

doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.005

遮阴对连香树幼苗生长和碳氮磷化学计量特征的影响

韩云花^{1,2,3}, 赵秋玲^{1,2,3*}, 张晶^{1,2}, 沙红^{1,2}

(1. 甘肃省小陇山林业科学研究所, 甘肃 天水 741022; 2. 甘肃省次生林培育重点实验室, 甘肃 天水 741022;
3. 甘肃小陇山森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 天水 741022)

摘要:为探究连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)幼苗的需光特性和对光环境变化的适应性,以及确定其最佳生长光照环境,采用1年生连香树为试验材料,设置遮阴度为80%、65%、50%、35%和0%(全光照)的5种光环境,观测5种遮阴度下连香树幼苗生长、叶片形态、生物量和不同器官碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其化学计量特征的变化。结果表明,连香树幼苗生长、生物量、根系发育、元素含量和积累量及化学计量比均受到外界光照强度的显著影响($P < 0.05$)。随着遮阴度的增加,苗高、叶长、叶宽、单叶叶面积、叶片含水量和根系形态6个指标均呈现先增加后下降的趋势,地径和比叶面积则逐渐增加,而比叶重减少。遮阴处理的叶长、叶宽、单叶叶面积、叶片含水量和比叶面积均高于全光照,而比叶重则低于全光照。总生物量在65%遮阴下最大,在80%遮阴下最小。遮阴处理的根和叶C含量低于全光照,而茎高于全光照,根、茎和叶的N含量均高于全光照,茎和叶的P含量均低于全光照。随着遮阴度的增加,C积累量逐渐降低,在35%遮阴下达到最大值,N积累量则逐渐增加,在80%遮阴下达到最大值,P积累量则呈现先降低后增加的变化,且在全光照下含量最高。连香树幼苗C:N和C:P随遮阴度变大均呈现出先增加后减小的变化趋势,遮阴度为50%下均达最大值。连香树各器官N:P范围在3.1~12.5,均小于14,说明在不同遮阴条件下连香树幼苗的生长主要受N限制。综上所述,遮阴改变连香树幼苗不同器官的C、N、P含量与分配,进而影响其生长、根系发育和生物量分配。连香树苗期培育可适当进行遮阴,遮阴度在50%左右有助于幼苗生长、生物量、养分含量和积累量的增加,而过度遮阴则会抑制幼苗生长发育。

关键词:连香树幼苗;遮阴;生长;生物量;化学计量特征

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0036-11

Effects of Shading on Seedling Growth and C, N, P Stoichiometry Characteristics of *Cercidiphyllum japonicum*

HAN Yunhua^{1,2,3}, ZHAO Qiuling^{1,2,3*}, ZHANG Jin^{1,2}, SHA Hong^{1,2}

(1. Research Institute of Xiaolongshan Forest Science and Technology, Tianshui 741022, China; 2. Key Laboratory of Secondary Forest Cultivation in Gansu Province, Tianshui 741022, China; 3. Forest Ecosystem Locational Research Station in Xiaolongshan, Tianshui 741022, China)

Abstract: To investigate the light demand and adaptability to light environment of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings to determine their optimal growth light environment, 1-year-old *Cercidiphyllum japonicum* was used as experimental materials, 5 lighting environments with natural light and shade levels of 80%, 65%, 50% and 35% were set, and the changes of growth, leaf morphology, biomass, C, N and P contents of different organs and their stoichiometric characteristics of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings under 5 shading levels were observed. The results showed that the seedling growth, biomass, root development, elemental contents and accumulation, and stoichiometric ratio of *Cercidiphyllum japonicum* seedling were significantly affected by external light intensity ($P < 0.05$). As the shading levels increased, the 6 indexes of seedling height, leaf length, leaf width, single leaf area, leaf water content and root morphology showed a trend of first increasing and then decreasing. The ground diameter and specific leaf area increased gradually, while the specific leaf weight decreased. The leaf length, leaf width, single leaf area, leaf water content, and specific leaf area with shading treatment were all higher than those with full light, while the specific leaf weight was lower than that with full light. The

收稿日期:2023-06-25

基金项目:2023年度省级财政补助林业草原科技创新项目(2023LCCX11);甘肃省林业和草原科技创新计划项目(2020LCCX12)。

第一作者简介:韩云花,高级工程师。研究方向为灰楸和楸树遗传改良。E-mail: 465546333@qq.com

*通信作者:赵秋玲,正高级工程师。研究方向为珍贵树种遗传改良。E-mail: zhao6046@163.com

引文格式:韩云花,赵秋玲,张晶,等. 遮阴对连香树幼苗生长和碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 森林工程, 2024, 40(2): 36-46.

HAN Y H, ZHAO Q L, ZHANG J, et al. Effects of shading on seedling growth and C, N, P stoichiometry characteristics of *Cercidiphyllum japonicum*[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):36-46.

total biomass was the highest at 65% shading and the lowest at 80% shading. The C content of roots and leaves with shading treatment was lower than that with full light, while stems were higher than that with full light. The N content of roots, stems and leaves was higher than that with full light, and the P content of stems and leaves was lower than that with full light. As the shading degree increased, the accumulation of C gradually decreased, reaching the maximum value at 35% shading, while the accumulation of N gradually increased, reaching the maximum values at 80% shading, and the accumulation of P showed a trend of first decreasing and then increasing, with the highest content with full sunlight. The C : N and C : P of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings showed a trend of first increasing and then decreasing with the increasing of shading levels, reaching the maximum values at 50% shading levels. The N : P of each organs of *Cercidiphyllum japonicum* was between 3.1 and 12.5, which was less than 14, indicating the growth of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings was mainly limited by N with different shading conditions. In conclusion, shading changed the content and distribution of C, N and P in different organs of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings, and then affected their growth, root development, and biomass distribution. During the cultivation of *Cercidiphyllum japonicum* seedling, appropriate shading could be applied. A shade level of about 50% could help increase of seedling growth, biomass, nutrient content and accumulation, while excessive shading could inhibit the seedling growth and development.

