



外源硅添加对楠木幼苗生长及光合特性的影响

廖晓丽, 薛可馨, 蔡思莹, 李沛瑶, 林君漪, 余跃, 黄伟, 靳少非, 郑德祥

引用本文:

廖晓丽,薛可馨,蔡思莹,李沛瑶,林君漪,余跃,黄伟,靳少非,郑德祥. 外源硅添加对楠木幼苗生长及光合特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(6): 772-780.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4910>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同光环境对海南龙血树幼苗表型可塑性及生存策略的影响

Effects of Light Intensity on Phenotypic Plasticity and Survival Strategy of *Dracaena cambodiana* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2018, 26(2): 150-156 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3782>

遮荫处理对秋枫幼苗生理生态特性的影响

Effects of Shading on Physio-ecology Characteristics of *Bischofia javanica* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(4): 323-330 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3705>

遮荫处理对梅叶冬青叶片形态、光合特性和生长的影响

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 25-34 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4077>

盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photo-synthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626-633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

遮荫对裸花紫珠苗期光合特性及总黄酮含量的影响

Effect of Shading on Photosynthetic Characteristics and Total Flavonoid Content of *Callicarpa nudiflora* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 569-578 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3751>

向下翻页, 浏览PDF全文

外源硅添加对楠木幼苗生长及光合特性的影响

廖晓丽¹, 薛可馨², 蔡思莹², 李沛瑶², 林君漪², 余跃³, 黄伟⁴, 靳少非¹,
郑德祥²

(1. 闽江学院地理与海洋学院, 福州 350108; 2. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 3. 顺昌县国有林场, 福建 顺昌 353200; 4. 顺昌县林业局, 福建 顺昌 353200)

摘要: 为探究外源硅添加对光照胁迫下楠木(*Phoebe bournei*)幼苗生长的影响, 以楠木 1 a 生幼苗为研究对象, 分析不同光照强度和硅添加对楠木幼苗生长、生物量、叶形态和光合参数的变化。结果表明, 遮荫与硅添加对楠木幼苗生长和光合性状产生了显著影响, 适度的遮荫和硅添加有利于楠木幼苗苗高、地径、各器官生物量和叶形态(叶长、叶宽和叶面积)的生长。光照强度的降低有利于楠木幼苗叶片叶绿素的积累, 在 15%~60%光照强度下硅添加进一步促进了叶绿素的积累, 使楠木幼苗更适应光照胁迫; 在 15%~40%的中低光照强度下 1 000~2 000 mg/kg 的硅添加有利于提高楠木幼苗叶片的叶绿素荧光参数, 促进楠木幼苗的光合作用; 而 40%光照强度下 1 000~2 000 mg/kg 的硅添加更有利于提高楠木幼苗叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 降低胞间 CO₂ 浓度, 促进楠木幼苗光合能力的提高, 提高楠木幼苗光照胁迫适应能力。因此, 楠木幼苗适宜在一定的遮荫条件下更新造林, 而硅添加有利于缓解光照胁迫, 改善楠木幼苗在不同光照强度下的叶形态和光合作用效率, 提高其对光照胁迫的生长适应性, 进而促进苗木的生长, 有利于造林更新成效的提高。

关键词: 楠木; 硅添加; 光照强度; 幼苗生长; 光合特性

doi: 10.11926/jtsb.4910

CSTR:32235.14.jtsb.4910

Effects of Exogenous Silicon on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Phoebe bournei* Seedlings

LIAO Xiaoli¹, XUE Kexin², CAI Siying², LI Peiyao², LIN Junyi², YU Yue³, HUANG Wei⁴,
JIN Shaofei¹, ZHENG Dexiang²

(1. College of Geography and Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 2. Forestry College, Fujian Agricultural and Forest University, Fuzhou 350002, China; 3. State-owned Forest Farm of Shunchang, Shunchang 353200, Fujian, China; 4. Forestry Bureau of Shunchang, Shunchang 353200, Fujian, China)

