doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 02. 008

光照强度对不同苗龄水曲柳裸根苗和容器苗生长的影响

彭政淋[1],苏嘉熙[1],李晨晞[1],苏安然[1],汤靖文[1],刘净[1],卫星[1,2*]
(1. 东北林业大学 林学院,哈尔滨 150040;2. 森林生态系统可持续经营教育部
重点实验室(东北林业大学),哈尔滨 150040)

摘　要:分析不同苗龄水曲柳裸根苗和容器苗在不同光照强度下的适应能力,可为水曲柳苗木精准造林提供科学依据。以水曲柳 1 年生裸根苗、1 年生容器苗、2 年生裸根苗和 2 年生容器苗为试验材料,观察大田遮阴设置的 100%、75%、50%和 25%光照强度下水曲柳各类型苗木生长情况。结果显示,容器苗的苗高增长量和地径增长量分别比裸根苗显著高出 58. 74%、60. 27%,4 种苗木的地径增长量和根生物量积累量均在 25%光照强度下为最低。在 50%光照强度下,1 年生容器苗的苗高增长量、地径增长量、叶面积和细根数量分别比 1 年生裸根苗高出 39. 51%、28. 80%、35. 27%、28. 73%,2 年生容器苗的苗高增长量、地径增长量、叶面积和细根数量分别比 2 年生裸根苗高出 96. 03%、94. 06%、28. 45%、40. 69%,1 年生裸根苗的苗高增长量和地径增长量分别比 2 年生裸根苗高出 59. 56%、85. 57%。研究表明,4 种水曲柳苗木在 25%光照条件下生长均较差,1 年生裸根苗比 2 年生裸根苗在弱光(50%)条件下生长更优,容器苗比裸根苗具有更强的弱光(50%)适应性。

关键词:水曲柳;光照强度;容器苗;裸根苗;苗龄
中图分类号:S792　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)02-0068-09

Effects of Light Intensity on the Growth of Bare Root Seedlings and Container Seedlings of *Fraxinus mandshurica* at Different Seedling Ages

PENG Zhenglin[1], SU Jiaxi[1], LI Chenxi[1], SU Anran[1], TANG Jingwen[1], LIU Jing[1], WEI Xing[1,2*]
(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of
Forest Ecosystem Management, Ministry of Education (Northeast Forestry University), Harbin 150040, China)

Abstract: Analyzing the adaptability of bare root and container seedlings of different ages of *Fraxinus mandshurica* under different light intensities can provide scientific basis for precise afforestation of *F. mandshurica* seedlings. Using 1-year-old bare root seedlings, 1-year-old container seedlings, 2-year-old bare root seedlings, and 2-year-old container seedlings of *F. mandshurica* as experimental materials, observe the growth of various types of *F. mandshurica* seedlings under 100%, 75%, 50%, and 25% light intensity in field shading settings. The results showed that the height and diameter growth of container seedlings were significantly higher than bare root seedlings by 58. 74% and 60. 27%, respectively. The diameter growth and root biomass accumulation of the four seedlings were the lowest under 25% light intensity. Under 50% light intensity, the height growth, diameter growth, leaf area, and fine root quantity of 1-year-old container seedlings were 39. 51%, 28. 80%, 35. 27%, and 28. 73% higher than those of 1-year-old bare root seedlings, respectively. The height growth, diameter growth, leaf area, and fine root quantity of 2-year-old container seedlings were 96. 03%, 94. 06%, 28. 45%, and 40. 69% higher than those of 2-year-old bare root seedlings, respectively, The height and diameter growth of 1-year-old bare root seedlings were 59. 56% and 85. 57% higher than those of 2-year-old bare root seedlings, respectively. Research had shown that four types of *F. mandshurica* seedlings had poor growth under 25% light conditions, 1-year-old bare root seedlings grew better under weak light conditions (50%) than 2-year-old bare root seedlings, and container seedlings had stronger adaptability to weak light conditions (50%) than bare root seedlings.

Keywords: *Fraxinus mandshurica*; light intensity; container seedling; bare root seedling; seedling age

---

收稿日期:2023-04-10
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572020DR05)。
第一作者简介:彭政淋,硕士研究生。研究方向为森林培育学。E-mail:1069324010@ qq. com
*通信作者:卫星,博士,副教授。研究方向为森林培育学。E-mail:weixing94@ nefu. edu. cn
引文格式:彭政淋,苏嘉熙,李晨晞,等. 光照强度对不同苗龄水曲柳裸根苗和容器苗生长的影响[J]. 森林工程,2024,40(2):68-76.

PENG Z L,SU J X, LI X C, et al. Effects of light intensity on the growth of bare root seedlings and container seedlings of *Fraxinus mandshurica* at different seedling ages[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):68-76.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0　引言

光照作为光合作用的能量来源是影响苗木生长的重要因素之一,光强、光质和光周期等都会对苗木的生长发育产生较大影响[1-2]。其中,光照强度的不同,植物表现不同的生长差异[3]。如李冬林等[4]研究了光照强度对浙江楠(*Phoebe chekiangensis*)裸根苗生长的影响,表明在全光和强光条件下,苗木生长旺盛,生物量增加,在低光条件下,生长缓慢,生物量下降。而葛永金等[5]研究光照强度对浙江楠容器苗生长的影响表明,在中等光照强度下,苗木的苗高、地径和生物量均大于其他光照强度。由此可见,光照强度差异对不同发育状态的苗木影响也可能不同。因此,探究不同光照强度下苗木的发育情况,对提高造林成活率及减少资源浪费有着积极作用。

