

光质对香果树种子萌发及幼苗生长影响的研究

肖志鹏<sup>1,2</sup> 殷崇敏<sup>1</sup> 郭连金<sup>1\*</sup> 吴原榕<sup>1</sup> 胡金平<sup>1</sup> 刘艳艳<sup>1</sup> 钟友春<sup>1</sup> 薛苹苹<sup>1</sup>

(1. 上饶师范学院生命科学学院, 上饶 334001; 2. 中南林业科技大学风景园林学院, 长沙 410004)

**摘要** 研究了光质对香果树种子萌发及幼苗生长的影响。设置 940 nm(远红光)、850 nm(远红光)、730 nm(远红光)、630 nm(红光)、610 nm(橙光)、590 nm(黄光)、525 nm(绿光)、460 nm(蓝光) 8 个光质处理及自然光对照, 研究其种子萌发对光质的响应。设置 730、630、610、590、525 和 460 nm 六个光质处理, 研究其幼苗生长对光质的响应。结果表明 940 及 850 nm 下无种子萌发, 730 nm 处理下萌发率仅为 1.33%。525 nm 下香果树种子萌发率显著高于其他处理及自然光对照, 自然光下与 630、590 nm 下香果树种子最终萌发率无显著差异。可见光中 460 及 610 nm 下香果树种子最终萌发率显著低于其他处理。实验 120 d 时香果树幼苗干重为 590 nm > 630 nm > 610 nm > 730 nm > 525 nm > 460 nm。120 d 时, 590 nm 下香果树幼苗干重显著高于其他光质处理。香果树幼苗的相对质量增长速率, 在 30~90 d 间 630 nm 显著高于其他处理, 在 90~120 d 间 590 nm 下显著高于其他处理, 在 120~150 及 150~180 d 间 460 nm 下显著高于其他处理。实验 30 d 时, 根重比在 0.17~0.25, 处理间无显著差异, 150 d 时 460 nm 下根重比显著高于其他处理。实验 30 d 时, 730 nm 下茎重比显著高于其他处理。实验 30 d 时, 各处理香果树叶重比在 0.53~0.68, 处理间无显著差异。

**关键词** 光质; 香果树; 种子萌发; 幼苗生长; 珍稀濒危植物

**中图分类号** Q949.781.1 **文献标志码** A **doi** 10.7525/j.issn.1673-5102.2020.02.004

Effect of Light Quality on Seed Germination and Seedling Growth of *Emmenopterys henryi*

XIAO Zhi-Peng<sup>1,2</sup> YIN Chong-Min<sup>1</sup> GUO Lian-Jin<sup>1\*</sup> WU Yuan-Rong<sup>1</sup> HU Jin-Ping<sup>1</sup>  
LIU Yan-Yan<sup>1</sup> ZHONG You-Chun<sup>1</sup> XUE Ping-Ping<sup>1</sup>

(1. College of Life Science, Shangrao Normal University, Shangrao 334001; 2. College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

**Abstract** We studied the effect of light quality on seed germination and seedling growth of the endangered plant *Emmenopterys henryi* by setting eight light quality treatments including the 940 nm(far red), 850 nm(far red), 730 nm(far red), 630 nm(red), 610 nm(orange), 590 nm(yellow), 525 nm(green), 460 nm(blue) and a nature light as CK, and setting six light quality treatment include 730, 630, 610, 590, 525 and 460 nm, respectively. The results showed that no seed germinate under 940 and 850 nm, and only 1.33% seeds germinate under 730 nm. The germination percent under 525 nm was significantly higher than that under other treatments include natural light control, and there was no significant difference between the final germination percent under natural light and that under 610 and 590 nm. The final germination rate under 460 and 610 nm was significantly lower than that of other treatments. At 120 d, the dry weight of the seedlings was 590 nm > 630 nm > 610 nm > 730 nm > 525 nm > 460 nm. At 120 d, the dry weight of the seedlings under 590 nm was

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860200, 31360145); 江西省教育厅科技研究一般项目(GJJ161054)

第一作者简介: 肖志鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究植物生态学及风景园林学。

\* 通信作者 E-mail: guolianjin@163.com

收稿日期: 2019-06-10

Foundation item: National natural science foundation of China(31860200, 31360145); General Project of Science and Technology Research of Jiangxi Provincial Department of Education(GJJ161054)

First author introduction: XIAO Zhi-Peng(1995—), male, master, mainly studying plant ecology and landscape architecture.

\* Corresponding author E-mail: guolianjin@163.com

Received date: 2019-06-10

significantly higher than that under other light treatments. The relative growth rate under 630 nm was significantly higher than that of other treatments between 30 – 90 d , and that under 590 nm was significantly higher than that of other treatments between 90 – 120 d. It was significantly higher than other treatments at 460 nm between 120 – 150 and 150 – 180 d. Root mass ratio was between 0. 17 – 0. 25 on the 30th day of treatment , and with no significant difference between treatments. Root mass ratio under 460 nm was significantly higher than that of other treatments on the 30th day of treatment. At 30 d , stem mass ratio under 730 nm was significantly higher than that of other treatments. Leaf mass ratio in each treatment was between 0. 53 – 0. 68 on the 30th day of treatment , and there was no significant difference between the treatments.