Keywords: *Cercidiphyllum japonicum* seedling; shade; growth; biomass; stoichiometric characteristics

0 引言

光是植物进行光合作用、制造有机物必不可少的能源,是植物生长过程中必不可少的环境因子,对植物的生长发育、形态、生物量和生理生化等方面均有重要影响^[1-2]。植物体中碳(C)、氮(N)、磷(P)元素化学计量随环境的变化较为敏感,可以反映植物个体对环境的适应性,是探究个体适应的关键性指标,直接与植株的生长、养分的利用效率和生长速率等方面有关^[3-6]。同时不同种和同种植物各器官中C、N、P含量,积累量及分配比例存在较大差异,并且随着外界环境变化会做出相应的响应^[1,7]。幼苗对于外界环境具有高敏感性和脆弱性,需要通过形态、生物量分配、化学计量特征和生理上的改变来适应于不同的光环境^[8-9]。目前国内学者通过人工遮阴方法设置不同光环境,对植物幼苗的生长、生物量和化学计量特征进行了大量的研究,如轻度遮阴能促进水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)的生长和生物量积累^[10],提高紫花苜蓿(*Medicago sativa*)地上部分C、N、P、钾(K)的质量分数^[11]。亦有研究认为适度遮阴有助于青桐(*Firmiana platanifolia*)幼苗苗高、比叶面积、生物量、养分含量和积累量的增加^[12]。这些研究成果反映了植物幼苗在不同遮阴环境下生长和养分的盈亏及利用效率特征。因此,研究遮光条件下植物幼苗生长和化学计量特征的变化,可以解析植物对不同光环境的反映,进而推断其生长的最佳光照环境和适应性,以便能更好地指导优质苗木培育生产。

近年来国家大力推广用珍稀濒危树种造林,加强人为措施对珍稀濒危树种的有效保护和回归,因而其苗木繁育的研究受到重视。连香树(*Cerci-*

diphyllum japonicum)属连香树科连香树属,为全国Ⅱ级重点保护野生植物^[13],有关连香树遮阴和化学计量特征研究仅有李冬林等^[14-15]和黄雪梅等^[16]有过报道。由于连香树呈散间断分布格局导致自然结实率低、天然更新困难、林下幼树极少,前人对连香树幼苗天然更新的研究成果表明,连香树幼树须生长于林下弱光处,小林窗环境下连香树幼苗生长迅速、生物量分配均衡、苗木竞争力强,有利于幼苗天然更新,在混交林郁闭的林冠下,其种子只有落在林窗或林缘湿润并有一定光照的条件下,才能发芽并发育成苗,在密闭林冠下和空旷地上都难以适应^[17-18]。目前基于幼苗遮阴环境下的研究工作还比较欠缺,尤其是遮阴对连香树生长和化学计量特征研究尚未见报道。本研究以1年生连香树实生苗为材料,设置5个遮阴处理,分析不同遮阴环境下其幼苗生长和化学计量特征的变化,为营造幼苗时期其最佳生长环境,进而提高造林苗木成活率和种群的更新保护提供一定参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地设于甘肃省小陇山林科所综合实验区(105°54'37"E, 34°28'50"N),位于秦岭北坡,渭河支流川台区,属暖温带半湿润型气候,海拔1 160 m。年降水量600~800 mm,年蒸发量1 290 mm,年均气温10.7℃,≥10℃积温3 359℃,年最高气温39℃,年最低气温-19.2℃^[19]。

1.2 试验材料

供试材料为连香树实生幼苗,2020年10月采种于小陇山林业保护中心观音林场,采后及时阴干处理干藏。于2021年3月温室沙床播种,发芽后于5月上旬选取生长相对一致的初生苗,栽种于13 cm×

18 cm 的黑色容器袋中,每袋栽植 1 株。基质为田园土:泥炭土=1:1 的混合基质,共栽植 4 000 株。

1.3 试验设计

试验于 2021 年 6—10 月进行。设 5 个遮阴处理,按完全随机区组设计,对照组为遮阴度为 0%,其他 4 个处理使用不同密度针的黑色遮阴网进行遮阴处理,遮阴度分别为 35%、50%、65%和 80%,每个处理 4 个重复,每个重复 200 株苗。试验期间给予一致的育苗管理措施,见表 1。

表 1 试验设计
Tab. 1 Experiment design

处理 Treatment	遮阴材料 Shade material	遮阴度(%) Shade	苗木数量/株 Number of seedlings
1	黑色遮阳网(密度 10 针)	80	800
2	黑色遮阳网(密度 8 针)	65	800
3	黑色遮阳网(密度 6 针)	50	800
4	黑色遮阳网(密度 4 针)	35	800
5	对照	0	800

1.4 指标测定

1.4.1 生长指标及生物量调查

10 月上旬,每个处理选择大小一致、生长良好的 30 株苗木用红色油漆标记,测量苗木的株高和胸径,利用 CID-203 手持式叶面积仪测定每片叶的叶面积。然后将红色油漆标记的 30 株苗木,整株苗木全部挖出,用流水缓缓冲洗干净晾干,用钢卷尺测量主根长和一级侧根长,精度为 0.1 cm,计算长度 ≥ 1.0 cm 的一级侧根数量(条/株),从根茎处(苗木茎与地面接触土痕处)剪断,分根、茎、叶用电子天平称取鲜质量(精度为 0.1 g)。参考李晓菁等^[20]的量筒排水法调查和计算根系形态指标。再按照根、茎、叶分别装入牛皮纸袋中,在 105 °C 下杀青 10 min,60 °C 烘箱内烘干至恒重,称其各部分的干质量。

1.4.2 幼苗不同器官元素含量测定

将烘干后幼苗根、茎、叶的样品分别采用万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司)粉碎研磨成粉末,过 60 目的筛,做好标记分装,用于 C、N、P 元素含量的测定。C、N 元素含量测定采用元素分析仪(Vario macro, elementar, Germany)^[21],P 含量测定采用钼锑抗比色法^[12]。

1.5 数据分析

叶片含水量=(叶鲜质量-叶干质量)/叶鲜质

量 $\times 100\%$;

比叶重=叶干质量/叶面积 $\times 100\%$;

比叶面积=叶面积/叶干质量;

地上生物量=茎生物量+叶生物量;

总生物量=地上生物量+根生物量;