苗龄、苗木类型与造林后苗木生长具有密切的联系。有研究发现造林后苗木的生长量与苗龄呈正相关,苗龄更大的苗木具有更高的营养和碳水化合物储量[6-7]。但也有研究发现苗龄越小,苗木年生长量越大[8]。裸根苗和容器苗是目前森林更新中最常用的 2 种基本苗木类型[9]。容器苗通常具有较低的茎根比和发达的根系[10],而且移栽时连同基质一起带入新的生长环境,根系破坏较少,所以在大多数情况下容器苗通常比裸根苗生长得更快[11-12],但关于不同苗龄容器苗和裸根苗在不同光照强度下生长表现的研究未见报道。

水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)是我国东北珍贵阔叶用材树种之一,树形通直、材质坚韧、纹理美观、适应性强,可广泛用于建筑、造船和土木工程等行业,具有重要的生态和经济价值,市场需求旺盛[13-14]。目前水曲柳造林主要采用 2 年生裸根苗,苗木在圃地培育时间较长,影响圃地利用效率。因此本研究以水曲柳 1 年生裸根苗、1 年生容器苗、2 年生裸根苗和 2 年生容器苗为研究对象,通过控制试验模拟不同的光照强度,明确不同苗龄和不同根系发育状态水曲柳苗木的光强生理响应,对实现水曲柳苗木精准造林具有重要的意义。

1　材料与方法

1.1　试验地概况与试验材料

试验地位于黑龙江省东北林业大学帽儿山实验基地(127°30′~127°34′ E,45°21′~45°25′ N)。该地区属寒温带大陆性季风气候,海拔 300 m 左右,年均气温 2.8 ℃;无霜期 120~140 d;年均降水量为 723.8 mm,年均蒸发量为 1 094 mm。苗木均来源于东北林业大学帽儿山试验林场,分别为水曲柳 1 年生和 2 年生可降解无纺布袋容器苗(10 cm×10 cm)、1 年生和 2 年生圃地裸根苗。

1.2　试验设计

试验采用裂区设计(在随机区组内再分化成若干副区),主区为光照强度采用完全随机排列,副区苗木采用完全随机区组排列。2021 年 5 月,在大田中采用不同网孔密度的黑色遮阴网对水曲柳进行 4 种不同的光照百分比处理:100%、75%、50%、25%。每个光照的株行距为 20 cm×40 cm,一共 4 行,一行 20 株苗,试验重复 3 次。

1.3　试验指标测定

1.3.1　苗高、地径和叶面积测量方法

在生长前期和生长结束时采用直尺和游标卡尺分别测量苗木的苗高和地径,生长结束时每个处理随机挑选 3 株长势一致的苗木,用手持激光叶面积仪(美国 CID 公司,CI-203)测量每株苗木中上部的东、南、西、北 4 个方位的 3~5 片成熟健康叶片,取其平均值。苗高(地径)增长量等于生长结束时苗高(地径)与生长初期苗高(地径)之差。

1.3.2　生物量测定方法

生长结束时每个处理取样 3 株,分别将每株苗木的根、茎、叶进行分解成 3 部分。用自来水将根表面泥垢洗净,用滤纸吸干表面水分,装进干燥的信封中,带回试验室,在 105 ℃下杀青 10 min,再放入 70 ℃的烘箱中 3~5 d,用电子天平(±0.01 g)测量其干质量,即为生物量。生物量积累量等于生长结束时生物量减去生长初期生物量,根冠比等于根干质量与地上部分干质量比值。

1.3.3　根系测定方法

在生长结束时每个处理随机挑选 3 株长势一致的苗木,用铁锹将水曲柳完整的根系挖出,为防止小须根脱落,将挖出的根系先放入水桶浸泡 10 min,待泥土软化后,再用自来水将根系清洗干净。用剪刀和镊子将细根分出(最底部的根系作为细根),然后再用 Epson 扫描仪(Expression 10000XL 1.0,Regent Instruments Company,Canada)扫描细根,使用 Win RHIZO Pro2004b 软件对根系形态指标进行分析。

1.4　数据处理

使用 Microsoft Excel 软件对试验数据进行整

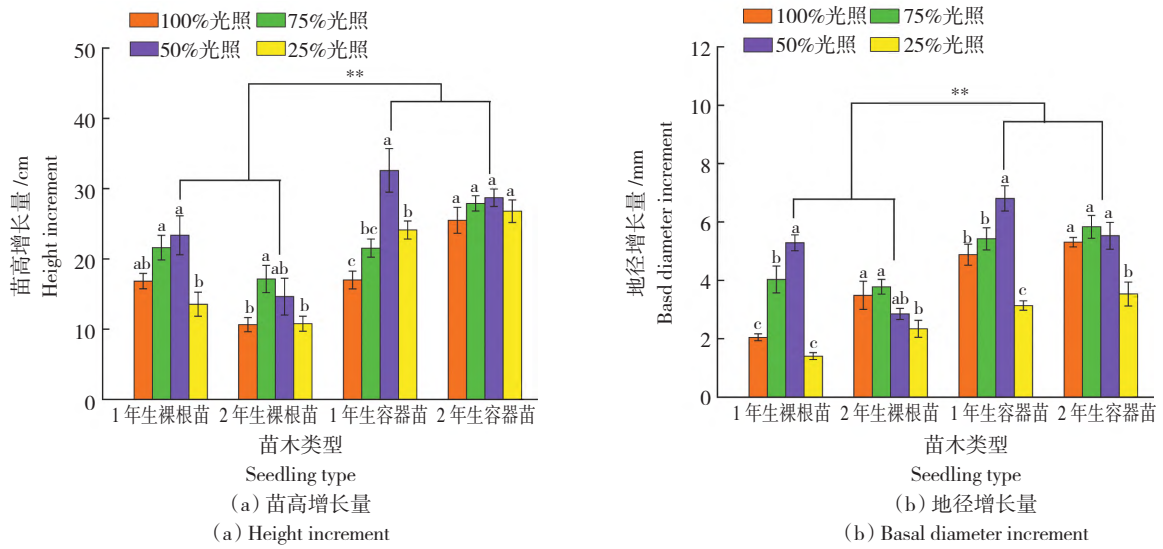
(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理,利用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)及最小显著差异法(Least significant difference,LSD)比较不同光照强度下的水曲柳幼苗各生长指标的差异显著性。采用独立样本 T 检验进行比较分析水曲柳容器苗和裸根苗的苗高增长量和地径增长量的总体差异。用 Spearman 相关系数评价水曲柳幼苗生长指标之间的相关性。图绘制在 Origin 2021 中完成。