**Key words** light quality *Emmenopterys henryi* seed germination seedling growth rare and endangered plants

濒危植物香果树(*Emmenopterys henryi*)是我国特有的单属种植物,国家Ⅱ级重点保护植物,香果树为第四季冰川期孑遗种,对茜草科(Rubiaceae)系统发育、形态演化及中国植物地理区系的研究有重要作用<sup>[1]</sup>。用作药材,有温中和胃、降逆止呕的功效,药理活性研究表明其粗提物的正丁醇部位有一定的抗炎和抗肿瘤活性<sup>[2]</sup>。目前,多地(武夷山、大盘山、凤阳山、九龙山、松阳箬寮)香果树种群均表现为衰退种群<sup>[3-5]</sup>,亟待采取措施进行保护与恢复。

濒危植物走向濒危的根本原因在于生殖力、存活力、适应力低下等内在因素,生活史中存在脆弱环节是导致植物濒危的内在因素之一<sup>[6]</sup>。种子萌发及幼苗建植是许多植物个体生活史中最易受环境影响的环节。以往对香果树的研究表明,香果树土壤种子库中,约80%的种子在最初4个月中死亡,萌发当年10月份,存活幼苗数量仅占幼苗总数的3.86%,即种子向幼苗方向转化阶段,幼苗生长阶段的高死亡率限制了香果树种群的更新<sup>[7]</sup>。不同生境中光质组成不同,光质是一些植物种子萌发的关键<sup>[8]</sup>。香果树原生境中由树冠下至林窗,红光逐渐增多,香果树的种子萌发率及幼苗数量呈现出逐渐增加的趋势<sup>[9]</sup>,这种现象可能与光质有关。香果树种子产量大<sup>[10]</sup>,重量小(千粒重0.30~0.51 g)<sup>[11]</sup>,具翅,母树高达15 m<sup>[12]</sup>,有较强的扩散能力,能散落在光质不同的微生境中,同时,香果树种子小,营养物质储备少,外界环境对香果树种子萌发及幼苗生长有重要影响,因此,光质对香果树种子萌发及幼苗生长可能具有关键作用。

目前,环境因子影响香果树种子萌发及幼苗生长主要集中在光强及温度因子的响应<sup>[13-14]</sup>,光质影响香果树种子萌发及幼苗生长尚未有报道,为此,本文研究了不同光质对香果树种子萌发和

幼苗生长的影响,以期了解香果树种子萌发及幼苗生长对不同光质的响应,为其种群恢复与保护提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

种子萌发中,供试种子于2016年10月采自福建省武夷山国家级自然保护区(27°33'~27°54'N,117°27'~117°51'E),所得香果树种子千粒重为0.670 94±0.038 36 g,变异系数5.716 6%。

幼苗生长实验中,供试幼苗通过供试种子播种育苗,2018年4月播种,于自然光下培育,2018年6月初选取一致大小苗(苗龄60 d,苗高1.4±0.3 cm,地径1.3±0.2 mm)作为供试幼苗进行实验。

种子萌发及幼苗生长实验,光源均采用LED灯,所有光源均由东莞市鹏远光电科技有限公司提供。

### 1.2 实验方法

种子萌发实验及幼苗生长实验均在室内进行,对花盆进行严格遮光,仅使实验光源照射供试种子及幼苗;所有实验花盆规格一致,每盆置入1.0 kg香果树种群原生境土壤;实验前土壤充分消毒;花盆托盘内注入蒸馏水,靠渗透作用保持盆内土壤湿润,以避免浇水对遮光的影响。

种子萌发实验于2018年4月初开始,设置940、850、730、630、610、590、525和460 nm 8个光质处理,并设置自然光处理对照,共计9种处理。每个处理3次重复,每个重复50粒种子,匀置土壤表面。实验开始后每日观察(于夜间进行,光源为白色LED灯,光照强度约200 lux的弱光,每次观察控制在3 min内,预实验中结果表明此种情况下香果树种子未发现萌发。)种子是否露白,种子露白后每3 d观察一次种子萌发情况。种子露白即视为萌发,直至萌发率有6 d不再变化时实验结束,计算实验结束时的种子萌发率。

幼苗生长实验于 2018 年 6 月初开始 ,设置 730、630、610、590、525 和 460 nm 共计 6 个处理。每个处理栽植一致大小的幼苗 30 株。实验开始第 30 60 90 120 150 和 180 天时 ,从中随机选取 3 棵幼苗 ,烘干至恒重 ,利用电子天平( FA2204B )测定单株幼苗干重及幼苗根、茎、叶干重。

1.3 数据处理方法

萌发率( Germination percent ) = 萌发种子数/种子总数 × 100% ( 1 )