根冠比=根生物量/地上生物量。

采用 SPSS20.0 统计软件进行单因素方差分析和多重比较。Excel 2003 对试验数据进行统计计算和绘图。

2 结果与分析

2.1 遮阴对连香树幼苗生长和形态指标的影响

由表 2 可知,随着遮阴度的增加,苗高、叶长、叶宽、单叶叶面积和叶片含水量 5 个指标均呈现先增加后下降的趋势,而地径(除遮阴度 80%)呈现增加的趋势,这 6 个指标中除叶片含水量外,其余 5 个指标均在遮阴度 50%时达到最大,其中苗高和地径分别比对照高 99.6%和 15.9%,苗高和地径在遮阴度 80%时最小,分别比对照低 51.1%和 47.8%。遮阴度 65%和 50%间、遮阴度 35%和对照间的地径差异不显著。遮阴度 50%时叶长、叶宽和单叶叶面积分别比其他 4 个处理高 17.4%、10.5%和 29.7%、6.7%、7.5%和 14.7%、14.7%、18.3%和 35.7%、45.0%、28.9%和 87.0%。遮阴度 35%的叶片含水量最高,分别高于其他 4 个处理(80%、65%、50%和 0)23.7%、11.2%、8.6%和 35.6%。比叶面积随着遮阴度的增加呈现先增加后降低再增加的波动变化,遮阴度 35%的比叶面积最高,分别比其他 4 个处理(80%、65%、50%和 0)高 3.8%、28.6%、31.7%和 91.2%。比叶重的变化与比叶面积呈现相反的趋势,对照的比叶重最高,分别高于其他 4 个处理(80%、65%、50%和 35%)85.4%、50.8%、45.9%和 93.5%。遮阴处理的叶长、叶宽、单叶叶面积、叶片含水量和比叶面积均高于对照,而比叶重则低于对照。以上结果表明中等程度的遮阴能促进连香树幼苗的生长,遮阴度 50%的生长状况最好。

2.2 遮阴对连香树幼苗根系形态发育的影响

遮阴显著影响连香树幼苗的根系形态发育,见表 3。苗木的根系总体积、主根体积、侧根体积、主根长和一级侧根数均随着遮阴度的增加呈现先减少再增加后减少的变化,除遮阴度 80%外,遮阴处理得显著高于对照。在 5 种处理中,遮阴度 50%苗木的根系总体积、主根体积和主根长均为最大值,分

表 2 不同遮阴处理对连香树幼苗生长及形态指标的影响

Tab. 2 Effects of different shading treatments on growth and morphological indexes of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

处理 Treatment	苗高/cm Seedling height	地径/mm Ground diameter	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	单叶叶面积/cm ² Single leaf area	叶片含水量(%) Leaf water content	比叶重/ (g·cm ⁻²) Specific leaf weight	比叶面积/ (cm ² ·g ⁻¹) Specific leaf area
1	14.9±0.951c	2.26±0.058b	5.98±0.169b	5.44±0.214ab	25.54±0.662b	176.73±5.33b	0.48±0.146bc	2.08±0.31ab
2	17.1±2.449bc	3.77±0.059a	6.58±0.095ab	5.59±0.126ab	28.87±0.793ab	196.51±14.23ab	0.59±0.246b	1.68±0.19b
3	44.9±3.046a	3.87±0.076a	7.02±0.158a	6.01±0.093a	33.12±0.089a	201.28±4.26ab	0.61±0.047ab	1.64±0.21b
4	32.4±0.709ab	3.37±0.126ab	6.12±0.031ab	5.08±0.102b	24.41±0.583b	218.58±19.25a	0.46±0.168bc	2.16±0.35a
5	22.5±0.998b	3.34±0.126ab	4.84±0.072bc	4.66±0.077bc	17.71±0.442bc	161.15±9.36bc	0.89±0.153a	1.13±0.17bc

注:表中数据为平均值±标准误,同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data in the table are mean±standard, different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$. The same as below.

表 3 不同遮阴处理对连香树幼苗根系形态指标的影响

Tab. 3 Effects of different shading treatments on root morphological indexes of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

处理 Treatment	根系总体积/cm ³ Total volume of root system	主根体积/cm ³ Main root volume	侧根体积/cm ³ Lateral root volume	主根长/cm Main root length	一级侧根数/条 Number of first-order lateral roots/ordinance
1	5.3±0.2b	2.6±0.3bc	2.8±0.9bc	10.7±0.372b	7.3±0.272b
2	7.2±0.2ab	3.1±0.4ab	4.1±1.1a	17.6±0.618ab	9.3±0.577a
3	7.9±0.3a	3.7±0.6a	3.8±1.1ab	18.8±0.912a	8.6±0.289ab
4	6.1±0.21ab	2.9±0.4b	3.6±1.2ab	12.3±0.451bc	8.1±0.501ab
5	5.9±0.3b	3.2±0.3ab	3.1±0.8b	17.7±0.676ab	7.7±0.284b

别是对照的 1.34、1.16 和 1.06 倍;遮阴度 80%均为最小值,侧根体积和一级侧根数最大的为遮阴度 65%,分别是对照的 1.32 和 1.21 倍。苗木根系总体积除遮阴度 65%和 35%之间差异不显著,其余各处理间均达到显著水平。主根体积和主根长除遮阴度 65%和对照不显著外,其余各处理间均达到显著水平($P<0.05$)。侧根体积各处理间均达到显著水平(除遮阴度 50%和 35%)。一级侧根数遮阴度 80%和对照、遮阴度 50%和 35%之间差异不显著。整体来看,遮阴处理提高连香树幼苗的根系质量,在遮阴度为 50%和 65%时,其根系生长相对发达且均衡。

2.3 遮阴对连香树幼苗不同器官生物量积累及分配的影响

由表 4 可知,不同遮阴处理下连香树幼苗各器官生物量积累及其分配均差异显著($P<0.05$)。随着遮阴度增加,连香树幼苗根、茎、叶和总生物量均表现出先增加后降低的趋势,根、叶生物量在遮阴度 50%取得最大值,茎和总生物量在遮阴度 65%取得最大值。与对照相比,遮阴度 80%时,根、茎、叶和总生物量分别降低 115.4%、37.9%、58.8%和 73.6%;遮阴度 65%和 50%时,根、茎、叶和总生物量

分别增加 30.6%和 32.1%、88.5%和 38.9%、65.4%和 75.3%、54.9%和 46.2%;遮阴度 35%根生物量下降 1.2%,茎、叶和总生物量分别增加 8.4%、12.3%和 5.1%。幼苗生物量占比和根冠比均随遮阴度增加而减少,遮阴处理的均低于对照。幼苗茎生物量占比则呈现先减少后增加的变化趋势,且除遮阴度 50%外都高于对照,在遮阴度 80%达到最大值。遮阴处理均高于对照,在遮阴度 50%达到最大值。幼苗根、茎和叶生物量占比遮阴度 80%和 65%之间差异不显著,幼苗根生物量占比遮阴度 50%和 35%、茎生物量占比遮阴度 35%和对照之间差异不显著,以上结果说明适度遮阴能增加连香树幼苗的生物量,遮阴度在 50%和 65%比较适宜。

