

DOI: 10.11929/j.swfu.202209036

引文格式: 朱梅彩, 刘子腾, 甘沛华, 等. 不同光质对3种松树种子萌发及幼苗生长与 *HY5* 基因表达的影响 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 44(0): 1-8.

不同光质对3种松树种子萌发及幼苗生长与 *HY5* 基因表达的影响

朱梅彩^{1,2} 刘子腾^{1,2} 甘沛华^{1,2} 李培玲^{1,2} 纵丹^{1,2} 何承忠^{1,2}

(1. 西南林业大学云南省高校林木遗传改良与繁育重点实验室, 云南昆明 650233; 2. 西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业和草原重点实验室, 云南昆明 650233)

摘要: 选取云南不同海拔的思茅松、云南松和高山松主要荒山造林树种为研究对象, 以红光、蓝光和白光为光源, 测定种子萌发、幼苗生长和生物量积累的相关参数, 并分析了幼苗下胚轴伸长与 *HY5* 表达的关系。结果表明: 与白光相比, 红光对3种松树种子萌发和幼苗生长均有促进作用, 其中思茅松分别提高了 23.70% 和 14.02%, 云南松提高了 11% 和 11.61%, 高山松提高了 9.37% 和 11.35%, 但降低了幼苗针叶叶绿素含量, 且对生物量积累无显著影响; 蓝光提高了3种松树幼苗的叶绿素含量与生物量蓄积, 其中生物量蓄积在思茅松、云南松和高山松中分别提高了 3.27%、11.72% 和 2.28%, 但在种子萌发及幼苗生长方面对云南松和高山松有抑制作用, 且对思茅松有促进作用; 红光和蓝光光照下, 3种松树幼苗下胚轴伸长与 *HY5* 相对表达量呈负相关。思茅松种子萌发及幼苗生长在不同光质下表现出红光 > 蓝光 > 白光, 而云南松和高山松则表现出红光 > 白光 > 蓝光。

关键词: 思茅松; 云南松; 高山松; 红蓝光; 种子萌发; 幼苗生长; *HY5*

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1914(2023)00-0001-08

Effects of different lights on seed germination, seedling growth and *HY5* gene expression of three pine species

Zhu Meicai^{1,2}, Liu Ziteng^{1,2}, Gan Peihua^{1,2}, Li Peiling^{1,2}, Zong Dan^{1,2}, He Chengzhong^{1,2}

(1. Southwest Forestry University, Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, State Forestry Administration Kunming Yunnan 650224; 2. Southwest Forestry University, Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China Kunming Yunnan 650224)

Abstract: In order to explore the regulatory mechanism of different light quality on seed germination and seedling growth of pine trees, the main afforestation trees of barren mountains at different altitudes in Yunnan, namely *Pinus kesiya* var. *Langbianensis*, *Pinus yunnanensis* and *Pinus densata* Mast., were selected as the research objects. The relevant parameters of three pine trees, seed germination, seedling growth and biomass accumulation were determined by using RL, BL and WL (CK) as the light sources. Furthermore, the relationship between hypocotyl elongation and *HY5* expression was analyzed. The results showed that RL can promote the

收稿日期: 2022-09-14; 修回日期: 2022-10-29

基金项目: 云南省应用基础研究计划重点项目 (2017FA011) 资助; 中央引导地方科技发展专项资金项目 (YDZX201953000002845) 资助; 云南省专家工作站建设项目 (202005AF150020) 资助。

第1作者: 朱梅彩 (1996—), 女, 硕士研究生。研究方向: 林木遗传育种。Email: 3344328962@qq.com。

通信作者: 何承忠 (1970—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 林木遗传改良与分子生物学。Email: hcz70@163.com。

seed germination (germination rate, germination potential, average germination time and germination index) and seedling growth (seedling height) of three pine trees, which increased by 23.70% and 14.02% for *P. kesiya*, 11% and 11.61% for *P. yunnanensis*, 9.37% and 11.35% for *P. densata*, respectively. However, the chlorophyll content of needles in three pine seedlings (*P. kesiya*, *P. yunnanensis* and *P. densata* decreased by 15.30% and 8.78%, respectively) was reduced under the RL, and RL had no significant effects on biomass accumulation. The chlorophyll content and biomass accumulation of three pine seedlings were increased under BL, which increased by 3.27%, 11.72% and 2.28% in *P. kesiya*, *P. yunnanensis* and *P. densata*, respectively. On the other hand, it inhibited the seed germination and seedling growth of *P. yunnanensis* and *P. densata*, but promoted the growth of *P. kesiya*. The hypocotyl elongation was negatively correlated with *HY5* expression in three pine seedlings under RL and BL light. The seed germination and seedling growth of *P. kesiya* showed RL > BL > WL under different light quality, while that of *P. yunnanensis* and *P. densata* showed RL > WL > BL.