Abstract: In order to investigate the effects of exogenous silicon addition on the growth of *Phoebe bournei* seedlings under light stress, the changes of different light intensity and silicon addition in the growth, biomass, leaf morphology and photosynthetic parameters of *P. bournei* seedlings were analyzed. The results showed that shading and silicon addition had significant effects on the growth and photosynthetic traits of seedlings. Moderate shading and silicon addition were beneficial to the growth of seedling height, ground diameter, biomass of organs and leaf morphology (length, width and area) of seedlings. The decrease of light intensity was conducive to the accumulation of chlorophyll in leaves, and the addition of silicon further promoted the accumulation of chlorophyll in the 15%–60% light intensity, which made seedlings better adapt to light stress. The addition of 1 000 to 2 000 mg/kg silicon under 15% to 40% light intensity could improve the chlorophyll fluorescence

收稿日期: 2024-02-28

接受日期: 2024-06-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32071760); 福建省自然科学基金面上项目(2023J011419)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 32071760), and the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2023J011419).

作者简介: 廖晓丽(1980年生), 女, 博士, 主要从事植物与自然地理科学研究。E-mail: liaoxl2005@126.com

parameters in leaves and promote photosynthesis. The addition of 1 000~2 000 mg/kg silicon under 40% light intensity was more conducive to improving the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of leaves, reducing the intercellular CO₂ concentration, promoting the improvement of photosynthetic capacity of seedlings, and improving the adaptability of seedlings to light stress. Therefore, the regeneration of *P. bournei* seedlings was suitable under certain shade conditions, and the addition of silicon was conducive to alleviating light stress, improving the leaf morphology and photosynthetic efficiency of seedlings under different light intensity, improving their growth adaptability to light stress, and then promoting the growth of seedlings, which is conducive to the improvement of afforestation and regeneration effect.

Key words: *Phoebe bournei*; Silicon addition; Light intensity; Seedling growth; Photosynthetic characteristics

光是影响植物光合作用的主要环境因子, 研究表明不同的光照强度会使植株的光合参数发生改变, 进而影响植株抗光胁迫能力和光合作用效率^[1-3], 光照不足或光照过强都可能使植物体内养分失衡或影响其光合效率而导致光抑制^[4-5]。在林业生产中, 耐荫树种通常需在庇荫条件下才能正常生长, 为提高耐荫树种苗木的生长质量, 遮荫与施肥成为森林培育的重要措施, 遮荫与施肥有助于提高植株的光合效率促进苗木生长^[6-7], 而硅作为一种有益元素, 硅肥的施用有利于缓解强光照对植物光抑制效应, 改善植物的光合作用, 提高其对环境胁迫的适应能力^[8-10], 目前硅肥施用对光合效率的影响研究多见于农作物, 而在林业生产中能否通过硅肥添加以提高林木幼苗的光合效率尚有待于进一步研究。

楠木(*Phoebe bournei*)是我国南方常见的珍贵乡土造林树种, 其材质优良, 具有很高的市场经济价值, 近年来已成为我国南方森林质量精准提升过程中主要的林下更新及混交造林树种之一, 国内外关于楠木的研究主要集中在栽培选育、环境胁迫、光合特性和遮荫条件下光合参数及生理生化指标变化等方面^[11-14]。有研究表明, 楠木幼苗的生长需要一定的荫蔽条件, 在遮荫条件下楠木幼苗可以通过增加叶绿素含量等来增强光合能力, 遮荫和施氮肥处理有利于改善楠木幼苗的光能利用率, 促进光合作用, 提高楠木幼苗的生态适应能力^[15-18]。而在不同环境条件下施用硅肥是否影响楠木幼苗生理生长尚有待于研究, 能否通过施用硅肥以提高林下更新及混交造林的光合效率, 这对提高楠木更新造林成效具有重要的生产与理论价值。因此, 本试验选用 1 a 生楠木幼苗, 分析不同光照强度和不同硅肥施用量下幼苗生长、生物量、叶形态和光合参数的变化, 揭示其对楠木幼苗光合效率的影响, 从而为硅肥施用及提高楠木幼苗更新造林成效提供理