2.4 遮阴对连香树幼苗不同器官 C、N、P 积累及化学计量比的影响

2.4.1 遮阴对连香树幼苗不同器官 C、N、P 含量的影响

由表 5 可知,遮阴处理显著影响连香树幼苗不同器官的 C、N、P 含量($P<0.05$)。根和叶的 C 含量均随着遮阴度的增加而降低,茎的 C 含量则逐渐增加,根的 C 含量对照最高,分别高于其他处理 29.6%、19.7%、6.7%和 3.0%,叶的 C 含量遮阴度 35%最高,

表 4 不同遮阴处理下连香树幼苗不同器官的生物量积累及其分配

Tab. 4 Biomass accumulation and distribution in different organs of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings under different shading treatments

处理 Treatment	生物量/g Biomass				幼苗生物量占比(%) Biomass proportion			根冠比 Root/shoot ratio
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总生物量 Total biomass	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
1	1.17±0.035c	0.95±0.052c	1.02±0.041c	3.14±0.093c	37.26	30.25	32.48	0.58±0.081bc
2	3.29±0.087ab	2.47±0.079a	2.68±0.092ab	8.44±0.152a	38.98	29.27	31.75	0.65±0.027b
3	3.33±0.346a	1.82±0.071ab	2.84±0.121a	7.99±0.445ab	41.68	22.78	35.54	0.73±0.106ab
4	2.49±0.112b	1.42±0.077b	1.82±0.039b	5.73±0.117b	43.46	24.78	31.76	0.79±0.063ab
5	2.52±0.126b	1.31±0.054bc	1.62±0.082b	5.45±0.209b	46.24	24.04	29.72	0.85±0.056a

表 5 不同遮阴处理下连香树幼苗不同器官的 C、N、P 含量比较

Tab. 5 Comparison of C, N, P contents in different organs of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings under different shading treatments

处理 Treatment	C 含量 C content			N 含量 N content			P 含量 P content		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
1	359.6±	495.7±	368.9±	20.24±	18.77±	22.47±	3.26±	2.84±	3.97±
	13.881bc	12.342a	9.746bc	0.952a	0.839a	1.016a	0.422a	0.342ab	0.532ab
2	389.6±	469.6±	398.8±	18.24±	16.41±	19.36±	3.02±	2.16±	3.62±
	12.456b	13.479ab	10.687b	0.875ab	0.697ab	0.841ab	0.306ab	0.287b	0.465b
3	436.8±	453.2±	476.3±	14.32±	13.26±	17.51±	2.41±	1.06±	1.98±
	13.014ab	12.069b	11.247ab	0.761bc	0.806b	0.761b	0.294b	0.198c	0.247c
4	452.6±	437.8±	502.4±	10.12±	9.12±	12.43±	1.52±	1.76±	2.44±
	15.263a	11.034bc	13.265a	0.569c	0.489c	0.694c	0.216bc	0.203bc	0.22bc
5	466.2±	416.2±	496.2±	12.89±	10.44±	14.22±	2.39±	3.85±	4.61±
	12.168a	10.264c	12.398a	0.822b	0.597bc	0.826bc	0.277b	0.504a	0.594a

注:表中数据为平均值±标准误,同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in the table are mean±standard, different lowercase letters in the same trade indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

分别高于其他处理 36.2%、25.9%、5.5%和 1.2%，茎的 C 含量在遮阴度 80%下含量最高，分别高于其他处理 5.6%、9.4%、13.2%和 19.1%。根、茎和叶 N 含量均随着遮阴度的增加而呈现先降低后增大的变化趋势，均在遮阴度 80%下含量最高，根 N 含量分别高于其他处理 10.9%、64.3%、100.0%和 45.7%，茎高于其他处理 14.4%、41.6%、105.8%和 64.1%，叶高于其他处理 16.1%、28.3%、80.8%和 58.0%。根、茎和叶 P 含量的变化趋势与 N 含量基本相同，其中根 P 含量在遮阴度 80%下最高，分别高于其他处理 7.9%、35.3%、114.5%和 36.4%，而茎和叶 P 含量均在对照下最高，分别高于遮阴处理 35.6%和 16.1%、78.2%和 27.3%、263.2%和 132.8%、118.8%和 88.9%。

2.4.2 遮阴对连香树幼苗 C、N、P 积累及分配的影响

由图 1(a)—图 1(c)可知，不同遮阴处理下连香树幼苗不同器官的 C、N、P 积累量差异显著 ($P<0.05$)。随着遮阴度的增加，连香树幼苗 C 总积累量逐渐降低，在遮阴度 35%下达到最大，N 总积累量先降低后增加，在遮阴度 80%下含量最高，P 总积累量则表现出先降低后增加的变化趋势。各器官 C 积累量在遮阴度 35%和对照下，由大到小排序为叶、根、茎；在遮阴度 80%和 65%下，由大到小排序为茎、叶、根。N 积累量除遮阴度 50%外，由大到小排序为叶、根、茎。P 积累量除遮阴度 50%外，基本都是叶片最大，但遮阴度 80%和 65%下，根部次之，茎部最小，遮阴度 35%和对照下则为茎部次之，根部最小。

不同遮阴处理下连香树幼苗各器官的 C、N 和 P 的分配比均有显著差异 ($P < 0.05$)。由图 1(d)——图 1(f)可知,与对照相比,遮阴处理增加了 C 和 N 向茎分配的比例,减少了向根和叶分配的比例,P 的分配占比是增加了向根分配的比例,减少了向茎和叶分配的比例。不同器官 C 分配比在遮阴度为 50%、35% 和对照情况下,叶占 35% 左右,而根和茎各占 32% 左右,遮阴度为 65% 和 80% 情况下,根和叶占 30% 左右,而茎占 40%。遮阴度在 0% 和 50% 之间不同器官 C 含量分配比差异均不显著,而茎 C

含量分配比在遮阴度 80% 下占 40.5%, 达到最大。遮阴度为 65% 和 80% 情况下,其根、茎和叶 N 含量分配差异不显著,如图 1(e) 所示。根 P 分配比遮阴度 50% 下最高,达到 44.2%, 而茎和叶均在对照处达到最大。

2.4.3 遮阴对连香树幼苗不同器官 C、N、P 化学计量比的影响

遮阴处理显著影响连香树幼苗根、茎和叶 C/N、C/P 和 N/P 质量比 ($P < 0.05$)。根、茎和叶 C/N 质量比的变化趋势基本一致,如图 2(a) 所示,均随着遮