2 结果与分析

2.1 光照强度对水曲柳苗高增长量和地径增长量的影响

由图 1 可知,随着光照的减弱,4 种苗木的苗高增长量和地径增长量呈先上升后下降的趋势。其中,1 年生裸根苗在 50%光照强度下的地径显著高于其他光照水平($P<0.05$);2 年生裸根苗的苗高增长量在 75%光照条件下与 50%光照差异不显著($P>0.05$),但均显著大于 100%和 25%光照($P<0.05$);1 年生容器苗在 50%光照下的苗高增长量分别比 100%、75%和 25%光照显著高出 91.70%、51.37%、35.17%,地径显著高出 39.60%、25.55%、117.08%;2 年生容器苗在 4 个光照强度下的苗高增长量没有显著差异($P>0.05$)。在 50%光照下,1 年生容器苗的苗高增长量和地径增长量分别比 1 年生裸根苗高出 39.51%、28.80%,2 年生容器苗的苗高增长量和地径增长量分别比 2 年生裸根苗高出 96.03%、94.06%,1 年生裸根苗的苗高增长量和地径增长量分别比 2 年生裸根苗高出 59.56%、85.57%。综合分析发现容器苗的苗高增长量和地径增长量分别比裸根苗显著高出 58.74%、60.27%。



不同小写字母表示相同苗木类型不同光照强度各指标之间的差异显著性($P<0.05$),“**”为容器苗与裸根苗总体差异极显著($P<0.01$)。

Different lowercase letters indicate the significant difference between the indexes of the same seedling type and different light intensity ($P<0.05$), and “**” is the overall difference between container seedlings and bare root seedlings ($P<0.01$).

图 1 光照强度对不同苗龄水曲柳裸根苗、容器苗的苗高增长量和地径增长量的影响

Fig. 1 Effect of light intensity on the growth of seedling height and basal diameter of *Fraxinus mandshurica* bare root seedlings and container seedlings at different seedling ages

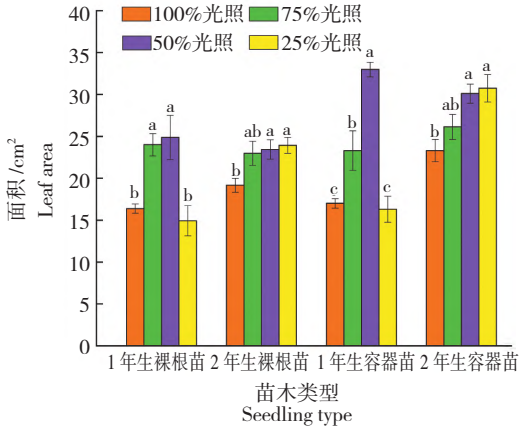
2.2 光照强度对水曲柳叶面积的影响

由图 2 可知,随着光照强度的减弱,相同苗龄的苗木表现出相同的变化趋势,1 年生苗的叶面积呈现出先增加后减小的趋势,最高值均出现在 50%光照,而 2 年生苗呈单调递增的趋势。2 年生裸根苗和容器苗的叶面积在 50%和 25%光照条件下差异不显著($P>0.05$),但均显著大于 100%光照($P<0.05$)。在 50%光照条件下,1 年生容器苗的叶面积比 1 年生裸根苗高出了 35.27%,2 年生容器苗的叶面积比 2 年生裸根苗高出了 28.45%。

2.3 光照强度对水曲柳各营养器官生物量积累量的影响

由图 3 可知,4 种水曲柳苗木的根、茎和总生物量积累量随着光照的减弱呈先上升后下降的趋势;而根冠比呈单调递增的趋势。1 年生裸根苗在 50%光照下的茎和叶生物量积累量为最大,在 25%光照

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

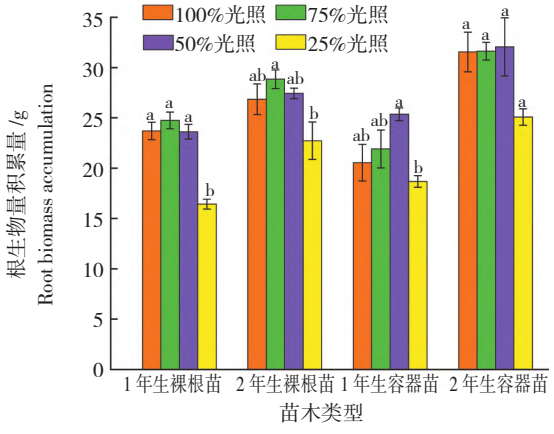


不同小写字母表示相同苗木类型不同光照强度各指标之间的差异显著性($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate the significant difference between the indexes of the same seedling type and different light intensity ($P<0.05$).