根重比( Root mass ratio ,RMR ) = 全株根干重/全株植株干重 ( 2 )

茎重比( Stem mass ratio ,SMR ) = 全株茎干重/全株植株干重 ( 3 )

叶重比( Leaf mass ratio ,LMR ) = 全株叶干重/全株植株干重 ( 4 )

相对质量增长速率( Relative grow rate ,RGR ) = 测定期间前后两次植株生物量自然对数的增加量与时间的比 ( 5 )

采用方差分析( ANOVA )和 LSD 多重检验 (  $P < 0.05$  )方法对不同处理下的幼苗生长情况参数进行分析 ,SPSS 19.0 进行显著性分析( SPSS-Inc. Chicago ,Illinois ,USA )。Origin 8.5 作图。

2 实验结果

2.1 光质对香果树种子萌发的影响

实验开始第 5 天发现种子露白 ,即 5 天时种子萌发 ,实验开始第 11 天后无种子萌发 ,故第 11 天时的萌发率为最终萌发率。

图 1 为不同光质下香果树种子的萌发率。由图 1 知 ,实验开始 11 d 时 940 及 850 nm 下无种子萌发 ,730 nm 处理下萌发率仅为 1.33%。525 nm 下香果树种子萌发率显著高于其他处理(  $P < 0.05$  ) ,自然光下与 630、590 nm 下香果树种子最终萌发率无显著差异(  $P > 0.05$  )。可见光光谱范围内 460 及 610 nm 下香果树种子最终萌发率显著低于其他处理(  $P < 0.05$  )。

2.2 光质对香果树幼苗干物质积累的影响

图 2A 为光质对单株香果树幼苗干重的影响。实验 120 ~ 150 d 气温降低 ,部分叶片脱落 ,120 d 时未受降温影响。

由图 2A 知 ,实验期间 ,590、630 和 610 nm 下香果树幼苗干重始终高于 730、525 和 460 nm 处理下。实验中观测到在实验开始 120 d 后 ,香果树幼苗开始落叶。120 d 时 ,香果树幼苗干重 590 nm >

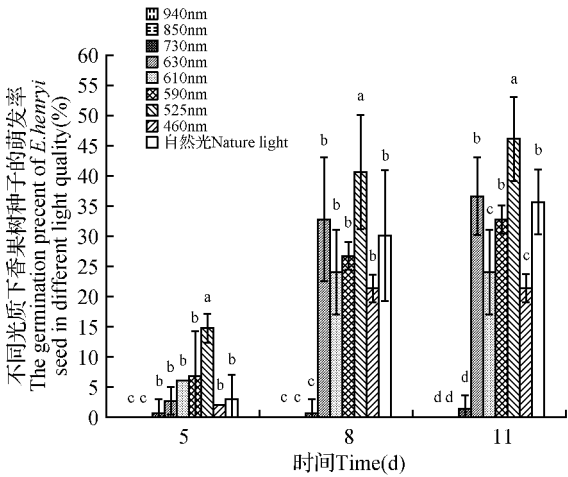


图 1 光质对香果树种子萌发的影响 同一时间香果树种子萌发率标注有不同字母 ,表示萌发率之间在 0.05 水平差异显著。

Fig.1 Effects of light quality on the seed germination of E. henryi Different letters marked on the seed germination of E. henryi at the same time show a significant difference at 0.05 level.

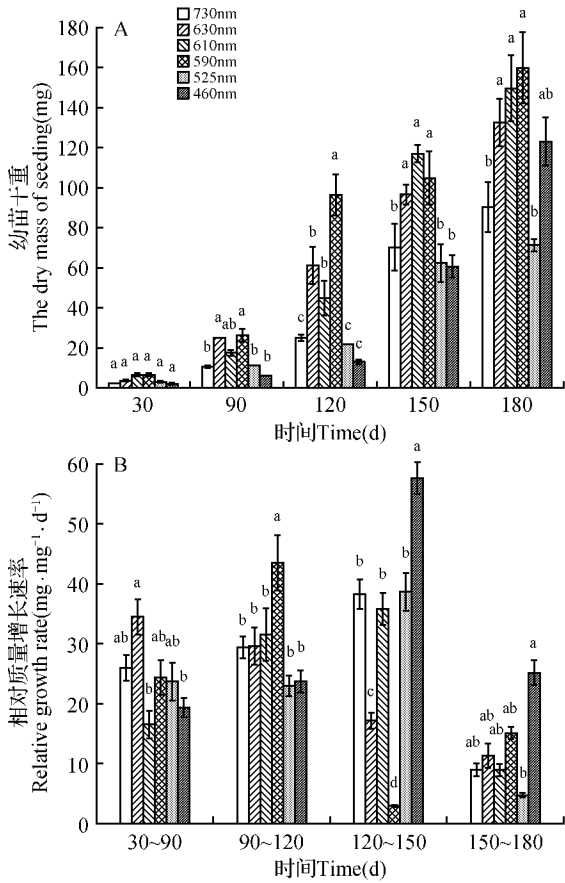
630 nm > 610 nm > 730 nm > 525 nm > 460 nm ,120 d 时 ,590 nm 下香果树幼苗干重显著高于其他光质处理(  $P < 0.05$  ) ,为  $96.7 \pm 9.7$  mg ,630 nm 下幼苗干重仅次于 590 nm 处理下 ,仅为 590 nm 处理下的 63.06% ,460 nm 下干重仅为 590 nm 下干重 13.34%。实验 180 d 时实验结束 ,处理 180 d 时 ,香果树幼苗干重为 590 nm > 610 nm > 630 nm > 460 nm > 730 nm > 525 nm ,此时 460 nm 下香果树幼苗干重达 590 nm 下的 76.77% ,并显著高于 730 及 525 nm(  $P < 0.05$  )。