论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在福建省南平市顺昌县张墩苗圃进行, 位于 117°29'~118°14' E, 26°38'~27°12' N, 属亚热带季风气候, 年平均降水量为 1 756 mm, 年平均气温为 20 °C。以苗圃 1 a 生楠木容器苗为试验材料, 试验盆栽用土取自张墩苗圃的红壤, 土壤基底值分别为: pH (6.92±0.19)、有效磷(8.68±0.37) mg/kg、总碳含量(4.14±0.23) g/kg、总氮含量(0.66±0.13) g/kg。

1.2 方法

1.2.1 光照强度设置

试验采用遮荫网设置 5 种光照强度, 除不进行遮荫的全光照(100%)外, 其余 4 种光照强度通过覆盖普通非加密尼龙网搭建遮荫网室模拟, 分别设置 60% (1 层 2 针)、40% (1 层 3 针)、15% (1 层 4 针)和 5% (2 层 3 针)。在晴朗无云的上午 10:00—12:00, 用台湾 Hipoint 便携带手持式光谱测量仪测定 5 种处理的光照强度[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]分别为 100% (1 384.39±18.45)、60% (830.23±16.47)、40% (558.11±9.63)、15% (210.52±8.73)和 5% (68.64±5.21), 将楠木幼苗置于不同光照强度的遮荫网室中培养。

1.2.2 苗木栽植与外源硅添加

本试验周期为 2021 年 4 月至 2022 年 5 月, 2021 年 4 月上旬, 选择苗高(27.5±1.3) cm、地径(1.5±0.23) mm 大致相同, 长势较好的楠木 1 a 生幼苗 200 株移植入花盆中, 盆栽规格为直径 20.0 cm, 高 15.0 cm, 每盆装土 3.00 kg, 缓苗 1 个月后, 选择长势良好、大小相对一致的楠木盆栽幼苗 100 盆移入不同光照遮荫网室中, 采用水溶性硅肥(SiO₂含量≥50%)按 0 (Si₀)、1 000 (Si₁)、2 000 (Si₂)和

4 000 mg/kg (Si3) 4 个处理梯度^[19-20], 将硅肥溶于 1 000 mL 蒸馏水后进行盆栽土喷施处理, 试验过程中不再施肥, 定期松土、除草, 定量浇水, 定期对盆栽进行随机调整, 保证其处于基本相同的光环境下, 进行持续的培养观察, 1 a 后进行苗高、地径、生物量、叶形态指标和光合参数的测定。

1.2.3 苗木形态指标的测定

2022 年 5 月, 利用卷尺测量幼苗苗高, 利用电子游标卡尺测量幼苗地径, 在每株幼苗取 3 片相同叶位处且生长状况良好的叶片, 置于标准计算纸上拍照, 采用 ImageJ 软件测量叶长、叶宽, 并计算单叶面积(LA, mm²)。而后将其整株挖出洗净, 分成根、茎、叶 3 部分, 于 105 °C 下杀青 0.5 h 后在 65 °C 下烘干至恒重, 称量各部分干重, 并计算总生物量和根、茎、叶生物量。

1.2.4 光合指标测定

叶绿素含量测定 称取 0.1 g 新鲜叶片采用 95%乙醇浸提法提取叶绿素。用酶标仪分别测定叶绿素 a (Chl a, mg/g)、叶绿素 b (Chl b, mg/g) 和总叶绿素(Chl a+b, mg/g)含量。