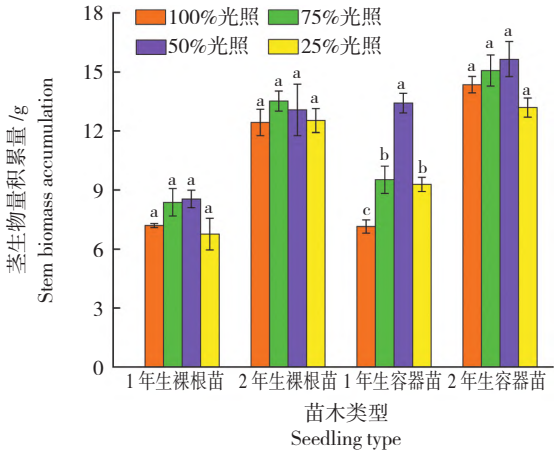
图 2　光照强度对不同苗龄水曲柳裸根苗和容器苗叶面积的影响

Fig. 2 Effect of light intensity on leaf area of bare root seedlings and container seedlings of *Fraxinus mandshurica* at different seedling ages



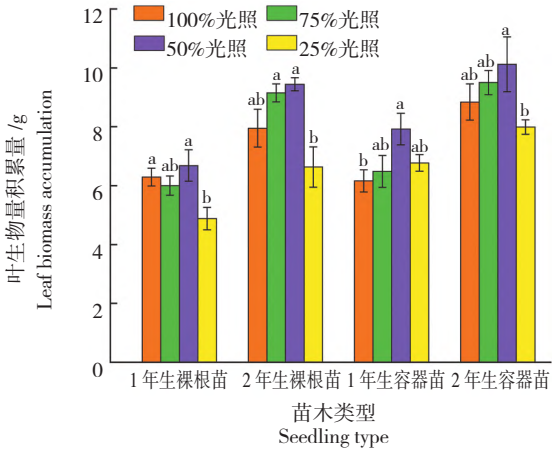
(a) 根生物量积累量

(a) Root biomass accumulation



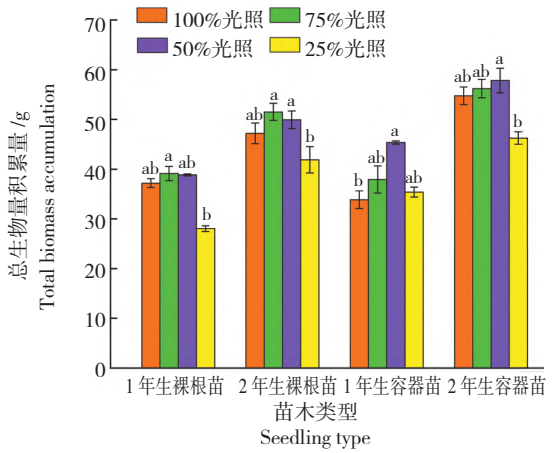
(b) 茎生物量积累量

(b) Stem biomass accumulation



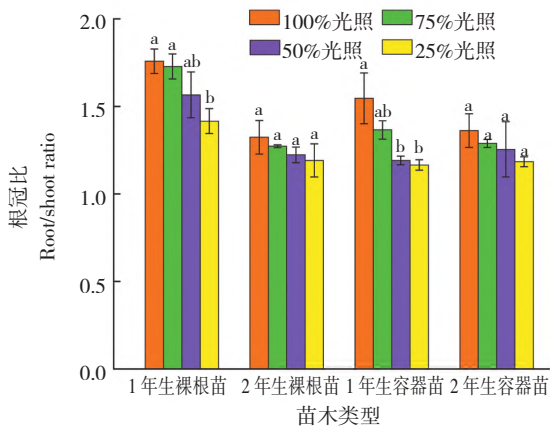
(c) 叶生物量积累量

(c) Leaf biomass accumulation



(d) 总生物量积累量

(d) Total biomass accumulation



(e) 根冠比

(e) Root-shoot ratio

不同小写字母表示相同苗木类型不同光照强度各指标之间的差异显著性($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate the significant difference between the indexes of the same seedling type and different light intensity ($P<0.05$).

图 3　光照强度对不同苗龄水曲柳裸根苗和容器苗各营养器官生物量积累量的影响

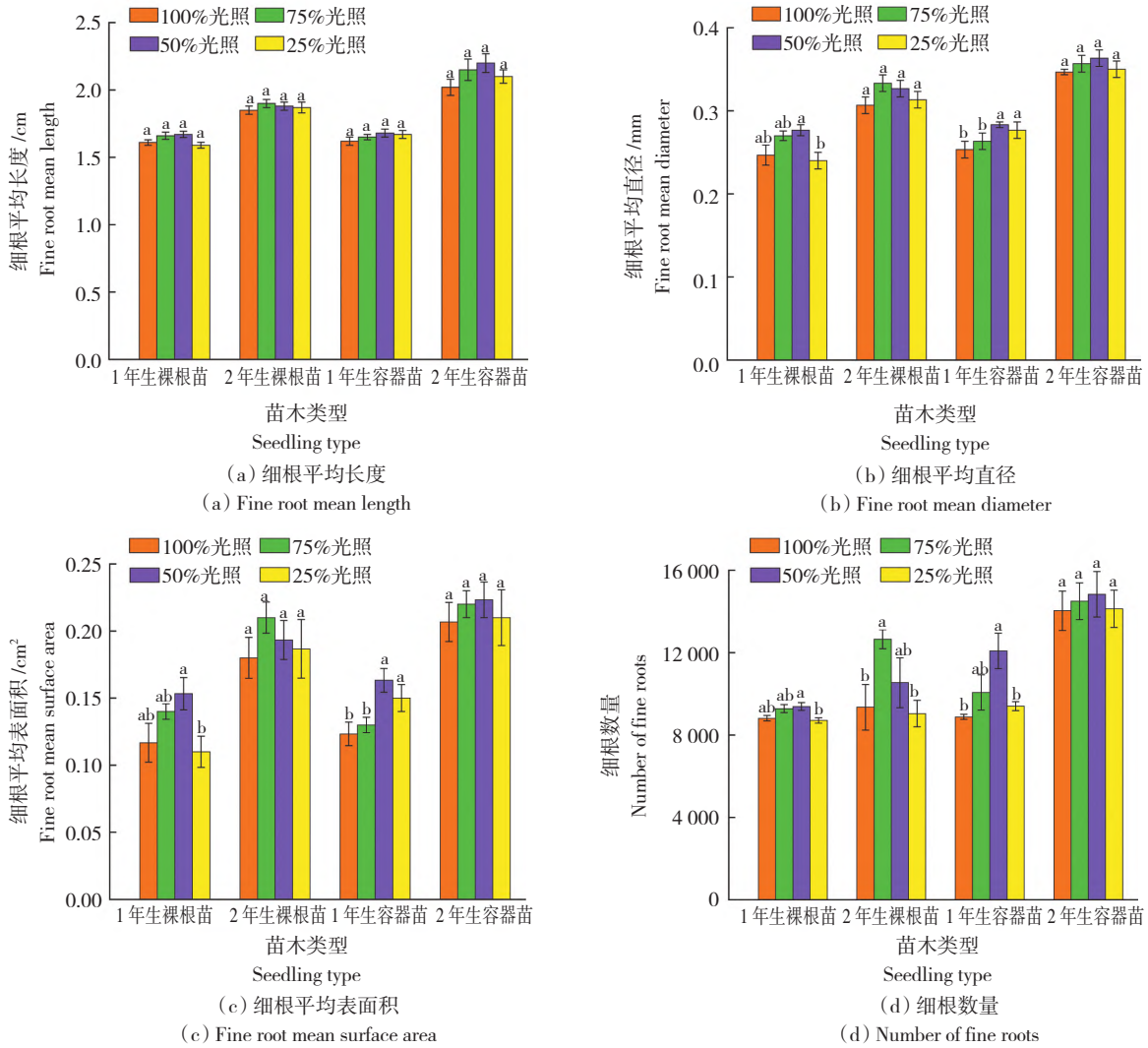
Fig. 3 Effects of light intensity on biomass accumulation in vegetative organs of *Fraxinus mandshurica* bare root seedlings and container seedlings at different seedling ages