Key words: *P. kesiya*; *P. yunnanensis*; *P. densata*; Red and blue light; Seed germination; Seedling growth; *HY5*

种子萌发和幼苗生长是森林更新的重要环节之一,而光作为一个重要的环境因子,从种子萌发到生命周期结束都起着重要作用^[1]。研究表明:光影响至少 930 种植物的种子萌发和幼苗生长,且对其中 600 多种有促进作用^[2];不同光质对不同种子萌发和幼苗生长的调控作用主要分为促进、抑制和无影响 3 类^[3-5]。Li 等^[6]研究表明,红光对油松 (*Pinus tabulaeformis*) 幼苗生长有促进作用; Alakärppä 等^[7]发现红光促进苏格兰松 (*Pinus sylvestris*) 幼苗芽伸长,表现出促进作用;樊小雪等^[8]研究表明经过蓝光处理的小白菜 (*Brassica campestris*) 能显著促进叶片细胞伸长,表现出促进作用,而红光表现出抑制作用;蓝光能抑制矮牵牛 (*Petunia hybrida*)、洋凤仙 (*Impatiens walleriana*) 和一品红 (*Euphorbia pulcherrima*) 的株高^[9];低红光对拟南芥 (*Arabidopsis thaliana*) 和万寿菊 (*Tagetes erecta*) 幼苗株高没有显著影响^[10]。这 3 种不同作用产生的影响机理主要是不同光质通过光感受器调节种子及幼苗生长,如拟南芥 (*Arabidopsis thaliana*) 光感受器有吸收红光及远红光的光敏色素 (PHYA-PHYE)、吸收蓝光的隐花色素 (CRY1, CRY2)、向光素 (PHOT1, PHOT2) 和感受紫外光的 UV-B^[4,11]。PHYA 和 PHYB 通过与某些转录因子 (TFs) (如 *HY5*、*PIF3*、*PIF4*、*PIF5*) 结合能够改变种子及幼苗的激素代谢途径^[11],从而影响着种子萌发和幼苗生长。其中, *HY5* 作为光信号传导过程中的核心调控因子,能介导光感受器反应以促进光形态建成^[4],进而影响着种子萌发及幼苗生长,如 *HY5* 通过参与光合色素^[12] (叶绿素、类胡

萝卜素) 和花青素^[13] 的积累能影响光形态建成^[14],调控下胚轴伸长^[15-16]。因此,本研究通过分析 *HY5* 表达以揭示不同光质影响种子萌发及幼苗生长机制。

松树是松科 (Pinaceae) 松属 (*Pinus*) 植物具有耐寒、耐旱、耐贫瘠等特点,但存在不易扦插、生长缓慢的问题^[17]。云南地处云贵高原,较大的海拔落差 (76.4 ~ 6740 m) 使它具有复杂多样的地理及气候环境,光照条件差异明显,影响着松树造林成活率及质量^[18]。思茅松 (*P. kesiya* var. *Langbianensis*)、云南松 (*P. yunnanensis*) 及高山松 (*P. densata*) 是云南省主要造林树种,当前对它们的种子萌发及幼苗生长研究主要聚焦于不同光照强度、落叶浸提物、温度、激素等方面^[19-20],但在不同光质对它们的种子萌发、幼苗生长及 *HY5* 基因表达的影响研究尚未开展。因此,本研究选取云南不同海拔的思茅松、云南松和高山松为研究对象,以红光 (RL)、蓝光 (BL) 和白光 (WL) 光源对其处理,分析不同光质对它们种子萌发和幼苗生长的影响,结合幼苗下胚轴伸长指标及幼苗生长过程中下胚轴伸长调控基因 *HY5* 表达量分析,揭示不同光质对 3 种松树种子萌发及幼苗生长的影响,从而为云南荒山造林“快速育种”的发展提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试的思茅松、云南松和高山松种子,分别采自于普洱市思茅松母树林、白马河林场云南松母树林及香格里拉高山松优良母树林。试验在

RXZ 气候箱（宁波江南仪器厂，中国）中进行，温度设定为 $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$ ，湿度 $(70 \pm 3) \%$ ，光质：RL、BL 和 WL，以 WL 为对照（CK），光强 $90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ，光周期 12 h/12 h（光/暗）。

1.2 试验方法

1.2.1 种子预处理

3 种松树种子预处理主要包括以下 3 个步骤：1) 挑选颗粒饱满、无病虫害、结构完整的松树种子各 100 粒；2) 用蒸馏水冲洗种子 3~4 次，再用 $30 \sim 40 ^\circ\text{C}$ 的温水浸泡 24 h；3) 0.5% 的高锰酸钾消毒，云南松和思茅松消毒 20 min，高山松消毒 30 min，再用无菌水分别冲洗 5~6 次。将预处理后的种子放入培养皿（含 2 层滤纸，并滴加 5 mL 蒸馏水润湿）中，将其放入不同光质的培养箱中进行萌发观察。同时将萌发记录后的种子及时转移到仅添加琼脂的无菌培养基上，培养基占培养盘 1/3 高度，再将培养盘放回相应光质的培养箱中继续培养观察，每个处理 3 次重复。