图 2B 为光质对单株香果树幼苗相对质量增长速率的影响。由图 2B 知 ,30 ~ 90 d 间 630 nm 下相对质量增长速率显著高于其他处理(  $P < 0.05$  ) ,90 ~ 120 d 间 590 nm 下相对质量增长速率显著高于其他处理(  $P < 0.05$  ) ;120 ~ 150 d 间及 150 ~ 180 d 间 ,460 nm 下相对质量增长速率显著高于其他处理(  $P < 0.05$  )。

2.3 光质对光合产物分配的影响

图 3 为光质对香果树幼苗光合产物分配的影响。图 3A 为不同光质下香果树幼苗根干重 ,图 3B 为不同光质下香果树幼苗茎干重 ,图 3C 为不同光质下香果树幼苗叶干重。图 3D 为不同光质下香果树幼苗根重比 ,图 3E 为不同光质下香果树幼苗茎重比 ,图 3F 为不同光质下香果树幼苗叶重比。

由图 3 知 ,试验期间 ,香果树幼苗根重比最大值达 0.53( 460 nm ) ,最小值为 0.08( 630 nm ) ,茎

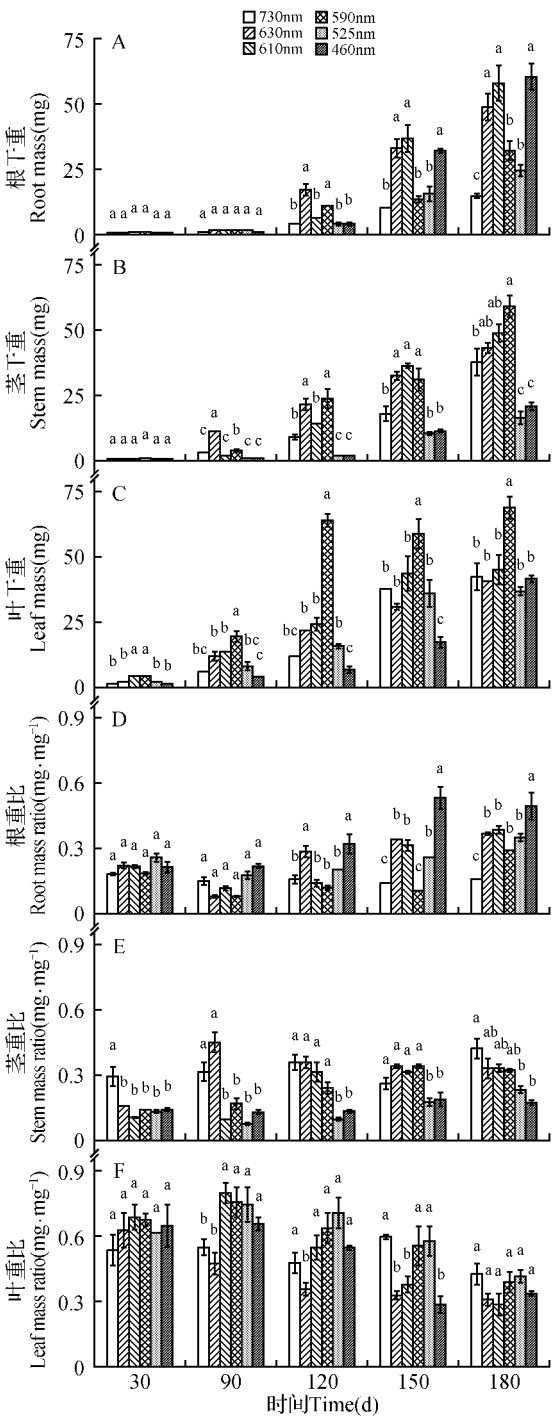


**图2** 光质对香果树幼苗生长的影响 A. 单株香果树幼苗干重 B. 单株香果树幼苗相对质量增长速率 同一时间香果树幼苗干重值标注有不同字母,表示干重之间在 0.05 水平差异显著;同一时间香果树幼苗相对生长速率标有不同字母,表示相对生长速率在 0.05 水平差异显著。

**Fig.2** Effects of different light quality on growth of *E. henryi* seedling A. Dry mass value of single *E. henryi* seedling B. Relative growth rate of single *E. henryi* seedling Different letters marked on the dry mass value of *E. henryi* seedlings at the same time show a clear difference at 0.05 level and different letters marked on the relative growth rate of *E. henryi* seedlings at the same time show a clear difference at 0.05 level.