叶绿素荧光参数 在晴朗无云的上午 9:00–11:00 选取与已测叶绿体色素一致的部位, 先进行 20 min 暗适应, 之后使用 Fluor Cams 叶绿素荧光仪, 测定幼苗的叶绿素荧光参数, 并计算 PSII 潜在光化学效率(F_v/F_o)和 PSII 最大光合量子产量(F_v/F_m)。

光合参数 在晴朗无云的上午 9:00–11:00, 采用 Li-6400XT 便携式光合仪, 对叶片气体交换参数进行测定, 包括净光合速率[P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、气孔导度[G_s , $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、蒸腾速率[T_r , $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、胞间 CO₂ 浓度[C_i , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

1.3 数据的统计分析

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 软件进行统计和方差分析, 使用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果和分析

2.1 硅添加对幼苗形态指标的影响

由表 1 可见, 未添加硅时, 楠木幼苗苗高增长量在 40%光照强度下达到最大值并显著高于其他光照强度, 而地径增长量则无显著差异, 随着光照强度下降, 幼苗全株干重和各器官干重均有不同程度的上升, 在 15%~60%光照强度下的全株干重和各器官干重均显著高于全光照强度。Si1 处理下, 15%~

60%光照强度下的楠木苗高增长量和 60%光照强度下地径增长量均显著高于全光照强度; Si2 处理下, 40%~60%光照强度下的苗高增长量显著高于全光照强度, 而地径增长量则在 5%~15%光照强度下显著高于其他光照强度; Si1 和 Si2 处理下, 15%~60%光照强度下的全株干重和各器官干重均显著高于全光照强度; Si3 处理下, 各光照强度下的苗高增长量无显著差异, 而 5%~60%光照强度下的地径增长量均显著高于全光照强度, 15%~40%光照强度下的全株干重和各器官干重均显著高于全光照强度。在相同光照强度下, Si1、Si2 处理的苗高和地径增长量均显著高于无硅添加, 当光照强度为 40%~60%时, Si1、Si2 处理的幼苗全株干重和各器官干重均显著高于未添加硅。可见, 遮荫和适度的硅添加有利于楠木幼苗苗高、地径的生长和植株生物量的积累。

由图 1 可见, 未添加硅时, 叶长、叶宽、叶面积均在 15%光照强度达到最大值并显著高于其他光照强度处理。添加硅后, 在硅添加量相同时, 除光照强度为 5%之外, 随着光照强度的下降, 幼苗的叶长、叶宽和叶面积均高于全光照强度, 总体表现为上升趋势; Si1 处理下, 叶长和叶面积均在 15%光照强度下达到最大值并显著高于其他光照强度处理, 叶宽在 15%、60%光照强度下显著高于其他光照强度; Si2 处理下, 叶宽在 15%、40%光照强度下显著高于其他光照强度; Si3 处理下, 叶长在 15%光照强度下显著高于其他光照强度。当光照强度为 100%、40%、15%时, 叶长在 Si1、Si2 处理后显著高于未添加硅处理; 除光照强度为 5%外, 叶宽在 Si1、Si2 处理后显著高于未添加硅处理; 除光照强度为 60%外, 叶面积在 Si1 处理后显著高于未添加硅处理, 表明光照强度的降低有利于叶片的生长, 而硅添加对幼苗叶形态产生了明显的影响, 在中低光照强度(15%~40%)下进行 Si1、Si2 处理的楠木具有更好的光照胁迫适应能力, 可见, 遮荫与硅添加有利于促进楠木幼苗叶片生长。

2.2 硅添加对幼苗叶绿素含量的影响

由图 2 可见, 未添加硅时, Chl a、Chl b 含量均以 60%光照强度下显著高于其他光照强度, Chl a+b 含量则以 15%光照强度下显著高于其他光照强度。在硅添加量相同时, 随着光照强度的下降, 幼苗叶片 Chl a、Chl b 和 Chl a+b 含量均表现为先上升后下降; Si1、Si2 处理下, Chl a、Chl b 含量均在 15%~60%光照强度下显著高于全光照(100%)和