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下显著降低了根生物量积累量($P<0.05$);2 年生裸根苗的叶和总生物量积累量在 50%和 75%光照条件下差异不显著($P>0.05$),但均显著大于 25%光照($P<0.05$);1 年生容器苗在 50%光照下的茎生物量积累量分别比 100%、75%和 25%光照显著高出 77.78%、57.47%、44.52%;2 年生容器苗在不同光照强度下的根、茎生物量积累量和根冠比无显著差异($P>0.05$)。在 50%光照条件下,1 年生容器苗的总生物量积累量比 1 年生裸根苗高出了 16.83%,2 年生容器苗的总生物量积累量比 2 年生裸根苗高出 15.80%。

2.4 光照强度对水曲柳细根形态的影响

由图 4 可知,随着光照的减弱,各根系形态指标均呈先上升后下降的趋势。在 4 个不同的光照强度中,4 种苗木的细根平均根长均无显著差异($P>0.05$)。1 年生裸根的各根系形态指标均在 50%光照条件下为最大;2 年生裸根苗的细根数量在 50%和 75%光照条件下差异不显著($P>0.05$),但均显著大于 100%和 25%光照($P<0.05$);1 年生容器苗在 50%光照下的细根数量分别比 100%、75%和 25%光照显著高出 36.03%、19.99%、28.49%;2 年生容器苗在不同光照强度下的细根平均直径和细根平均表面积均无明显差异($P>0.05$)。在 50%光照条件下,1 年生容器苗的细根数量比 1 年生裸根苗高出了 28.73%;2 年生容器苗的细根数量比 2 年生裸根苗高出 40.69%。



(a) 细根平均长度 (a) Fine root mean length

(b) 细根平均直径 (b) Fine root mean diameter

(c) 细根平均表面积 (c) Fine root mean surface area

(d) 细根数量 (d) Number of fine roots

不同小写字母表示相同苗木类型不同光照强度各指标之间的差异显著性($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate the significant difference between the indexes of the same seedling type and different light intensity ($P<0.05$).