重比最大值达 0.45( 630 nm ),最小值为 0.08( 525 nm ) 叶重比最大值达 0.80( 610 nm ),最小值为 0.29( 610 nm )。

由图 3 知,实验 30 d 时,根重比在 0.17 ~ 0.25,且处理间无显著差异(  $P>0.05$  )。实验 150 d 时,根重比最大为 0.53( 460 nm ),其次为 0.34,最小值为 0.10 460 nm 下根重比显著高于其他处理(  $P<0.05$  )。实验 30 d 时,香果树幼苗茎重比即存在显著差异(  $P<0.05$  ),730 nm 下显著高于其他处理(  $P<0.05$  ) 30 d 时茎重比最大为 0.29 ( 730 nm ),其次为 0.15,最小为 0.1。实验 30 d



**图3** 光质对香果树幼苗光合产物分配的影响 A. 根重比 B. 茎重比 C. 叶重比 D. 根重比 E. 茎重比 F. 叶重比 同一时间不同光质下香果树幼苗根重比标注有不同字母,茎重比标注有不同字母,叶重比标注有不同字母,根重比标注有不同字母,茎重比标注有不同字母,叶重比标注有不同字母,分别表示根重比,茎重比,叶重比,根重比,茎重比,叶重比在 0.05 水平差异显著。

**Fig.3** Effects of different light quality on allocation of photosynthesis product of *E. henryi* seedling A. Stem mass ratio ;B. Root mass ratio ;C. Leaf mass ratio ;D. Root mass ratio ;E. Stem mass ratio ;F. Leaf mass ratio Different letters marked on the root mass ratio ,stem mass ratio and leaf mass ratio of *E. henryi* seedlings at the same time ,respectively show a significant difference at 0.05 level of them.

时,各处理香果树叶重比在 0.53~0.68,处理间无显著差异( $P>0.05$ )。120 d 后香果树开始落叶,实验 120 d 时,叶重比最大值达 0.75(525 nm),最小值为 0.36。

### 3 讨论

#### 3.1 香果树种子萌发对光质的响应

唐荣平等<sup>[15]</sup>对丽江山慈菇(*Iphigenia indices*)种子萌发的研究表明,红光和黄光提高了萌发率,绿光和蓝光抑制了萌发。姜勇等<sup>[16]</sup>对紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)种子萌发的研究表明可见光中波长较长的光促进作用明显,波长较短的光促进效果显著降低。这表明不同植物种子的萌发对光质的响应不同。绿光通常被认为不影响种子萌发,Baskin 等<sup>[17]</sup>认为绿光对植物种子萌发的作用取决于植物的种类,是否存在后熟作用及光的具体波段范围。陈永晟<sup>[18]</sup>对毛茛的研究表明,红光与绿光均能促进毛茛种子萌发及芽的伸长生长。

本研究中,525 nm 光对香果树种子的萌发有显著促进作用,525 nm 下萌发率显著高出其他处理( $P<0.05$ ),而 610 nm 光、460 nm 光抑制了香果树种子萌发(图 1),这与对丽江山慈菇及紫茎泽兰等的研究均有所不同,与陈永晟的研究结果相似。Baskin 等的观点能解释本研究中 525 nm 光对香果树种子萌发的显著促进作用。香果树种子对不同光质的响应可能由其自身的生物学特性所致。

#### 3.2 香果树幼苗生长对光质的响应

不同光质的生物学效应有明显差别,反映此效应最有说服力的指标是植株干重<sup>[19]</sup>。多数研究表明,红光、黄光对多种植物的幼苗生长有利,而绿光、蓝光则不利于植物幼苗干物质积累,如彩色甜椒(*Capsicum frutescens* var. *grossum*)、乌塌菜(*Braassica campestris* ssp. *chinensis* var. *rosularis*)、喜树(*Camptotheca acuminata*)、茶树(*Camellia sinensis*)等<sup>[20~23]</sup>均符合上述规律,本研究结果与之类似。幼苗干重方面,香果树幼苗在 120 d 时 590 nm 下幼苗干重显著高于 630 和 610 nm 下,630 和 610 nm 下显著高于 730、525 和 460 nm 下( $P<0.05$ )。相对质量增长速率方面,30~90 d 间 630 nm 下相对质量增长速率显著高于其他处理,90~120 d 间 590 nm 下相对质量增长速率显著高于其他处理( $P<0.05$ ),即 630、610 和 590 nm 对香果树幼苗早期的干物质积累有利。