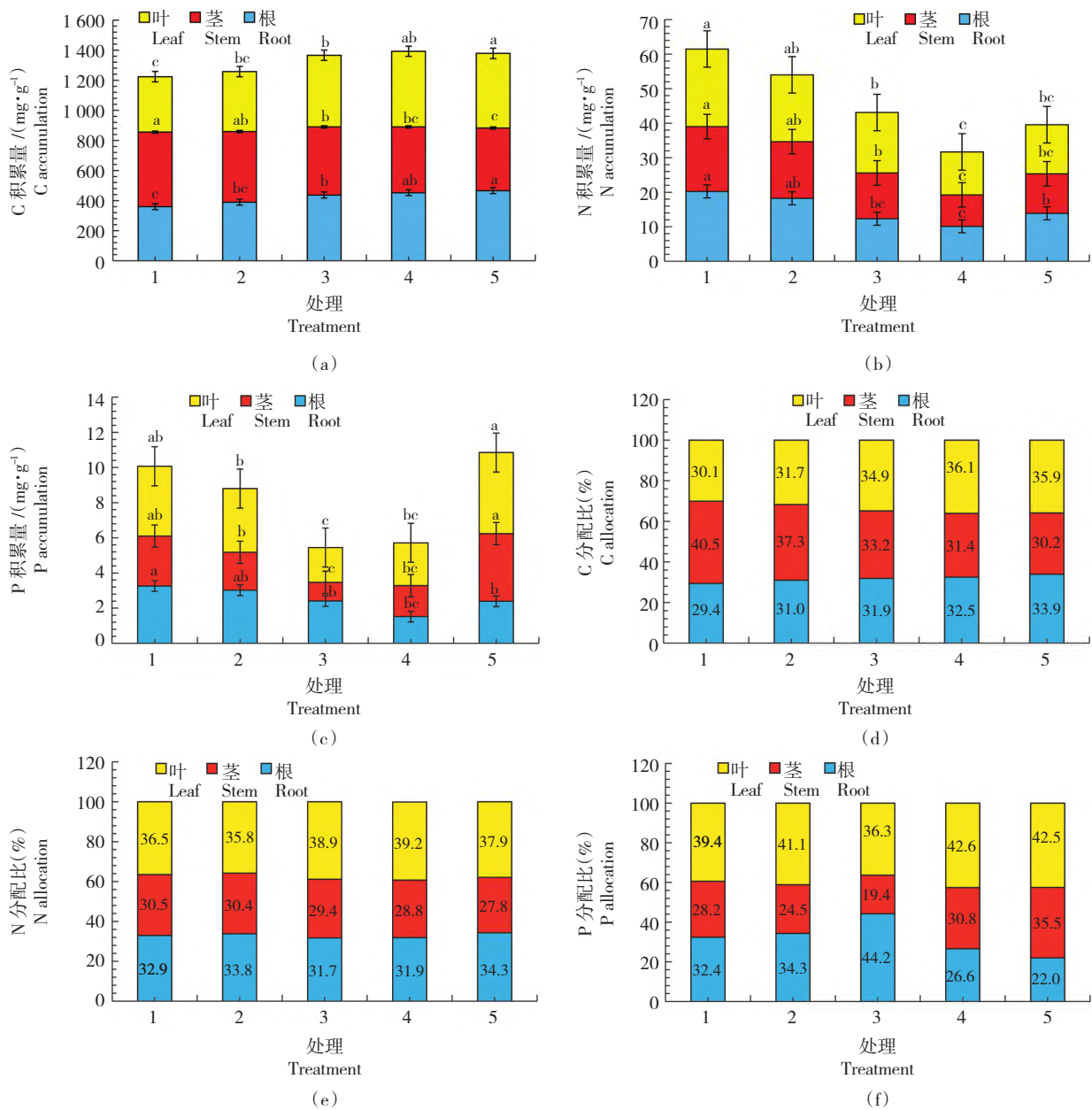


图 1 遮阴处理对连香树幼苗根茎叶的 C、N、P 积累及分配的影响

Fig. 1 Effects of shading on accumulation and distribution of C, N, P in roots, stems and leaves of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

阴度的增加而先增加后减少,在遮阴度 80% 下最低,遮阴度 35% 下达到最大值。遮阴度 80%、65% 和 35% 由大到小表现为茎、根、叶,遮阴度 50% 和 35% 由大到小表现为根、茎、叶,对照由大到小表现为茎、叶、根。根、茎和叶 C/P 质量比和 N/P 质量比随着遮阴度的增加也呈现出先增加后减少的趋势,相同于 C/N 质量比变化趋势,如图 2(b) 和图 2(c) 所示。根 C/P 和 N/P 质量比在遮阴度 35% 下达到最

大值,而茎和叶在遮阴度 50% 下达到最大值,遮阴度 80% 和 65% 的 C/P 和 N/P 质量比由大到小表现为茎、根、叶,遮阴度 50% 由大到小表现为茎、叶、根。C/P 质量比遮阴度 35% 时,由大到小表现为茎、根、叶;对照由大到小表现为根、茎、叶。N/P 质量比遮阴度 35% 和对照为根部最大,茎和叶接近,差异不显著。

3 讨论与结论

3.1 遮阴处理对连香树幼苗生长和生物量积累及分配的影响

大量研究表明,中等强度的光照有利于木本植物幼苗的生长,而过强的光照对幼苗的生长具有抑制作用^[22-24]。本研究发现,连香树幼苗苗高和地径生长明显受遮阴的影响。随着遮阴程度加剧,连香树幼苗的苗高呈现先增加后下降的趋势,而地径呈现增加的趋势,比叶面积呈现先增加后降低再增加的变化。与全光照相比,遮阴度为 50% 处理时促使幼苗基径和苗高生长,而遮阴度为 80% 处理,地径和苗高增长受到抑制,在遮阴度 65% 时,地径明显高于对照,而苗高低于对照,植株生长表现为“粗壮矮小”的特征,说明随着遮阴度的增加,连香树幼苗通过减少高生长,增加径生长来应对不利于生长的弱光环境,目的就是为了满足幼苗生长发育的需求,将更多的碳用于径器官来获得足够的光照。但是在遮阴度 80% 时,苗高和地径分别比对照低 51.1% 和 47.8%,此时的光照条件严重限制了幼苗的生长,说明连香树幼苗的生长存在着一个最佳光强范围,35% 和 50% 遮阴下为连香树幼苗的最佳生长环境。诸多研究证实,适度遮阴下植物生物量的积累与分配可达到最优,使获得的光能刚好能满足其对光合的需要^[25]。本研究中,连香树幼苗的生物量分配格局也符合这一规律,具体表现为随着遮阴度的加大,不同器官和总生物量均表现出先增加后降低的趋势,根生物量比显著减少,而茎和叶生物量比例逐渐增加,特别是遮阴度 80% 时,根生物量比全光照减少了 115.4%,而茎和叶生物量分别减少 37.9% 和 58.8%,这与前人对珍贵树种黄檗 (*Phellodendron amurense*)^[26] 和桢楠 (*Phoebe zhenan*)^[27] 研究发现的重度遮阴下苗木生长受到明显的抑制,从而使其各部分生物量均出现较大幅度减少的结论相一致。从生物量分配比例来看,生物量