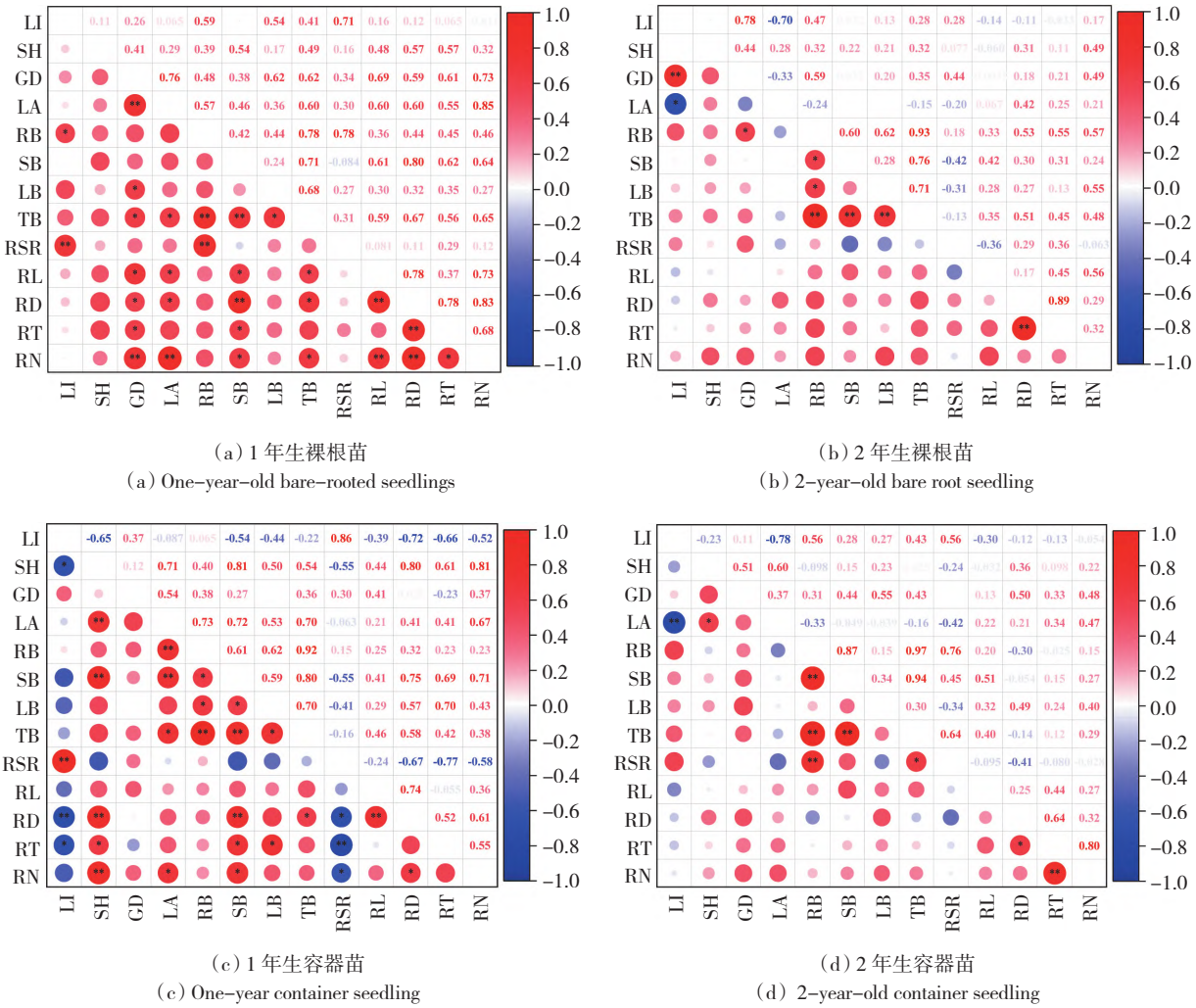
图 4 光照强度对不同苗龄水曲柳裸根苗和容器苗细根形态的影响

Fig. 4 Effect of light intensity on the fine root morphology of *Fraxinus mandshurica* bare root seedlings and container seedlings at different seedling ages

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.5　相关性分析

由图 5 可知,在 4 种苗木中,各生长指标之间(茎生物量积累量、叶生物量积累量、细根平均根长、细根平均直径、细根平均表面积和细根数量)均呈正相关;1 年生苗的根冠比与光照强度呈极显著正相关;2 生苗的叶面积与光照强度呈显著负相关。1 年生裸根苗、1 年生容器苗和 2 年生容器苗的总生物量积累量增加主要是由于根生物量积累量的增加,1 年生容器苗的苗高增长主要是由于根系数量和细根平均直径的增加,2 年生裸根苗的地径增长量与根系生物量积累量有着密切的关系。



(a) 1 年生裸根苗
(a) One-year-old bare-rooted seedlings

(b) 2 年生裸根苗
(b) 2-year-old bare root seedling

(c) 1 年生容器苗
(c) One-year container seedling

(d) 2 年生容器苗
(d) 2-year-old container seedling

红色为正相关;蓝色为负相关;颜色深浅代表显著性强弱,颜色越深代表相关性越强,颜色越浅代表相关性越弱;“ * ”为显著相关($P<0.05$);“ ** ”为极显著相关($P<0.01$);LI 为光照强度;SH 为苗高;GD 为地径;LA 为叶面积;RB 为根生物量积累量;SB 为茎生物量积累量;LB 为叶生物量积累量;TB 为总生物量积累量;RSR 为根冠比;RL 为细根平均长度;RD 为细根平均直径;RT 为细根平均表面积;RN 为细根数量。

Red is positive correlation; blue is negative correlation; the depth of color represents the strength of significance, the deeper the color the stronger the correlation, and the lighter the color the weaker the correlation; “ * ” is significant correlation ($P<0.05$); “ ** ” is extremely significant correlation ($P<0.01$); LI is the light intensity; SH is seedling height; GD is the ground diameter; LA is the leaf area; RB is the root biomass accumulation; SB is the stem biomass accumulation; LB is the leaf biomass accumulation; TB is the total biomass accumulation; RSR is the root-shoot ratio; RL is the average length of fine roots; RD is the average diameter of fine roots; RT is the average surface area of fine roots; RN is the number of fine roots.

图 5　不同苗龄水曲柳裸根苗和容器苗生长指标 Spearman 相关性

Fig. 5 Spearman correlation between bare root seedlings and container seedlings of *Fraxinus mandshurica* at different seedling ages

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 讨论与结论

光照是影响植物生长和形态最重要的因素,适宜的光照强度是植物正常生长发育的前提[15-16]。本研究发现2年生容器苗的苗高增长量和地径增长量在50%光照条件下达到最大,而2年生裸根苗在75%光照条件下达到最大,说明水曲柳容器苗具有更强的耐阴性,在浙江楠苗木研究中也出现了相似的现象[4-5]。苗期根系的发育对苗木生长具有极其重要的意义,新栽植的幼苗,新根生长缓慢,很难从土壤环境中迅速获取养分,初期生长主要依赖于体内贮存养分的再利用[17-19],因此,通过控制光照强度促进苗木根系发育,对提高苗木品质具有积极作用。本研究中1年生容器苗在50%光照强度下的细根数量与全光和25%光照相比均有显著提高,这说明了中等光照强度可以促进水曲柳苗木的根系发育,这在柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)[20]树种上也得到了类似的结论。苗木品质关系到造林效果,生长指标是评价苗木品质最直接的方法[21],在本研究中同龄水曲柳容器苗在50%光照条件下的各生长指标均高于裸根苗。同样地,叶可可等[19]观察到油松容器苗栽植后的生长状况显著优于裸根苗,这主要是在移栽过程中容器苗根系损伤较小,带基质一同栽植,基质中贮存一定量的水分和养分,为容器苗生长提供营养基础,栽植后无缓苗期[22-23]。而裸根苗在移栽过程中根系易受损伤,与土壤连接性差,缓苗期较长,生长速度较慢[19]。