1.2.2 种子萌发及指标计算

以种子胚根顶破种壳为标准，每天观察记录种子的发芽数，直到种子萌发数连续 3 天低于供试种子总数的 1% 时^[21]，萌发实验观察结束。通过发芽率（GP）、发芽势（GF）、平均发芽速度（ T_{avg} ）和发芽指数（GI）5 个发芽指标考察红蓝光对 3 种松树种子萌发的影响。各指标采用公式（1）~（4）计算。

$$\text{GP} = n/N \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{GF} = a_{\text{max}}/N \times 100\% \quad (2)$$

$$T_{\text{avg}} = \sum(d \times a) / \sum a \quad (3)$$

$$\text{GI} = \sum\left(\frac{a}{d}\right) \quad (4)$$

式中： n 为萌发总数， N 为播种总数， n_{max} 为从萌发开始到高峰期的种子数， d 为播种后第几天， a 为第 d 天发芽数。

1.2.3 生长指标测量计算

种子萌发后继续生长 2 周，对幼苗的生长指标进行测定，精确到 1 mm。取同一时期的幼苗针叶 0.2g 研磨后，用 95% 的乙醇浸提，用分光光度计在波长为 665 nm 和 649 nm 下测量吸光值，根据公式（5）~（8）算出叶绿素 a 和叶绿素 b 的浓度（ C_a 、 C_b ），二者之和为叶绿素的浓度（ C_T ），叶绿素 a 和叶绿素 b 的浓度之比为（ C_B ）。同时根据苏仁峰等^[22]人对针叶的研究方法，进行幼苗鲜重（ W_F ）、干重（ W_D ）、干物率（ W_B ）的测定。

$$C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \quad (5)$$

$$C_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (6)$$

$$C_T = C_a + C_b \quad (7)$$

$$C_B = C_a/C_b \quad (8)$$

1.2.4 光响应基因 HY5 表达分析

使用 E.Z.N.A.@ Plant RNA kit (Omega, 美国) 试剂盒分别提取在 RL、BL 和 WL 照射下生长 8 d 的 3 种松树幼苗下胚轴组织总 RNA，参照 FastKing RT Kit (KR116) 反转录试剂盒 (北京天根生化科技有限公司，中国) 说明书的规范合成 cDNA。应用 Primer Premier 5.0 软件设计光响应基因 HY5 引物序列，以 ACT1、TUA 和 ACT2 分别作为思茅松、云南松和高山松的内参基因（表 1）。以 cDNA 为模板，Hieff UNICON Universal Blue qPCR SYBR Green Master Mix (YEASEN, 中国) 为荧光染料进行 RT-qPCR 试验，采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 法计算基因 HY5 的差异倍数。

表 1 RT-qPCR 分析所用的引物

Table 1 Primers used for RT-qPCR

基因 gene	引物序列 (5'-3') Primer sequence (5'-3')	引物来源 Primer sources
HY5	Forward TTGGGCAGACACTCTGTTC	—
	Reverse AGGAATGCAAGCAGGTCCAT	
ACT1	Forward AGAAATCCAGCCCCTTGTA	[23]
	Reverse CCCCATACCAACCATCACA	
TUA	Forward CAAACTTGGTCCCCTATCCTC	[24]
	Reverse CACAGAAAGCTGCTCATGGTAA	
ACT2	Forward ATTGCTGACCGTATGAGCA	[25]
	Reverse TGAATACTAGCTAGCCTCA	

1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理、统计和分析，用 Rotor-Gene Q Seris Software 分析 3 种松树 HY5 基因荧光定量数据，SPSS 25.0 进行单因素分析，Graphpad Pris 8.0.1 作图。

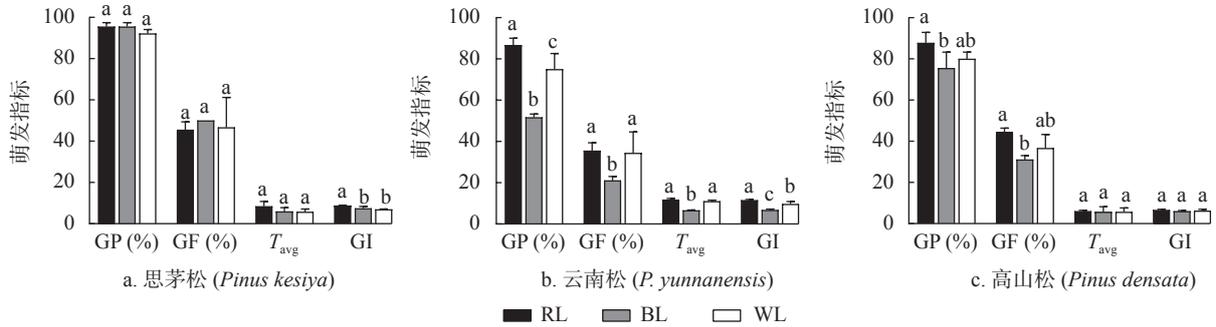
2 结果与分析

2.1 RL 和 BL 对 3 种松树种子萌发的影响

由图 1 a 可知，思茅松在 RL 下种子 GI (8.76) 显著高于 WL (6.98) ($P < 0.05$)，而 GP、GF 及 T_{avg} 在 RL 和 BL 下与 WL 相比均无显著性差异；图 1 b 可知，云南松在 RL 下 GP 及 GI (86.67%、11.54) 显著高于 WL (75%、9.74) ($P < 0.05$)，在 BL 下 GP、GF、 T_{avg} 及 GI 均有显著性差异 ($P <$