表 1 外源硅添加对不同光照强度下楠木幼苗生长和生物量的影响

Table 1 Effect of exogenous Si addition on growth and biomass related indexes of *Phoebe bournei* seedlings under different light intensities

光照强度 Light intensity	硅 Silicon	苗高 (cm) Seedling height	地径 (mm) Ground diameter	全株干重 (g) Plant dry weight	叶干重 (g) Leaf dry weight	茎干重 (g) Stem dry weight	根干重 (g) Root dry weight
100%	Si0	13.31±0.49Bb	3.68±0.10Ab	10.25±0.10Eb	3.39±0.19Cb	4.39±0.14Cb	2.47±0.05Db
	Si1	15.04±0.34Ba	4.57±0.09Ba	11.72±0.41Ea	4.18±0.31Da	5.01±0.10Ca	2.52±0.19Db
	Si2	14.54±0.48Ca	4.41±0.10Ba	11.96±0.30Ea	4.23±0.06Da	4.91±0.25Da	2.82±0.05Ca
	Si3	13.52±0.49Ab	3.48±0.08Cb	11.87±0.10Da	3.88±0.19Ca	5.15±0.20Da	2.84±0.11Da
60%	Si0	14.58±0.49Bc	3.81±0.09Ac	13.06±0.50Cc	4.80±0.26Bb	5.38±0.38Bb	2.88±0.20Cb
	Si1	22.81±0.43Aa	5.83±0.11Aa	14.70±0.33Cb	5.05±0.19Cb	6.17±0.25Ba	3.47±0.09Ba
	Si2	20.35±0.38Bb	4.85±0.10Bb	15.63±0.16Ca	5.61±0.32Ca	6.44±0.07Ba	3.58±0.29Ba
	Si3	14.51±0.38Ac	4.98±0.09Bb	14.09±0.10Cb	4.74±0.41Bb	6.03±0.21Ca	3.32±0.11Ca
40%	Si0	18.84±0.42Ab	4.20±0.07Ad	17.49±0.16Bc	6.09±0.25Ab	7.55±0.31Ab	3.85±0.24Bb
	Si1	25.62±0.31Aa	4.57±0.09Bc	19.04±0.12Bb	6.47±0.65Bb	8.20±0.39Aa	4.37±0.21Aa
	Si2	24.75±0.38Aa	5.32±0.11Bb	19.68±0.17Ba	6.97±0.09Ba	8.34±0.45Aa	4.37±0.34Aa
	Si3	15.05±0.49Ac	5.97±0.08Aa	17.85±0.26Ac	6.56±0.27Aab	7.60±0.27Bb	3.68±0.11Bb
15%	Si0	12.22±0.56Bc	4.51±0.08Ac	19.16±0.14Ab	6.48±0.56Ab	8.10±0.34Aa	4.58±0.31Aa
	Si1	21.34±0.45Aa	4.92±0.09Bb	20.04±0.18Ab	7.27±0.20Aab	8.29±0.19Aa	4.48±0.11Aa
	Si2	14.81±0.41Cb	7.31±0.10Aa	21.13±0.45Aa	7.67±0.41Aa	8.86±0.46Aa	4.60±0.62Aa
	Si3	14.14±0.47Ab	4.72±0.08Bb	19.95±0.79Bb	6.92±0.60Aab	8.38±0.41Aa	4.65±0.14Aa
5%	Si0	13.35±0.39Bd	3.72±0.09Ac	11.66±0.24Dc	4.25±0.09Ba	5.00±0.32Bb	2.40±0.03Db
	Si1	17.08±0.44Ba	3.90±0.08Bc	12.63±0.06Db	4.19±0.22Da	5.41±0.22Ca	3.02±0.09Ca
	Si2	15.90±0.54Cb	6.74±0.10Aa	13.11±0.29Da	4.52±0.38Da	5.65±0.29Ca	2.95±0.34Ca
	Si3	14.52±0.44Ac	5.27±0.10Bb	12.02±0.10Dc	4.24±0.27BCa	4.98±0.11Dab	2.80±0.14Da

