanshinones in *S. miltiorrhiza* ($\bar{x} \pm s, n = 6$)

4 讨论

综合本研究的结果,光质处理显著影响了丹参的形态建成和有效成分积累。不同的形态学指标对光质处理的响应不同,如 200、300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光处理可以提高根生物量,100、200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光处理则可以增加丹参一级侧根数,这些变化均有利于提高丹参药材的产量。丹参有效成分的组成复杂,结构多样,不同成分的含量在光质处理后呈现出不同的变化。与酚酸类成分相比,丹参酮类成分的积累对光质处理的响应更为敏感,如在 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照强度下,不同光质处理组中丹酚酸 A 的含量差异最大,白光处理中丹酚酸 A 的含量是红光处理组中的 2.10 倍,而 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 白光处理组中二氢丹参酮I的含量是相同强度红光处理组中的 10.00 倍。

光在植物形态建成过程中发挥着重要的调控作用^[11-12]。单色光可通过调节植物中光合系统(如 PSI、PSII)控制植物的生长^[13]。研究表明,蓝光可以作为植物生长的正向调控因子,促进植物形态建成及生长发育^[14]。如曹刚等^[15]研究发现相较于红光和白光,蓝光能显著促进黄瓜 *Cucumis sativus* L. 幼苗的生长,本研究得到了相似的结果,一定光照强度下,蓝光可以提高多个形态学指标的数值。该研究结果与苏俊等^[16]对烟草 *Nicotiana tabacum* L. 及梁宗锁等^[17]对丹参研究的结果有所不同,可能与选择的光源及光量子通量密度有关。同时,光还可以调控植物根系激素的合成或分布来影响根系的形态建成,如红光可以改变烟草根尖的生长素(IAA)浓度梯度,促进其根系的发育^[6],白光可以促进拟南芥 *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. 根尖油菜素内酯(BR)的积累从而增加其根

长^[18]。本研究中红光和蓝光处理显著改变了丹参的侧根数和侧根直径,是否是由于改变了根系中的激素水平或分布导致有待于深入探讨。

作为环境因子,光同样可以调控多种次生代谢物的积累,如 Jing 等^[19]利用不同的光质组合处理甜瓜 *Cucumis melo* L., 显著改变了甜瓜叶片中酚酸、类黄酮及鞣质的含量。Estell 等^[20]过滤掉太阳辐射中的紫外光后,明显提高了焦油灌木 *Flourensia cernua* DC. 中挥发性成分的积累。不同次生代谢物的生源合成对光质和光强的响应不同,如蓝光可以促进龙眼 *Dimocarpus longan* Lour. 胚性愈伤组织中表儿茶素的积累,却降低了该组织中芦丁的量^[21]。降低白光的光照强度,可以提高茶树 *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. Shuchazao 中羟基肉桂酸衍生物和茶树酯型儿茶素的含量,却抑制 β -葡萄糖苷和没食子酰基儿茶素的积累量^[22]。丹参酚酸类成分的生源途径是苯丙烷代谢网络的一部分,丹参酮类成分则通过萜类途径进行生源合成,二者具有不同的合成路径和合成关键酶。2 类成分的合成积累对光处理的不同响应,可能与其各自关键酶基因表达受光诱导的程度不同有关,其中涉及的具体光信号转导机制有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Lin T H, Hsieh C L. Pharmacological effects of *Salvia miltiorrhiza* (Danshen) on cerebral infarction [J]. *Chin Med*, 2010, 5(1): 22-27.
- [2] 杨 阳, 王 林, 张毕奎. 丹参中抑制炎症因子的活性成分抗动脉粥样硬化研究进展 [J]. *中南药学*, 2013, 4(11): 289-292.
- [3] Fang Z Y, Lin R, Yuan B X, *et al.* Tanshinone II_A downregulates the CD40 expression and decreases MMP-2 activity on atherosclerosis induced by high fatty diet in rabbit [J]. *J Ethnopharmacol*, 2008, 115(2): 217-222.
- [4] 邓爱平, 郭兰萍, 詹志来, 等. 丹参本草考证 [J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(22): 4274-4279.
- [5] Chen H J, Fu T Y, Yang S L, *et al.* FIN219/JAR1 and cryptochromel antagonize each other to modulate photomorphogenesis under blue light in *Arabidopsis* [J]. *PLoS Genet*, 2018, 14(3): 1-19.
- [6] Meng L, Song W, Liu S, *et al.* Light quality regulates lateral root development in tobacco seedlings by shifting auxin distributions [J]. *J Plant Growth Regul*, 2015, 34(3): 574-583.
- [7] An Z F, Zhou C J. Light induces lettuce seed germination through promoting nitric oxide production and phospholipase D-derived phosphatidic acid formation [J]. *S Afr J Bot*, 2017, 108: 416-422.
- [8] Lee S W, Seo J M, Lee M K, *et al.* Influence of different LED lamps on the production of phenolic compounds in common and Tartary buckwheat sprouts [J]. *Ind Crop Prod*, 2014, 54: 320-326.
- [9] Shiga T, Shoji K, Shimada H, *et al.* Effect of light quality on rosmarinic acid content and antioxidant activity of sweet basil, *Ocimum basilicum* L. [J]. *Plant Biotechnol*, 2009, 26(2): 255-259.
- [10] 张顺仓, 刘 岩, 沈 双, 等. 诱导子对丹参毛状根酚酸类和丹参酮类成分积累的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2011, 36(10): 1269-1274.
- [11] Quail P H. Photosensory perception and signalling in plant cells: New paradigms? [J]. *Curr Opin Cell Biol*, 2002, 14(2): 180-188.
- [12] Chen M, Chory J, Fankhauser C. Light signal transduction in higher plants [J]. *Annu Rev Genet*, 2004, 38: 87-117.
- [13] Yang L Y, Wang L T, Ma J H, *et al.* Effects of light quality on growth and development, photosynthetic characteristics and content of carbohydrates in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) plants [J]. *Photosynthetica*, 2016, 55(3): 467-477.
- [14] Bergstrand K J, Asp H, Schüssler H K. Development and acclimatisation of horticultural plants subjected to narrow-band lighting [J]. *Europ J Hort Sci*, 2014, 79(2): 49-51.
- [15] 曹 刚, 张国斌, 郁继华, 等. 不同光质 LED 光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(6): 1297-1034.
- [16] 苏 俊, 刘映雯, 杨 凡, 等. 不同光质对烟草组培苗生长及生理特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(6): 1206-1212.
- [17] 梁宗锁, 李 倩, 徐文晖. 不同光质对丹参生长及有效成分积累和相关酶活性的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2012, 37(14): 2055-2060.
- [18] Sakaguchi J, Watanabe Y. Light perception in aerial tissues enhances DWF4 accumulation in root tips and induces root growth [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 1808-1818.
- [19] Jing X, Wang H, Gong B, *et al.* Secondary and sucrose metabolism regulated by different light quality combinations involved in melon tolerance to powdery mildew [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2018, 124: 77-87.
- [20] Estell R E, Fredrickson E L, James D K. Effect of light intensity and wavelength on concentration of plant secondary metabolites in the leaves of *Flourensia cernua* [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2016, 65: 108-114.
- [21] Li H S, Lin Y L, Chen X H, *et al.* Effects of blue light on flavonoid accumulation linked to the expression of miR393, miR394 and miR395 in longan embryogenic calli [J]. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0191444
- [22] Lu Z W, Liu Y J, Zhao L, *et al.* Effect of low-intensity white light mediated de-etiolation on the biosynthesis of polyphenols in tea seedlings [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2014, 80: 328-336.