0.05), 分别降低了 31.11%、38.71%、40.37% 和 30.44%; 图 1 c 可知, 高山松在 RL 和 BL 处理下, 其 GP、GF、 T_{avg} 和 GI 均无显著性差异。以

上结果表明, 3 种松树在不同光照条件下的萌发指标略有差异, 但均表现为 RL 更有利于种子萌发。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

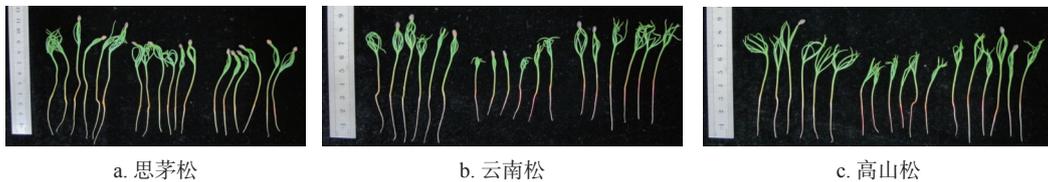
图 1 不同光质对 3 种松树种子萌发状况

Fig. 1 Different light quality on seed germination of three pine species

2.2 RL 和 BL 对 3 种松树幼苗生长的影响

不同光质下 3 种松树幼苗生长状况显示 (图 2), 幼苗在 RL 下表现出高生长, 在 BL 下低生长。为了解释这一现象, 研究测定了 RL 和 BL 下 3 种松树的生长指标并与 WL 下对比 (图 3), 结果表明: 在 RL 下, 思茅松其胚根长和胚根直径显著提高 ($P < 0.05$), 下胚轴长和下胚轴粗无显著性差异; 云南松胚轴长和下胚轴粗显著性增长 ($P < 0.05$), 胚根长和胚根直径无显

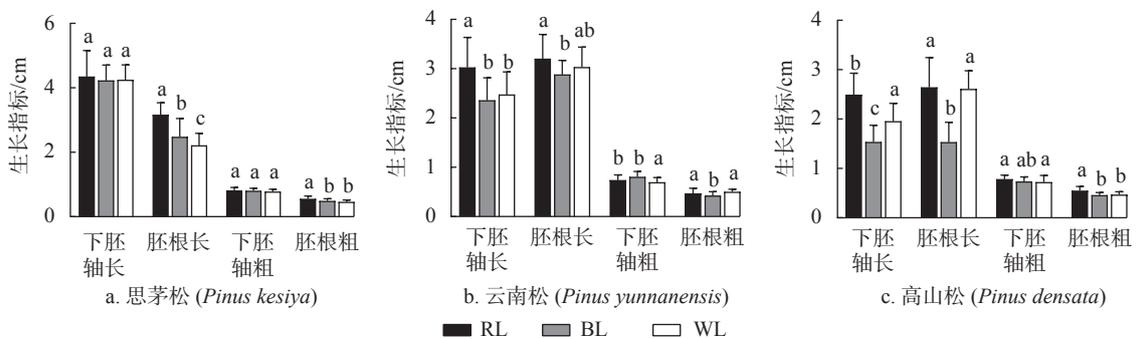
著性差异; 高山松在 RL 下胚轴长和胚根有显著增长 ($P < 0.05$), 胚根长和下胚轴粗无显著性差异。在 BL 下, 3 种松树下胚轴粗均有促进作用, 对思茅松的胚根长有促进作用, 但对高山松幼苗下胚轴长和胚根长有显著抑制作用 ($P < 0.05$)。综上所述, 经不同光质处理的 3 种松树幼苗形态指标具有差异, RL 对幼苗生长有促进作用, BL 抑制幼苗生长。