同时,研究结果表明 120 d 时 460 nm 下香果

树幼苗干重显著低于其他处理( $P<0.05$ ),仅为 590 nm 下干重 13.34%。而 180 d 时 460 nm 下香果树幼苗干重与其他处理无显著差异( $P>0.05$ ),高于 525 及 730 nm,并达 590 nm 下的 76.77%。相对质量增长速率方面,120~180 d,460 nm 下显著高于其他处理( $P<0.05$ )。这表明生长一定时间后蓝光对香果树幼苗生长较红光、黄光更为有利,这可能与 120 d 后气温下降有关。

光合产物向各个器官的分配比例,在短、长时间尺度上对植物均有重要影响<sup>[24~26]</sup>。使用根重比(RMR)、茎重比(SMR)和叶重比(LMR)表示向根、茎、叶的光合产物分配量占光合产物总分配量的比例,能较好反映植物光合产物分配情况<sup>[27~28]</sup>。

本研究中,处理 30 d 后,730 nm 下香果树幼苗茎重比即显著高于其他处理( $P<0.05$ ),为 0.29,次于 730 nm 的根重比仅为 0.15(图 3),同时,实验中观测到 730 nm 下幼苗较其他处理有更大的节间距。冠下、林下光谱组成中远红光比例高<sup>[29~30]</sup>,远红光下香果树幼苗增加对茎的光合产物分配,这有利于香果树幼苗叶片到达适宜的光环境,根据功能平衡假说,为保证水分和养分的供应,植物受到水分和养分胁迫时将增加向根系的光合产物分配<sup>[31~32]</sup>。一些研究表明蓝光能促进气孔开放,增加蒸腾速率<sup>[33~34]</sup>,本研究中,实验 150 d 时,460 nm 下根重比显著高于其他处理( $P<0.05$ ),达 0.53,同时期次于 460 nm 的光质处理下,根重比为 0.34,最小为 0.10(图 3)。表明 460 nm 处理增加了香果树幼苗对根系的光合产物分配。这可能是蓝光下香果树幼苗处于水分胁迫状态导致的。