同列数据后不同大写、小写字母分别表示不同光照强度和不同硅肥添加处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Data followed different capital and small letters indicate significant differences at 0.05 level among different light intensity, and different silicon fertilizer addition treatments. The same below

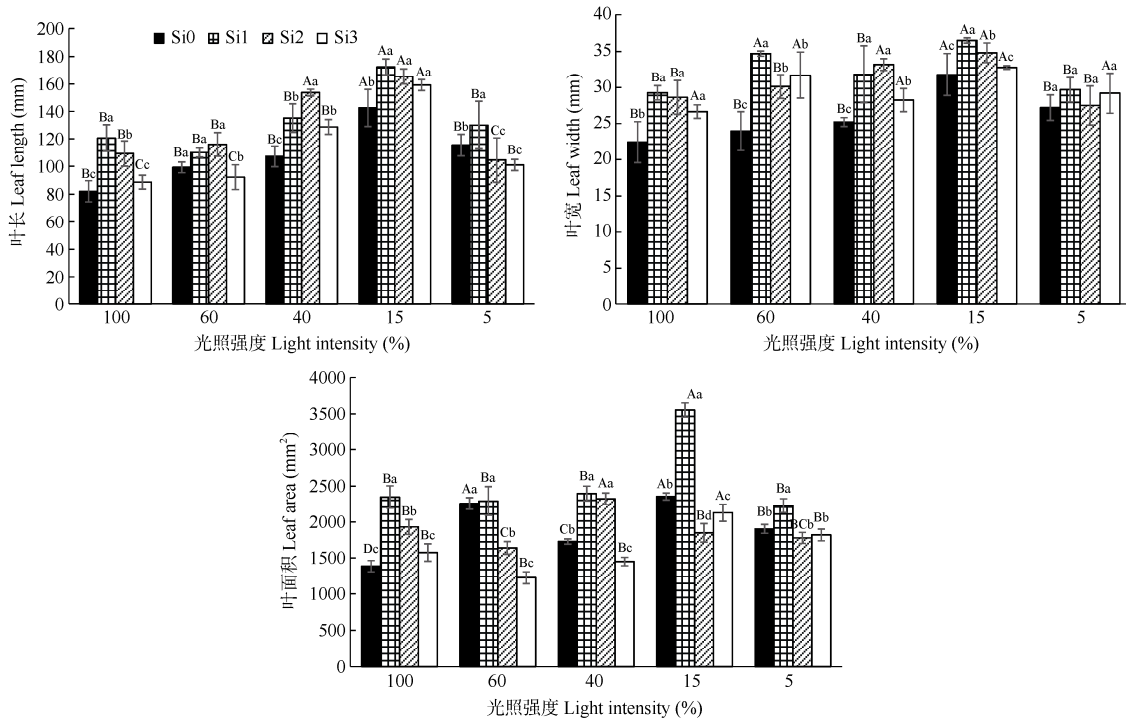


图 1 外源硅添加楠木幼苗叶形态的影响

Fig. 1 Effect of exogenous silicon addition on leaf morphology of *Phoebe bournei* seedlings under different light intensities

5%光照强度, Chl a+b 含量在 40%~60%光照强度下显著高于全光照(100%)和5%光照强度; Si3 处理下, Chl a、Chl b 均在 15%~40%光照强度下显著高于全光照(100%)和 5%光照强度。在相同的光照强度下, 除 100%全光照处理, 随硅添加量的增加, Chl a 含量均显著高于未添加硅处理; 当光照强度为 15%~40%时, 随硅添加量的增加, Chl b 含量均显著高于