图中每 5 株幼苗为一种处理, 处理的光质从左到右依次为 RL、BL、WL

图 2 不同光质下 3 种松树幼苗的生长状况

Fig. 2 Growth of three pine seedlings under different light quality



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

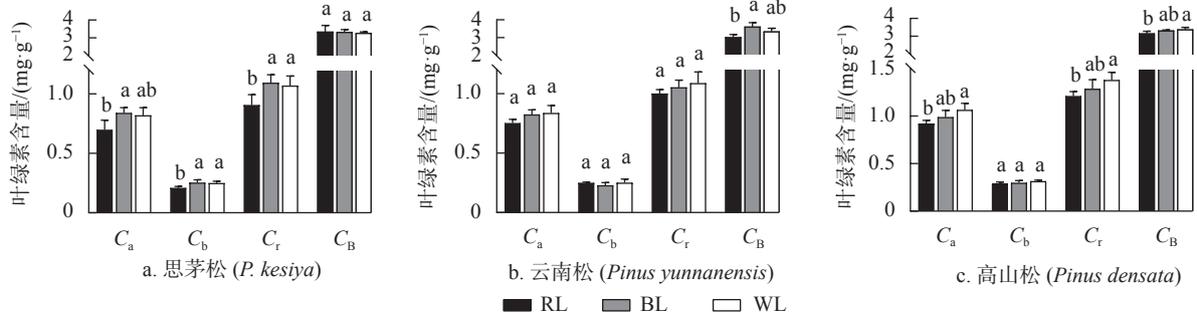
图 3 不同光质影响 3 种松树幼苗生长指标

Fig. 3 Different light qualities affected the growth indexes of three pine seedlings

2.3 RL和BL对3种松树叶绿素含量的影响

由图4可知，在RL下，除云南松和高山松C_b含量外，3种松树的C_a含量、C_T、C_B值均为最低，且在高山松中各指标的值与WL下具有显著差异(P < 0.05)；在BL下，3种松树的C_a含

量、C_b含量、C_T、C_B等测定值与WL下相比无显著性影响。以上结果表明：在RL下，3种松树幼苗C_a的含量均低于WL下；在BL下，思茅松略有提高，云南松和高山松降低，但无显著性差异。



不同小写字母表示差异显著(P < 0.05)。

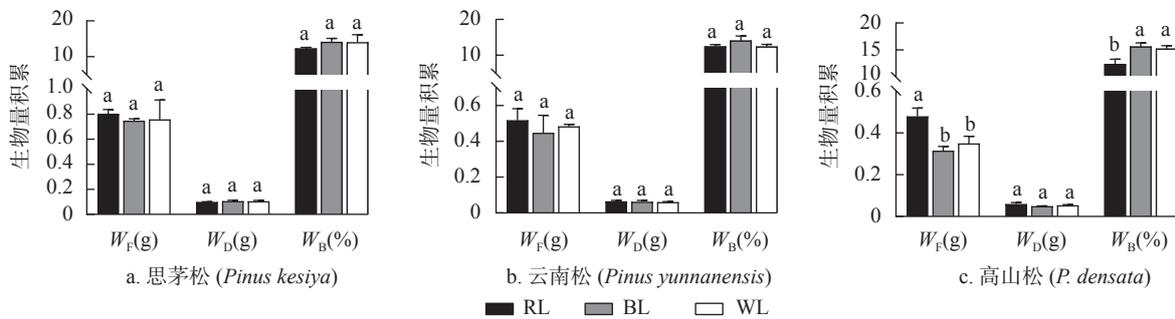
图4 不同光质下3种松树针叶叶绿素含量

Fig. 4 Chlorophyll content of three pine conifers under different light qualities

2.4 RL和BL对3种松树质量的影响

由图5可知，在RL下，3种松树幼苗W_F均高于WL下，而W_B均有降低，且高山松有显著性差异(P < 0.05)；在RL或BL下，3种松树

W_D与WL下相比均无显著差异。综上所述，3种松树W_F表现为RL > WL > BL，W_B表现为BL > WL > RL，说明BL能增加松树幼苗生物量蓄积。



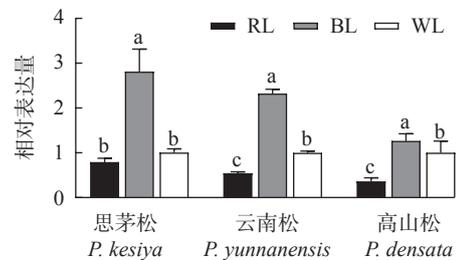
不同小写字母表示差异显著(P < 0.05)。

图5 不同光质下3种松树质量状况

Fig. 5 Quality status of three pine trees under different light quality

2.5 RL和BL下3种松树幼苗下胚轴HY5的表达差异性分析

由图6可知，与WL照射对比，3种松树HY5表达在RL和BL下响应一致，在RL下表达量呈下降趋势，分别降低了0.21、0.46和0.64倍；在BL下，3种松树HY5表达量高于WL的2.81倍、2.32倍和1.26倍，且差异显著(P < 0.05)。综上所述，HY5在RL下的相对表达量低，在BL下的相对表达量高，且在不同的树种间存在差异。



不同小写字母表示差异显著(P < 0.05)。

图6 RL和BL下HY5基因在3种松树幼苗下胚轴中的相对表达量

Fig. 6 Relative expression of HY5 genes under RL and BL in the hypocotyls of 3 pine seedlings