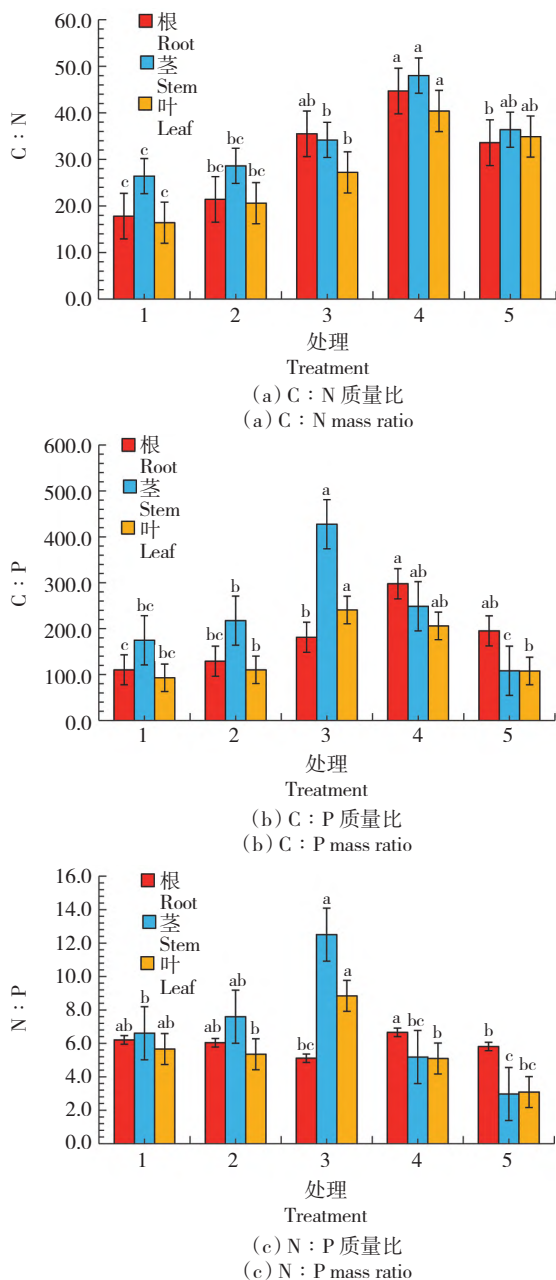


图 2 遮阴处理对连香树幼苗根茎叶的 C、N、P 化学计量比的影响

Fig. 2 Effects of shading on C, N and P stoichiometry in roots, stems and leaves of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings

在各器官中的分配比由大到小表现为根、叶、茎,表明遮阴处理对根和叶的生长有明显的促进作用,对茎干生长有一定的限制作用,从全日照到 65%遮阴范围内,连香树幼苗能获得较大的生物量增加,在 65%遮阴水平下获得的生物量增量最大,虽然在全光照和严重遮阴 80%下植物也能够维持生长,但总生物量明显较低,过度遮阴或过度光照均不利其生物量的积累。

3.2 连香树幼苗各器官 C、N、P 积累量及分配比例对遮阴的响应

已有研究证实,遮阴会显著影响植物不同器官营养元素的累积、吸收和分配及储存等生理生态过程^[1,9,12,28]。本研究中,连香树幼苗各器官的 C、N、P 积累量与分配比例显著受遮阴的影响。总体来看连香树幼苗 C 和 N 的分配表现为,根和叶的 C 和 N 分配比例均随着遮阴度的增加而降低,而茎干的则逐渐增加;而 P 的分配则表现为,根和叶的 P 分配比例随着遮阴强度的增大而呈现先增加后降低的变化,而茎干的则呈现先降低后增大的变化。各器官中叶片 N 和 P 平均分配比例分别为 37.7%和 40.4%,高于根(32.9%和 31.9%)和茎(29.4%和 27.7%),各器官之间关系 N、P 含量基本遵循叶片最大,根部次之,茎部最小,C 分配比在 0%和 50%遮阴度下叶片占 35%左右,而根和茎各占 32%左右,这可能是植物的光合作用主要在叶片中进行,在弱光环境下植物为了增强对光能的吸收和利用,故而将更多的营养物质分配到地上部分,因此与其他器官相比,叶片中往往具有较高的营养物质分配比例^[29]。C 在植株体内的分配格局及 C 同化能力不仅决定着植物各器官的形态建成速度,而且还与植物适应生境的生态对策密切相关^[1,30]。本研究中,连香树幼苗在遮阴度 80%和 65%下其 C 含量和积累量较对照平均降低了 10%,这与孙恒等^[31]研究认为光合作用在弱光下受到阻碍,导致合成的有机物质减少的结论相一致。同时,在遮阴处理下茎的 C 含量分配比随着遮阴强度的增大而增大,根和叶的分配比虽然均减少,但叶的分配比高于根的分配比,说明在遮阴环境下,连香树幼苗将更多的 C 分配到地上部分,用于茎和叶的生长,以便获取更多的光能。植物光合作用与各器官中的 N、P 含量具有相关性,因光合作用为 N、P 元素的吸收和运输提

供所需的能量,并且植物光合作用的发生需要依赖于 N、P 合成蛋白质或酶^[1,32]。本研究中连香树幼苗重度遮阴下植物 N、P 含量高于轻度遮阴下,与刘青青等^[1]对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、颜洪涛等^[33]对 5 种耐阴植物、智西民等^[12]对青桐幼苗的研究结论相一致,说明连香树幼苗在弱光环境中,侧重对 N、P 营养元素的吸收和利用。