#### 3.3 香果树种群保护与恢复对策

迁地保护中为提高香果树种子的萌发率,播种后可适当补加 630 或 525 nm 光。

590 nm 处理在香果树幼苗生长前期对干物质积累最为有利。建议田间培育香果树幼苗,在当年生香果树幼苗落叶前,可适当补加 590 nm 光,提高香果树幼苗及小树的生长速率。有研究表明,香果树可能在有性繁殖失败时通过无性繁殖(根蘖繁殖)维持种群的延续<sup>[35~36]</sup>,460 nm 光在香果树幼苗生长后期(当年生幼苗落叶后)较其他光质更有利幼苗干物质的积累,并对光合产物向根系分配的增加更为有利。蓝光可能对香果树小树、母树光合产物分配有类似影响,适当补加 460 nm 光或能促进香果树的无性繁殖。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 傅立国,金鉴明. 中国植物红皮书——稀有濒危植物 (第 1 册) [ M ]. 北京: 科学出版社, 1992: 568 – 569.  
Fu L G, Jin M J. Red list of China's plant Rare and endangered plants( vol. 1 ) [ M ]. Beijing: Science Press, 1992: 568 – 569.
- [ 2 ] 周慧斌. 香果树化学成分及其生物活性研究 [ D ]. 上海: 第二军医大学, 2011.  
Zhou H B. Studies on the chemical constituents and bioactivity of *Emmenopterys henryi* Oliv [ D ]. Shanghai: The Second Military Medical University, 2011.
- [ 3 ] 郭连金. 濒危植物香果树 (*Emmenopterys henryi*) 种群结构与动态 [ J ]. 武汉植物学研究, 2009, 27( 5 ): 509 – 514.  
Guo L J. Population structure and dynamics of the endangered plant *Emmenopterys henryi* [ J ]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2009, 27( 5 ): 509 – 514.
- [ 4 ] 陈子林, 康华靖, 刘鹏, 等. 大盘山自然保护区香果树群落结构特征 [ J ]. 云南植物研究, 2007, 29( 4 ): 461 – 466.  
Chen Z L, Kang H J, Liu P, et al. Community structure features of *Emmenopterys henryi* ( Rubiaceae ) in Dapanshan national natural reserve of Zhejiang province [ J ]. Acta Botanica Yunnanica, 2007, 29( 4 ): 461 – 466.
- [ 5 ] 康华靖, 刘鹏, 陈子林, 等. 不同生境香果树种群的径级结构与分布格局 [ J ]. 林业科学, 2007, 43( 12 ): 22 – 27.  
Kang H J, Liu P, Chen Z L, et al. Size – class structure and distribution pattern of *Emmenopterys henryi* in different habitats [ J ]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43( 12 ): 22 – 27.
- [ 6 ] 张文辉, 祖元刚, 刘国彬. 十种濒危植物的种群生态学特征及致死因素分析 [ J ]. 生态学报, 2002, 22( 9 ): 1512 – 1520.  
Zhang W H, Zu Y G, Liu G B. Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22( 9 ): 1512 – 1520.
- [ 7 ] 郭连金, 徐卫红, 房会普, 等. 不同年龄香果树种子雨和种子库及其更新特征 [ J ]. 西北植物学报, 2016, 36( 11 ): 2273 – 2282.  
Guo L J, Xu W H, Fang H P, et al. Seed rain, seed bank and natural regeneration of *Emmenopterys henryi* in different age classes [ J ]. Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica, 2016, 36( 11 ): 2273 – 2282.
- [ 8 ] 杨期和, 宋松泉, 叶万辉, 等. 种子感光的机理及影响种子感光性的因素 [ J ]. 植物学通报, 2003, 20( 2 ): 238 – 247.  
Yang Q H, Song S Q, Ye W H, et al. Mechanism of seed photosensitivity and factors influencing seed photosensitivity [ J ]. Chinese Bulletin of Botany, 2003, 20( 2 ): 238 – 247.
- [ 9 ] Guo L J, Xue P P, Li M, et al. Seed bank and regeneration dynamics of *Emmenopterys henryi* population on the western side of Wuyi Mountain, South China [ J ]. Journal of Forestry Research, 2017, 28( 5 ): 943 – 952.
- [ 10 ] 郭连金, 林国卫, 徐卫红, 等. 武夷山香果树自然种群生殖构件特性研究 [ J ]. 西北林学院学报, 2011, 26( 4 ): 18 – 22, 26.  
Guo L J, Lin G W, Xu W H, et al. Characteristics of reproductive modules of *Emmenopterys henryi* natural population in Wuyi Mountain [ J ]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26( 4 ): 18 – 22, 26.
- [ 11 ] 李铁华, 周佑勋, 段小平, 等. 香果树种子休眠和萌发的生理特性 [ J ]. 中南林学院学报, 2004, 24( 2 ): 82 – 84.  
Li T H, Zhou Y X, Duan X P, et al. Physiological characteristics of the dormancy and light-sensitive germination of *Emmenopterys henryi* seeds [ J ]. Journal of Central South Forestry University, 2004, 24( 2 ): 82 – 84.
- [ 12 ] 薛苹苹, 郭连金, 肖志鹏, 等. 不同种群香果树开花物候及繁殖器官数量特征 [ J ]. 南开大学学报: 自然科学版, 2016, 49( 3 ): 88 – 97.  
Xue P P, Guo L J, Xiao Z P, et al. Flowering phenology and reproductive characteristics of an endangered plant *Emmenopterys henryi* [ J ]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2016, 49( 3 ): 88 – 97.
- [ 13 ] 康华靖, 陈子林, 周钰鸿, 等. 濒危植物香果树种子萌发及幼苗生长动态的比较 [ J ]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31( 1 ): 32 – 37.  
Kang H J, Chen Z L, Zhou Y H, et al. Seed germination and dynamics of seedling growth of *Emmenopterys henryi* [ J ]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31( 1 ): 32 – 37.
- [ 14 ] 刘鹏, 康华靖, 张志详, 等. 香果树 (*Emmenopterys henryi*) 幼苗生长特性和叶绿素荧光对不同光强的响应 [ J ]. 生态学报, 2008, 28( 11 ): 5656 – 5664.  
Liu P, Kang H J, Zhang Z X, et al. Responses of growth and chlorophyll fluorescence of *Emmenopterys henryi* seedlings to different light intensities [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28( 11 ): 5656 – 5664.
- [ 15 ] 唐荣平, 杨永红, 潘绍骞, 等. 丽江山慈菇种子萌发特性的研究 [ J ]. 云南农业大学学报, 2006, 21( 5 ): 693 – 697, 702.  
Tang R P, Yang Y H, Pan S Q, et al. Study on characteristics of seed germination of *Iphigenia indica* [ J ]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2006, 21( 5 ): 693 – 697, 702.