3 结论与讨论

3.1 RL 和 BL 对 3 种松树种子萌发调控作用具有差异性

RL 对 3 种松树种子萌发都表现出促进作用,在不同的松树间略有差异。光质对思茅松种子 GI 从大到小为 RL > BL > WL, 但 RL 和 BL 对思茅松种子 GP 无显著性, 而对云南松和高山松的影响从大到小的光质为 RL > WL > BL, 这与苏格兰松 (*P. sylvestris*)^[26]、香果树 (*Emmenopterys henryi*)^[27]、黄瓜 (*Cucumis sativus*)^[28]、萝卜芽 (radish sprouts) 苗菜^[29] 在 RL 处理下的种子萌发规律一致。Alakärppä 等^[30] 人在苏格兰松研究中证明 ZTL 和转录因子 HY5 在 RL 和 BL 的照射下的表达存在差异, 其中在 RL 中 ZTL 的表达量显著高于在 BL 下的, 还进一步证明了 PHYN 参与了光反应, 而 CRY2 参与了庇荫反应。BL 能抑制云南松和高山松的种子萌发, 与 WL 处理相比, GP、GF、 T_{avg} 和 GI 数也相应降低。BL 能抑制云南松和高山松种子萌发, 这与 BL 下香果树^[27] 种子萌发的结果一致。RL 和 BL 对 3 种松树的生长调控具有差异性且 3 种松树的光受体基因 HY5 表达具有差异。这与 RL 对绿豆 (*Vigna radiata*) 种子^[31] 发芽无影响, 但 RL 对小白菜^[8] 的生长有抑制作用类似。以上结果表明, RL 促进种子萌发, 这可能是因为经过 RL 照射后, 光受体激活赤霉素和细胞分裂素等一些相关基因的合成, 从而导致种子萌发^[32]。

3.2 RL 和 BL 对 3 种松树幼苗生长形态的影响存在差异

RL 能促进 3 种松树幼苗生长, BL 较为显著的抑制云南松和高山松幼苗生长。对于思茅松, RL 能促进其下胚轴伸长和下胚轴粗, 但差异性不显著; 对于胚根长, RL 具有显著促进作用, 此外, RL 和 BL 处理下均能促进云南松和高山松幼苗生长, 且 RL 处理下的幼苗株高最高, 两种光质的促进效果具体可表现为, RL 处理下促进幼苗高生长, BL 促进幼苗粗生长, 这一特征在蝴蝶兰 (*Phalaenopsis*)^[33] 和红叶石楠 (*Photinia fraseri*)^[34] 中也存在。本试验中的 3 种松树在 RL 下都表现出高生长的状况。RL 和 BL 处理下, 3 种松树幼苗生长形态存在差异的原因可能有: (1) RL 和 BL 对营养物质合成积累存在差异^[35], 导致 3 种松树幼苗高生长的差异性; (2) RL 或 BL 处理

后, 植株幼苗对光的适应反应不同引起它们对光照需求差异, 导致它们调节自身生长速度以应对光的刺激^[28], 从而引起生长差异; (3) 不同树种生长相关的基因表达具有差异性, 如 *PtKAO2* 基因在油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和拟南芥中对于植物的生长发育就表现出显著差异^[36], 进一步引起表型差异。

3.3 RL 和 BL 对 3 种松树幼苗光合色素和生物量蓄积的影响

光是植物进行光合作用的重要因素之一, 经过不同光质照射会影响植物光合色素的蓄积^[26]。在本试验中 BL 对 3 种松树叶绿素的积累影响趋势一致, 均表现为促进作用。这一作用在思茅松和云南松的表现比高山松尤为显著; 而 RL 对 3 种松树叶绿素的积累均表现出相反的作用。已有研究表明, 虽然裸子植物具有在黑暗中合成叶绿素的能力^[37], 有无光照并不影响其叶绿素的合成, 但不同光质照射会影响相关基因的表达活性, 进而影响叶绿素的含量^[7], 这可能是 BL 与 RL 对 3 种松树叶绿素积累影响不同的原因之一。本研究与苏格兰松^[26] 在光质研究中结果存在差异, 这可能是不同种源地区的海拔高度高度下不同植物对光质的敏感性差异导致的; 也有可能是由于光照强度引起的, 但这还需要进一步进行研究。

此外, 生物量的积累受环境中光照和水分的影响, Yu^[38] 研究表明, 光质对生物量的积累有着重要的调节作用。RL 和 BL 处理下, 思茅松和云南松的 W_D 、 W_F 及 W_B 均无显著性差异, 表明 RL 和 BL 对思茅松和云南松幼苗生长生物量的积累不敏感, RL 照射的思茅松和高山松有显著差异, 这可能与光合作用能力有关, 与 WL 相比, BL 照射提高 3 种松树 W_B 的积累, 这与桉树 (*Eucalyptus robusta*)^[39] 的结果一致。

3.4 RL 和 BL 调节 3 种松树幼苗下胚轴 HY5 的表达差异

HY5 是光形态建成中的核心因子, 起负调控作用^[40]。在本研究中与对照 (WL) 相比, 在 RL 下生长的思茅松、云南松和高山松 HY5 的相对表达量都有所降低, 在 BL 下其相对表达量显著提高, 这与 Frede 等^[41] 人的研究结果一致, 其表现在 BL 下 HY5 和生物钟相关基因 (*CCA1*) 相互作用, 表现出 BL 下的转录水平相对提高, 从而致使小白菜在蓝光下表现出矮化状态。植物的生长主要表现在下胚轴的伸长, 前人研究证明 HY5 能