3.3 连香树幼苗不同器官 C/N、C/P 和 N/P 对遮阴的响应

植物体内 C/N 和 C/P 反映的是植物 C 与 N、P 的相对协调能力,预示着植物吸收营养所能同化 C 的能力,可以反映一定程度上植物的营养利用效率^[34]。本研究中,连香树幼苗的 C/N 和 C/P 随着遮阴强度的增大呈现出相似的变化趋势,先增加后减少,在轻度遮阴(35%和 50%)处理下达最大值,说明连香树幼苗的 C/N 和 C/P 对不同遮阴强度具有高度的协同性,响应相同,类似的结论也出现在智西民等^[12]的研究中。遮阴处理的连香树幼苗叶片 N 含量和 N/P 与全光照相比显著增加,这与前人研究认为,在养分充足时,改变光照条件使植物光合作用增强而造成地上部分的生长速度减慢,导致植物 N/P 增加的结论相吻合^[12,35]。此外,植物叶片 N/P 比值用来表征植物受 N 和 P 养分的限制格局等^[36]。前人研究成果表明,当 N/P 小于 14 时,植物生长主要受 N 素限制;当 N/P 大于 16 时,植物生长受到 P 限制;若 N/P 比值在 14~16 范围内,则表明受到 N、P 2 种元素的共同限制^[1,12,37]。本研究中连香树幼苗各器官 N/P 范围在 5.1~12.5,均小于 14,表明在不同遮阴环境中连香树幼苗的生长主要受限于氮素,类似的结果在对青桐^[12]、闽楠(*Phoebe bournei*)幼树^[38]的研究中有过报道。因此,连香树育苗实践中,进行适当增施氮肥有利于其生长发育。

综上所述,连香树幼苗生长、生物量、根系发育、元素积累和积累量及化学计量比均受到外界光照强度的显著影响。总体上随着遮阴程度加剧,连香树幼苗生长和生物量性状主要表现为苗高和地下生物量先增加后减少,而地径生长逐渐加快,茎和叶地上生物量分配增加等。50%遮阴能有效促进连香树幼苗生长和生物量积累,其幼苗 C、N 积累也最佳。但过度遮阴下幼苗的生长受到抑制,生物量和 C、N 积累减少。遮阴处理同样影响连香树幼苗

的受N素限制水平,但是其受限状态未得到改变。因此,在育苗实践中进行适当的遮阴处理有利于连香树幼苗生长发育,但遮光强度以自然光强的50%为宜。

【参 考 文 献】

- [1] 刘青青,黄智军,马祥庆,等. 遮阴条件下杉木幼苗生长和C、N、P化学计量特征的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 74-82.
LIU Q Q, HUANG Z J, MA X Q, et al. Changes of seedling growth and C, N, P stoichiometric characteristics in Chinese fir under shading[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(3): 74-82.
- [2] 王艺,韦小丽. 不同光照对植物生长、生理生化和形态结构影响的研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2010, 29(4): 353-359, 370.
WANG Y, WEI X L. Advance on the effects of different light environments on growth, physiological biochemistry and morphostructure of plant[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2010, 29(4): 353-359, 370.
- [3] 刘俊雁,董廷发. 云南松形态和叶片碳氮磷化学计量及其海拔变化特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 139-145.
LIU J Y, DONG T F. Morphology and leaf C, N and P stoichiometry of *Pinus yunnanensis* and their elevational variations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 139-145.
- [4] AERTS R, CHAPIN F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. Advances in Ecological Research, 1999, 30: 1-67.
- [5] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [6] 封焕英,杜满义,辛学兵,等. 华北石质山地侧柏人工林C、N、P生态化学计量特征的季节变化[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1572-1582.
FENG H Y, DU M Y, XIN X B, et al. Seasonal variation in C, N, and P stoichiometry of *Platycladus orientalis* plantation in the rocky mountainous areas of North China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1572-1582.
- [7] 王瑞祺,罗丽莹,孙嘉伟,等. 会同成熟杉木器官C:N:P生态化学计量的动态特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 64-71.
WANG R Z, LUO L Y, SUN J W, et al. Seasonal dynamics of leaf, branch and root C:N:P ecological stoichiometry of mature *Cunninghamia lanceolata* in Huitong [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(4): 64-71.
- [8] 李东胜,白庆红,李永杰,等. 光照条件对蒙古栎幼苗生长特性和光合特征的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2744-2750.
LI D S, BAI Q H, LI Y J, et al. Effects of light conditions on the growth characteristics and photosynthetic traits of *Quercus mongolica* seedlings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(10): 2744-2750.
- [9] 汪成忠,于晶,尹原森,等. 遮阴对凤丹生物量分配和化学计量特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(9): 71-75, 87.
WANG C Z, YU J, YIN Y S, et al. Effects of shading on biomass and stoichiometry of Fengdan [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(9): 71-75, 87.
- [10] 薛思雷,王庆成,孙欣欣,等. 遮阴对水曲柳和蒙古栎光合、生长和生物量分配的影响[J]. 植物研究, 2012, 32(3): 354-359.
XUE S L, WANG Q C, SUN X X, et al. Effects of shading on the photosynthetic characteristics, growth, and biomass allocation in *Fraxinus mandshurica* and *Quercus mongolica* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(3): 354-359.
- [11] 马志良,杨万勤,吴福忠,等. 遮阴对紫花苜蓿地上生物量和化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3139-3144.
MA Z L, YANG W Q, WU F Z, et al. Effects of shading on the aboveground biomass and stoichiometry characteristics of *Medicago sativa* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3139-3144.
- [12] 智西民,王梦颖,牛畔青,等. 遮阴对青桐幼苗生长性状与化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 664-671.
ZHI X M, WANG M Y, NIU P Q, et al. Effects of shading on the growth indices and stoichiometric characteristics of *Firmiana plataniifolia* seedlings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 664-671.
- [13] 李文良,张小平,郝朝运,等. 湘鄂皖连香树种群的年龄结构和点格局分析[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3221-3230.
LI W L, ZHANG X P, HAO C Y, et al. Age structure and point pattern analysis of four *Cercidiphyllum japonicum* populations in three provinces of Hunan, Hubei and Anhui [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3221-3230.