- [ 16 ] 姜勇,王文杰,李艳红,等. 光质、光强对入侵植物紫茎泽兰种子萌发及幼苗状态的影响[ J ]. 植物研究, 2012, 32( 4 ) : 415 – 419.
- Jiang Y, Wang W J, Li Y H, et al. Influence of light quality and quantity on germination and seedling status of invasive species *Eupatorium adenophorum*[ J ]. Bulletin of Botanical Research 2012, 32( 4 ) : 415 – 419.
- [ 17 ] Baskin C, Thompson K, Baskin J M. Mistakes in germination ecology and how to avoid them[ J ]. Seed Science Research 2006, 16( 3 ) : 165 – 168.
- [ 18 ] 陈永晟. 不同处理对毛茛繁殖的影响研究[ D ]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- Chen Y S. Research on effect of different treatments on propagation of *Melastoma sanguineum*[ D ]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [ 19 ] Niklas K J, Enquist B J. Canonical rules for plant organ biomass partitioning and annual allocation[ J ]. American Journal of Botany 2002, 89( 5 ) : 812 – 819.
- [ 20 ] 杜洪涛. 光质对彩色甜椒幼苗生长发育特性的影响[ D ]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- Du H T. Effects of light qualities on growth characteristic of color pepper seedling[ D ]. Tai'an Shandong Agricultural University 2005.
- [ 21 ] 陈祥伟, 刘世琦, 王越, 等. 不同 LED 光源对乌塌菜生长、光合特性及营养品质的影响[ J ]. 应用生态学报, 2014, 25( 7 ) : 1955 – 1962.
- Chen X W, Liu S Q, Wang Y, et al. Effects of different LED light qualities on growth, photosynthetic characteristics and nutritional quality of savoy[ J ]. Chinese Journal of Applied Ecology 2014, 25( 7 ) : 1955 – 1962.
- [ 22 ] 刘洋. 光质对喜树幼苗生理化特性及喜树碱积累的影响机理[ D ]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- Liu Y. Effects of light quality on physiological and biochemical characteristics and accumulation of camptothecin in *Camptotheca acuminata* Decne seedlings[ D ]. Hangzhou Zhejiang A&F University 2015.
- [ 23 ] 陶汉之, 王新长. 茶树光合作用与光质的关系[ J ]. 植物生理学通讯, 1989( 1 ) : 19 – 23.
- Tao H Z, Wang X C. The relationship between photosynthesis and light quality in *Camellia sinensis*[ J ]. Plant Physiology Communications, 1989( 1 ) : 19 – 23.
- [ 24 ] Lacointe A. Carbon allocation among tree organs: a review of basic processes and representation in functional-structural tree models[ J ]. Annals of Forest Science, 2000, 57( 5 ) : 521 – 533.
- [ 25 ] Jackson R B, Schenk H J, Jobbágy E G, et al. Below-ground consequences of vegetation change and their treatment in models[ J ]. Ecological Applications 2000, 10( 2 ) : 470 – 483.
- [ 26 ] Malhi Y, Baker T R, Phillips O L, et al. The above – ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots[ J ]. Global Change Biology 2004, 10( 5 ) : 563 – 591.
- [ 27 ] Van Der Werf A, Nagel O W. Carbon allocation to shoots and roots in relation to nitrogen supply is mediated by cytokinins and sucrose: opinion[ J ]. Plant and Soil, 1996, 185( 1 ) : 21 – 32.
- [ 28 ] Poorter H, Nagel O. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO<sub>2</sub>, nutrients and water: a quantitative review[ J ]. Australian Journal of Plant Physiology 2000, 27( 6 ) : 595 – 607.
- [ 29 ] 韦朝领, 孙启祥, 彭镇华, 等. 江淮分水岭落叶阔叶林林窗光环境特征及其对绞股蓝生长特性的影响[ J ]. 应用生态学报, 2003, 14( 5 ) : 665 – 670.
- Wei C L, Sun Q X, Peng Z H, et al. Light environment characteristics of forest gap in deciduous broad-leaved forest and its effects on growth features of *Gynostemma pentaphyllum* in Jianghuai watershed[ J ]. Chinese Journal of Applied Ecology 2003, 14( 5 ) : 665 – 670.
- [ 30 ] Pons T L. Seed responses to light[ M ]. // Fenner M. Seeds: the Ecology of Regeneration in Plant Communities. 2nd ed. Oxford: CABI Publishing 2000: 237 – 260.
- [ 31 ] King D A. Influence of light level on the growth and morphology of saplings in a Panamanian forest[ J ]. American Journal of Botany, 1994, 81( 8 ) : 948 – 957.
- [ 32 ] Valio I F M. Effects of shading and removal of plant parts on growth of *Trema micrantha* seedlings[ J ]. Tree Physiology 2001, 21( 1 ) : 65 – 70.
- [ 33 ] Zeiger E. The biology of stomatal guard cells[ J ]. Annual Review of Plant Physiology, 1983, 34 : 441 – 474.
- [ 34 ] Talbot L D, Zeiger E. Sugar and organic acid accumulation in guard cells of *Vicia faba* in response to red and blue light[ J ]. Plant Physiology, 1993, 102( 4 ) : 1163 – 1169.
- [ 35 ] 郭连金, 薛苹苹, 邵兴华, 等. 香果树根萌苗生长特性及影响因子分析[ J ]. 植物科学学报, 2015, 33( 2 ) : 165 – 175.
- Guo L J, Xue P P, Shao X H, et al. Growth characteristics and influencing factors of *Emmenopterys henryi* root sprouts[ J ]. Plant Science Journal 2015, 33( 2 ) : 165 – 175.
- [ 36 ] Guo L J, Shao X H, Xue P P, et al. Root sprouting ability and growth dynamics of the rootsuckers of *Emmenopterys henryi*, a rare and endangered plant endemic to China[ J ]. Forest Ecology and Management 2017, 389 : 35 – 45.