与 *YUC9*、*DELLA*、*DWF4* 等相关基因相互作用, 从而影响生长素、赤霉素及油菜素内酯的合成, 进而调控植物下胚轴伸长^[40]。*HY5* 在色素的合成方面依然有重要作用, 能够参与叶绿素的合成代谢, 前人在白菜^[39]的研究中发现 *HY5* 与 *CCD4* 结合, 进而影响光合色素的合成。在本试验中, 在 BL 下生长的幼苗, 表现出叶绿素含量提高, 这与 Cheminant 等^[42]人在杨树中的研究结果保持一致, 这表明: 在松树中也可能存在 *HY5* 与 *WRKY* 和 *ERF* 转录因子的结合, 影响叶绿素在 BL 下的合成。而 *HY5* 在 3 种松树中的相对表达量存在差异, 这可能是 3 种松树间海拔不同, 而导致相关基因适应和退化^[43-44]存在差异, 而 *HY5* 是一个核心因子, 它能够介导光信号调控和激素信号传递, 也可能是 *HY5* 在不同的树种中的光受体活性略有差异^[7, 45], 因此在 3 种松树中对 RL 和 BL 的敏感性不一。综上所述, 在云南省的 3 种松树育苗及培育的生产活动中, 可以施加红光照射, 能增加种子的发芽率及提高幼苗下胚轴的生长, 为后期的荒山造林提供大量幼苗。

[参 考 文 献]

- [1] 张靖楠, 饶孜逸, 肖云华, 等. 红蓝单色光对直播稻芽期耐冷性及秧苗素质的影响 [J/OL]. 分子植物育种, 2022: 1-12. (2-02-26).
- [2] 许建新, 钱塘璜, 冯志坚, 等. 深圳坝光精细化工园区植物资源及植被类型分析 [J]. 福建林业科技, 2012, 39(1): 108-111.
- [3] Ecker J R. The ethylene signal transduction pathway in plants [J]. *Science*, 1995, 268(5211): 667-675.
- [4] Guo S, Liu X, Ai W, et al. Development of an improved ground-based prototype of space plant-growing facility [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(5): 736-741.
- [5] 宋雨函, 张锐. 高等植物下胚轴伸长的调控机制 [J]. 生命的化学, 2021, 41(6): 1116-1125.
- [6] Li W, Liu S W, Ma J J, et al. Gibberellin signaling is required for far-red light-induced shoot elongation in *Pinus tabulaeformis* seedlings [J]. *Plant Physiology*, 2020, 182(1): 658-668.
- [7] Alakärppä E, Taulavuori E, Valledor L, et al. Early growth of Scots pine seedlings is affected by seed origin and light quality [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2019, 237: 120-128.
- [8] 樊小雪, 高文瑞, 孙艳军, 等. 不同光质对小白菜叶片发育和光合作用的影响 [J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(4): 562-567.
- [9] Fletcher J M, Tatsiopoulou A, Mpezamihigo M, et al. Far-red light filtering by plastic film, greenhouse-cladding materials: effects on growth and flowering in *Petunia* and *Impatiens* [J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2005, 80(3): 303-306.
- [10] Heo J, Lee C, Chakrabarty D, et al. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromatic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED) [J]. *Plant Growth Regulation*, 2002, 38(3): 225-230.
- [11] Zdarska M, Dobisová T, Gelová Z, et al. Illuminating light, cytokinin, and ethylene signalling crosstalk in plant development [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(16): 4913-4931.
- [12] Maxwell B B, Andersson C R, Poole D S, et al. *HY5*, circadian clock-associated 1, and a cis-element, *DET1* dark response element, mediate *DET1* regulation of chlorophyll a/b-binding protein 2 expression [J]. *Plant Physiology*, 2003, 133(4): 1565-1577.
- [13] Qiu Z K, Wang H J, Li D J, et al. Identification of candidate *HY5*-dependent and-independent regulators of anthocyanin biosynthesis in tomato [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2019, 60(3): 643-656.
- [14] Bhagat P K, Verma D, Sharma D, et al. *HY5* and *ABI5* transcription factors physically interact to fine tune light and ABA signaling in *Arabidopsis* [J]. *Plant Molecular Biology*, 2021, 107(1): 117-127.
- [15] 张慧. 油菜素内酯和 *HY5* 在低比例红光/远红光下诱导赤霉素调控番茄叶茎伸长的机制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [16] Gangappa S N, Botto J F. The multifaceted roles of *HY5* in plant growth and development [J]. *Molecular Plant*, 2016, 9(10): 1353-1365.
- [17] 王瑜, 车凤仙, 方芳, 等. 氮、磷叶面施肥对云南松苗木萌蘖的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 41-48.
- [18] 王世杰, 陈友平, 陈峰, 等. 滇西不同海拔云南松径向生长对气候水文要素的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3557-3566.
- [19] 管国伟, 廖周瑜, 陈鹏, 等. 云南松凋落叶浸提液对其种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 种子, 2020, 39(3): 20-23.
- [20] 郭聪聪, 沈永宝, 史锋厚. 白皮松种子萌发过程中呼吸代谢和内源激素对温度变化的响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 25-36.