- [14] 李冬林,金雅琴,崔梦凡,等. 夏季遮光对连香树幼苗形态、光合作用及叶肉细胞超微结构的影响[J]. 浙江农林大学学报,2020,37(3):496-505.
LI D L, JIN Y Q, CUI M F, et al. Growth, photosynthesis and ultrastructure of mesophyll cells for *Cercidiphyllum japonicum* seedlings with shading in summer[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2020, 37(3): 496-505.
- [15] 李冬林,金雅琴,崔梦凡,等. 遮光对连香树幼苗光合特性及其叶片解剖结构的影响[J]. 西北植物学报,2019,39(6):1053-1063.
LI D L, JIN Y Q, CUI M F, et al. Photosynthetic characteristics and leaf anatomical structure of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings under shading condition [J]. Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica, 2019, 39(6): 1053-1063.
- [16] 黄雪梅,马永红,董廷发. 连香树雌雄植株叶片碳氮磷化学计量特征[J]. 西华师范大学学报(自然科学版),2019,40(4):332-338.
HUANG X M, MA Y H, DONG T F. Stoichiometric characteristics of C, N and P in the leaf of dioecious plant *Cercidiphyllum japonicum* [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2019, 40(4): 332-338.
- [17] 程勇,张珉,陈明皋,等. 林窗面积对连香树幼苗生长及生物量分配的影响[J]. 湖南生态科学学报,2022,9(1):44-49.
CHENG Y, ZHANG M, CHEN M G, et al. Effects of forest gap area on growth and biomass allocation of *Cercidiphyllum japonicum* seedling[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2022, 9(1): 44-49.
- [18] 李伟. 不同种源连香树对于干旱胁迫的生理响应研究[D]. 雅安:四川农业大学,2009.
LI W. Studies on the physiological responses of different provenances *Cercidiphyllum japonicum* under drought stress [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009.
- [19] 郭小龙,赵秋玲,张晶. 灰楸不同杂交组合杂种后代叶片特征与光合能力的关系[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2022,42(2):1-10.
GUO X L, ZHAO Q L, ZHANG J. Relationship between leaf characteristics and photosynthetic capacity of hybrid progenies of different hybrid combinations of *Catalpa fargesii* [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2022, 42(2): 1-10.
- [20] 李晓菁,龙字文,史锋厚,等. 基质配比对南京椴容器苗生长及光合特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2023,43(5):15-22.
LI X J, LONG Z W, SHI F H, et al. Effects of substrate compositions on the growth and photosynthesis characteristic of *Tilia miqueliana* container seedlings [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023, 43(5): 15-22.
- [21] 王菲,李琬婷,程小毛,等. 急尖长苞冷杉叶光合特性及营养元素对海拔的响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2021,41(1):55-61.
WANG F, LI W T, CHENG X M, et al. Response of photosynthetic characteristics and nutrients of *Abies georgei* var. *smithii* needles to altitudes [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, 41(1): 55-61.
- [22] 陈乾,邓智文,黄丽婷,等. 遮阴对福建柏幼苗生理特性和叶绿素荧光特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(2):223-229.
CHEN Q, DENG Z W, HUANG L T, et al. Effects of shading on physiological characteristics and chlorophyll fluorescence characteristics of *Fokienia hodginsii* seedlings [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 50(2): 223-229.
- [23] 闫兴富,方苏,李静,等. 遮阴处理对臭椿幼苗早期生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(3):80-84.
YAN X F, FANG S, LI J, et al. Effects of light on early growth of *Ailanthus altissima* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(3): 80-84.
- [24] 殷东生,周志军,郭树平. 光照对沙棘幼苗生长、生物量分配及光合特性的影响[J]. 经济林研究,2014,32(3):48-53.
YIN D S, ZHOU Z J, GUO S P. Effects of light intensity on growth, biomass allocation and photosynthetic characteristics in *Hippophae rhamnoides* seedlings [J]. Nonwood Forest Research, 2014, 32(3): 48-53.
- [25] 徐飞,郭卫华,徐伟红,等. 不同光环境对麻栎和刺槐幼苗生长和光合特征的影响[J]. 生态学报,2010,30(12):3098-3107.
XU F, GUO W H, XU W H, et al. Effects of light intensity on growth and photosynthesis of seedlings of *Quercus acutissima* and *Robinia pseudoacacia* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3098-3107.
- [26] 张玲,张东来. 遮阴条件下黄檗生长和生理响应的性别差异研究[J]. 植物研究,2020,40(5):735-742.

- ZHANG L, ZHANG D L. Gender differences in growth and physiological respond of *Phellodendron amurense* Rupr. in condition of overshadow[J]. Bulletin of Botanical Research, 2020, 40(5): 735-742.
- [27] 邓波, 燕李鹏, 刘桂华, 等. 遮光和施肥对桢楠苗期生长和氮素积累的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 489-495.
- DENG B, YAN L P, LIU G H, et al. Effects of shading and fertilization on growth and nitrogen accumulation of *Phoebe zhennan* seedlings[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2020, 37(3): 489-495.
- [28] DICKMAN E M, NEWELL J M, GONZÁLEZ M J, et al. Light, nutrients, and food-chain length constrain planktonic energy transfer efficiency across multiple trophic levels[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(47): 18408-18412.
- [29] 井卉竹, 董琼, 段华超, 等. 生长调节剂喷施对白桉杆幼苗 N、P、K 化学计量特征的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(3): 26-33.
- JING H Z, DONG Q, DUAN H C, et al. Effect of growth regulators on ecological stoichiometry of N, P and K in *Fraxinus malacophylla* seedling[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2022, 42(3): 26-33.
- [30] 冯博. 光照对三种北方针叶树种幼苗碳氮分配的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- FENG B. Effects of light on partitioning of carbon and nitrogen of three northern coniferous seedlings[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [31] 孙恒, 张燕平, 吴疆翀, 等. 干旱胁迫和遮光对印楝幼苗生长及碳氮代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3): 463-470.
- SUN H, ZHANG Y P, WU J C, et al. Effect of drought stress and shading on growth and carbon-nitrogen metabolism of *Azadirachta indica* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(3): 463-470.
- [32] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 52-62.
- LIU W D, SU J R, LI S F, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry at different growth stages in dominant tree species of a monsoon broad-leaved evergreen forest in Pu'er, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(1): 52-62.
- [33] 颜洪涛, 虞木奎, 成向荣. 光照强度变化对 5 种耐阴植物氮磷养分含量、分配以及限制状况的影响[J]. 植物生态学报, 2017, 41(5): 559-569.
- XIE H T, YU M K, CHENG X R. Effects of light intensity variation on nitrogen and phosphorus contents, allocation and limitation in five shade-enduring plants[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(5): 559-569.
- [34] 羊留冬, 杨燕, 王根绪, 等. 短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3668-3676.
- YANG L D, YANG Y, WANG G X, et al. Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of *Abies fabiri* (Mast.) Craib seedling in Gongga mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3668-3676.
- [35] DONOVAN L A, MAHERALI H, CARUSO C M, et al. The evolution of the worldwide leaf economics spectrum[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2011, 26(2): 88-95.
- [36] 黄雍容, 高伟, 黄石德, 等. 福建三种常绿阔叶林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1991-2000.
- HUANG Y R, GAO W, HUANG S D, et al. Ecostochiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in Fujian evergreen broad-leaved forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1991-2000.
- [37] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N/P ratio/A new tool to detect the nature of nutrient of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [38] 王振兴. 闽楠幼树在不同光环境下的生理生态特征[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.
- WANG Z X. Ecophysiological characteristics of *Phoebe bournei* young trees to different light regimes[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2012.