不同苗龄的苗木会表现出不同的生长差异[24]。在本研究中,随着光照的减弱2年生苗的叶面积增大,这主要是因为植物会通过增加叶面积来应对光照强度的减弱,从而提高光捕获能力[24],这与薛思雷[25]的水曲柳遮光试验研究结果相一致。但1年生苗的叶面积在25%光照下为最小,并显著小于50%光照,分析其原因可能是栽植的幼苗存在光照和养分的竞争,而较小的幼苗对低光照的环境更为敏感[7,26],并不能通过增大叶面积来获取充足的光照,从而也导致了在25%光照下的1年生苗的苗高增长量显著小于50%光照。这也进一步说明水曲柳幼苗抵御环境干扰的能力随苗龄增强。苗木的根、茎、叶都执行不同的功能,其生物量大小受植株种类、大小、年龄、温度及光照等因素的影响[27]。植物各器官生物量的高低反映了光合产物在各功能部分积累的多少[28],在地下资源有限的情况下,根冠比往往会增加,而在低辐照度条件下则会降低[29]。本研究有相似的结果,4种水曲柳苗木的根冠比均随着光照的减弱而降低。这是植物适应弱光环境的一种生存策略[30-31],表明水曲柳幼苗可以通过生物量分配比例的改变来适应光环境的变化[32]。1年生苗在25%光照下的根冠比显著小于100%光照,分析其原因可能是1年生幼苗地上生物量较小,在弱光条件下,移栽缓苗期水分蒸发较少,根系恢复吸收能力后,显著提高光合效率,促进地上部分生长。但2年生苗的根冠比在4个不同的光照强度下无显著差异,可能是2年生苗的地上生物量较高,恢复生长后,需要更多的光照以满足根系发育的需要,所以在弱光环境下未能分配更多生物量给地上部分。造林苗木的苗龄选择,直接关系到造林成效和培育成本,大苗龄的苗木具有生长快、成活率高和缩短周期等特点[33]。而在本研究中1年生裸根苗的苗高增长量和地径增长量在50%光照条件下分别比2年生裸根苗高出59.56%、85.57%。分析可能是由于大苗龄需要获取更多的水分和养分来维持现有的生物量,而不是生长[34]。

以上结果表明,水曲柳容器苗和裸根苗在苗期具有一定的耐阴性,光照强度的变化对水曲柳幼苗的生长有一定的影响。在光照强度不低于25%的条件下,水曲柳可以用作东北地区林下更新树种。在培育水曲柳幼苗时也可以采用适当的遮阴措施,以促进水曲柳幼苗的生长。容器苗比裸根苗具有更强的弱光(50%)适应性。1年生裸根苗比2年生裸根苗在弱光(50%)条件下生长更优。不同类型和不同苗龄的水曲柳幼苗对不同光照强度的生长响应不同,这可为水曲柳精准造林提供重要的理论依据。

【参 考 文 献】

[1] WANG H Y, WU F, LI M, et al. Morphological and physiological responses of *Pinus massoniana* seedlings to different light gradients[J]. Forests, 2021, 12(5): 523.

[2] 王建平,王纪章,周静,等. 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, et al. Recent progress of artificial lighting technique and effect of light on plant growth[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natu-

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ral Sciences Edition), 2020, 44(1): 215-222.

[3] SANTELICES R, ESPINOZA S, ARIZA A C, et al. Effect of shading and fertilisation on the development of container-grown *Nothofagus glauca* seedlings, a threatened species from central Chile[J]. Southern Forests: a Journal of Forest Science, 2013, 75(3): 145-148.

[4] 李冬林,向其柏. 光照条件对浙江楠幼苗生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(5):27-31.
LI D L, XIANG Q B. Effects of light condition on the growth and photosynthetic characters of *Phoebe chekiangensis* seedings[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2004, 28(5): 27-31.

[5] 葛永金,刘跃钧,高伟,等. 不同光照强度下楠木属 3 个树种苗木的形态响应与适应[J]. 江西农业大学学报,2014,36(1):109-114.
GE Y J, LIU Y J, GAO W, et al. Morphological responses and adaptation of seedlings of three tree species of *Phoebe* nees to different light regimes[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014, 36(1): 109-114.

[6] GROSSNICKLE S C. Why seedlings survive: influence of plant attributes[J]. New Forests, 2012, 43(5): 711-738.

[7] OLIET J A, PLANELLES R, ARTERO F, et al. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition[J]. New Forests, 2009, 37(3): 313-331.

[8] GROSSNICKLE S C, MACDONALD J E. Why seedlings grow: influence of plant attributes[J]. New Forests, 2018, 49(1): 1-34.

[9] GROSSNICKLE S C, EL-KASSABY Y A. Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison[J]. New Forests, 2016, 47(1): 1-51.

[10] HARAYAMA H, TOBITA H, KITAO M, et al. Enhanced summer planting survival of Japanese larch container-grown seedlings[J]. Forests, 2021, 12(8): 1115.

[11] 马海林,刘方春,马丙尧,等. 白蜡容器苗和裸根苗对盐分胁迫的生长响应[J]. 东北林业大学学报,2016,44(6):13-16.
MA H L, LIU F C, MA B Y, et al. Growth responses of white wax (*Fraxinus chinensis* roxb) container seedlings and bareroot seedlings to salt stress[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(6): 13-16.

[12] DELIGOZ A. Morphological and physiological differences between bareroot and container *Juniperus excelsa* seedlings[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2012, 36(5): 619-628.

[13] WANG Q F, SHEN J, ZENG B, et al. Effects of environmental conditions on the emission and odor-active compounds from *Fraxinus mandshurica* Rupr[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(20): 30459-30469.