- [21] 易弘韬, 方慧鑫, 黄则月. 3种植物生长调节剂处理对细叶云南松种子萌发后芽苗生理的影响 [J]. 现代农业科技, 2017(15): 132-134.
- [22] 苏仁峰, 易敏, 张露, 等. 针叶性状与湿地松产脂能力关系 [J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(4): 910-918.
- [23] Wan L C, Zhang H Y, Lu S F, et al. Transcriptome-wide identification and characterization of miRNAs from *Pinus densata* [J]. BMC Genomics, 2012, 13(1): 132.
- [24] Zhu P H, Ma Y Y, Zhu L Z, et al. Selection of suitable reference genes in *Pinus massoniana* Lamb. under different abiotic stresses for qPCR normalization [J]. Forests, 2019, 10(8): 632.
- [25] 王毅, 周旭, 毕玮, 等. 思茅松 HDR 基因全长 cDNA 克隆与序列分析 [J]. 广西植物, 2015, 35(5): 721-727.
- [26] Pashkovskiy P, Kreslavski V D, Ivanov Y, et al. Influence of light of different spectral compositions on the growth, photosynthesis, and expression of light-dependent genes of Scots pine seedlings [J]. Cells, 2021, 10(12): 3284.
- [27] 肖志鹏, 殷崇敏, 郭连金, 等. 光质对香果树种子萌发及幼苗生长影响的研究 [J]. 植物研究, 2020, 40(2): 189-195.
- [28] 郭奕. 不同光质 LED 光源组合对番茄及黄瓜育苗效果的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [29] 余婷. 光环境对豌豆、萝卜芽苗菜生长及品质的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [30] Alakärppä E, Taulavuori E, Valledor L, et al. Early growth of Scots pine seedlings is affected by seed origin and light quality [J]. Journal of Plant Physiology, 2019, 237: 120-128.
- [31] 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.
- [32] 张敏, 朱教君, 闫巧玲. 光对种子萌发的影响机理研究进展 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(8): 899-908.
- [33] 任桂萍, 王小菁, 朱根发. 不同光质的 LED 对蝴蝶兰组织培养增殖及生根的影响 [J]. 植物学报, 2016, 51(1): 81-88.
- [34] 王政, 刘伟超, 何松林, 等. LED 红蓝光质比对红叶石楠试管苗生长和抗氧化酶活性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 49-56.
- [35] 刘青青, 黄智军, 郭思, 等. 光质对杉木种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2361-2368.
- [36] Li W, Liu S W, Ma J J, et al. Gibberellin signaling is required for far-red light-induced shoot elongation in *Pinus tabulaeformis* seedlings [J]. Plant Physiology, 2020, 182(1): 658-668.
- [37] Ranade S S, Delhomme N, García-Gil M R. Global gene expression analysis in etiolated and de-etiolated seedlings in conifers [J]. PLoS One, 2019, 14(7): e0219272.
- [38] Yu W W, Liu Y, Song L L, et al. Effect of differential light quality on morphology, photosynthesis, and antioxidant enzyme activity in *Camptotheca acuminata* seedlings [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2017, 36(1): 148-160.
- [39] 张亚如, 陈光彩, 叶春海, 等. LED 红蓝光质对桉树组培苗生长及生理特性的影响 [J]. 贵州农业科学, 2021, 49(4): 97-104.
- [40] Gangappa S N, Botto J F. The multifaceted roles of HY5 in plant growth and development [J]. Molecular Plant, 2016, 9(10): 1353-1365.
- [41] Frede K, Schreiner M, Zrenner R, et al. Carotenoid biosynthesis of pak choi (*Brassica rapa* ssp. *chinensis*) sprouts grown under different light-emitting diodes during the diurnal course [J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2018, 17(10): 1289-1300.
- [42] 刘伟. 不同海拔的光质分布与金冠苹果果实品质的相关性研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [43] Cheminant S, Wild M, Bouvier F, et al. DELLAs regulate chlorophyll and carotenoid biosynthesis to prevent photooxidative damage during seedling deetiolation in *Arabidopsis* [J]. The Plant Cell, 2011, 23(5): 1849-1860.
- [44] Johansen T J, Mølmann J A, Bengtsson G B, et al. Temperature and light conditions at different latitudes affect sensory quality of broccoli florets (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(11): 3500-3508.
- [45] Rohde A, Ruttink T, Hostyn V, et al. Gene expression during the induction, maintenance, and release of dormancy in apical buds of poplar [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(15/16): 4047-4060. 已终审: 2023.3. 22

(责任编辑 冯雪)