[14] 李虹谕,宋晓延,卫星. 育苗密度和施肥方法对水曲柳播种苗生长发育的影响[J]. 东北林业大学学报,2018,46(9):16-20.
LI H Y, SONG X Y, WEI X. Effect of seedbed density and fertilization on growth and development of *Fraxinus mandschurica* seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(9): 16-20.

[15] GAO Z, KHALID M, JAN F, et al. Effects of light-regulation and intensity on the growth, physiological and biochemical properties of *Aralia elata* (miq.) seedlings[J]. South African Journal of Botany, 2019, 121: 456-462.

[16] 王博轶,王齐,吴训锋,等. 遮阴对景东翅子树幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西部林业科学,2022,51(1):22-28.
WANG B Y, WANG Q, WU X F, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Pterospermum kingtungense* seedlings[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(1): 22-28.

[17] GROSSNICKLE S C. Importance of root growth in overcoming planting stress[J]. New Forests, 2005, 30(2): 273-294.

[18] WILSON E R, VITOLS K C, PARK A. Root characteristics and growth potential of container and bare-root seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ontario, Canada[J]. New Forests, 2007, 34(2): 163-176.

[19] 叶可可,李庆梅,祝燕,等. 油松容器苗和裸根苗生长与造林效果对秋季施肥的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(1):136-144.
YE K K, LI Q M, ZHU Y, et al. Responses of growth and afforestation performance of *Pinus tabuliformis* container and bareroot seedlings to fall fertilization[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 136-144.

[20] 闫兴富,刘建利,贝盏临,等. 不同光强条件下柠条锦鸡儿的种子萌发和幼苗生长特征[J]. 生态学杂志,2015,34(4):912-918.
YAN X F, LIU J L, BEI Z L, et al. Characteristics of seed germination and seedling growth of *Caragana korshinskii* under different light intensities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 912-918.

[21] 孙明慧,刘勇,王长伟,等. 密度和行距配置对毛白杨苗木

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

质量的影响[J]. 林业科学,2021,57(3):152-160.
SUN M H, LIU Y, WANG C W, et al. Effects of density and row spacing on the quality of *Populus tomentosa* seedling [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(3): 152-160.

[22] 梁机,杜加加,罗桂强,等. 不同育苗方式及种粒大小对擎天树苗木生长的影响[J]. 南方农业学报,2012,43(12):2025-2029.
LIANG J, DU J J, LUO G Q, et al. Effects of different seedling-raising methods and seed sizes on the nursery stock growth of *Parashorea chinensis* [J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(12): 2025-2029.

[23] 刘伟,周善松,张先祥,等. 不同立地条件下木荷容器苗与裸根苗造林对比试验[J]. 浙江林学院学报,2009,26(6):829-834.
LIU W, ZHOU S S, ZHANG X X, et al. Containerized versus bare-root seedlings of *Schima superba* for forest regeneration [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(6): 829-834.

[24] SEVILLANO I, SHORT I, GRANT J, et al. Effects of light availability on morphology, growth and biomass allocation of *Fagus sylvatica* and *Quercus robur* seedlings[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 374: 11-19.

[25] 薛思雷. 遮荫对水曲柳和蒙古栎苗木生长形态和光合生理的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.
XUE S L. Effects of shading on growth morphology and photosynthetic physiology in *Fraxinux mandshurica* and *Quercus mongolica* seedings[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.

[26] PARKER B. Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings[J]. Tree Physiology, 2001, 21(7): 415-416.

[27] 王丹,李江飞,李亚麒,等. 不同苗龄云南松异速生长及其表型可塑性[J]. 中南林业科技大学学报,2022,42(1):36-44.
WANG D, LI J F, LI Y Q, et al. Allometric growth and phenotypic plasticity of *Pinus yunnanensis* at different seedling ages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(1): 36-44.

[28] 汪梦婷,孙继伟,李亚麒,等. 不同苗龄云南松各器官生物量的分配特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2020,40(3):46-51.
WANG M T, SUN J W, LI Y Q, et al. Study on biomass allocation pattern of *Pinus yunnanensis* at different seedling ages[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 40(3): 46-51.

[29] WANG J S, WU L, ZHAO X H, et al. Influence of ground flora on *Fraxinus mandshurica* seedling growth on abandoned land and beneath forest canopy[J]. European Journal of Forest Research, 2013, 132(2): 313-324.

[30] PUGLIELLI G, LAANISTO L, POORTER H, et al. Global patterns of biomass allocation in woody species with different tolerances of shade and drought: evidence for multiple strategies[J]. The New Phytologist, 2021, 229(1): 308-322.

[31] 刘青青,马祥庆,黄智军,等. 光强对杉木幼苗形态特征和叶片非结构性碳含量的影响[J]. 生态学报,2019,39(12):4455-4462.
LIU Q Q, MA X Q, HUANG Z J, et al. Effects of light intensity on the morphology characteristics and leaf non-structural carbohydrate content of Chinese fir seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4455-4462.

[32] 孔鑫,王爱英,郝广友,等. 水曲柳幼苗水力结构和光合生理对光强梯度变化的耦合响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(1):83-91.
KONG X, WANG A Y, HAO G Y, et al. Coordinated responses of hydraulic architecture and photosynthetic characteristics in *Fraxinus mandschurica* seedlings to change of light intensity irradiance[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 83-91.

[33] 欧建德,吴志庄. 南方红豆杉苗龄型对苗木质量与造林成效的影响[J]. 东北林业大学学报,2016,44(11):10-12.
OU J D, WU Z Z. Effect of seedling age types on the seedling quality and post-transplanting performance of *Taxus wallichina* var. mairei[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(11): 10-12.

[34] ROSE R, HAASE D L. Root and shoot allometry of bare-root and container Douglas-fir seedlings[J]. New Forests, 2005, 30(2): 215-233.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net