未添加硅处理; 当光照强度为 40%~100%时, 随硅添加量的增加, Chl a+b 含量均显著高于未添加硅处理, Chl a、Chl b 与 Chl a+b 含量均在 40%光照强度和 Si2 处理下最大。这表明光照强度的降低有利于楠木幼苗叶片叶绿素的积累, 在中低光照强度(15%~40%)下, Si2 和 Si3 处理进一步促进了叶绿素的积累, 使楠木幼苗更适应光照胁迫。

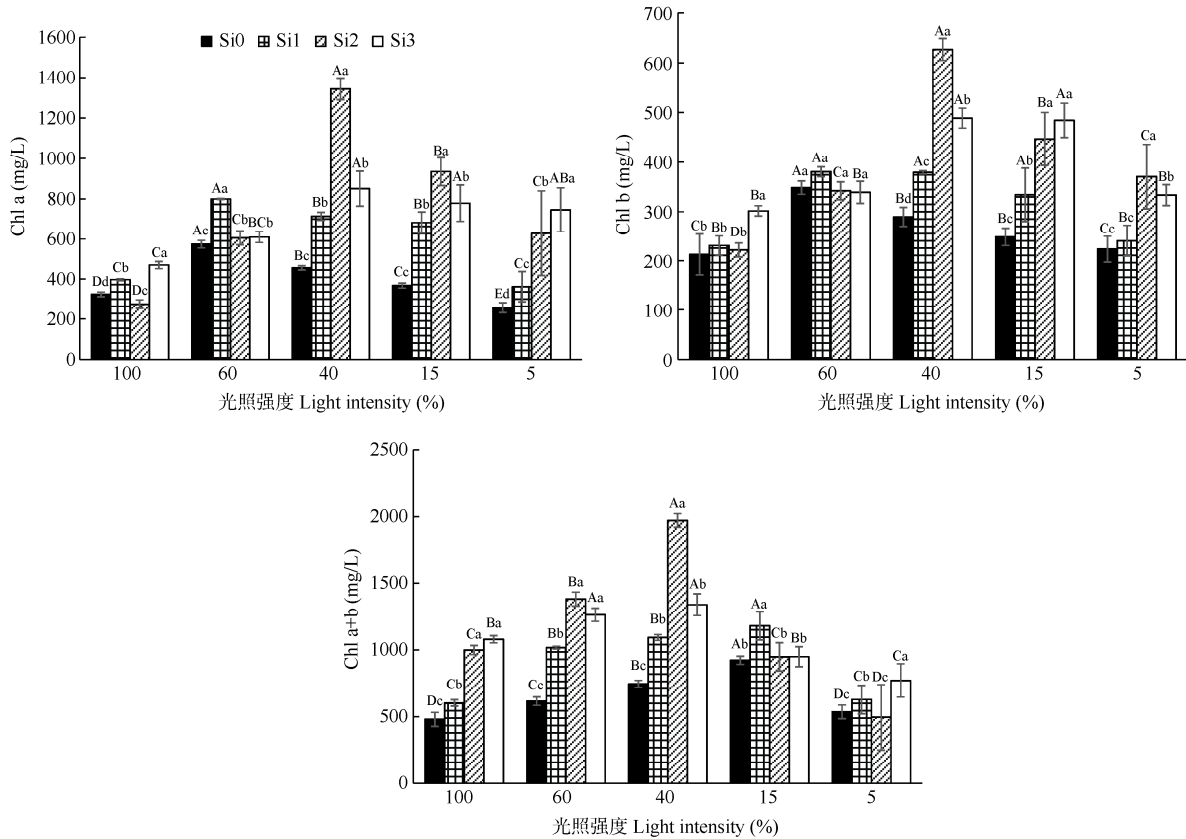


图 2 外源硅添加对楠木幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of exogenous silicon addition on chlorophyll content of leaves of *Phoebe bournei* seedlings under different light intensities

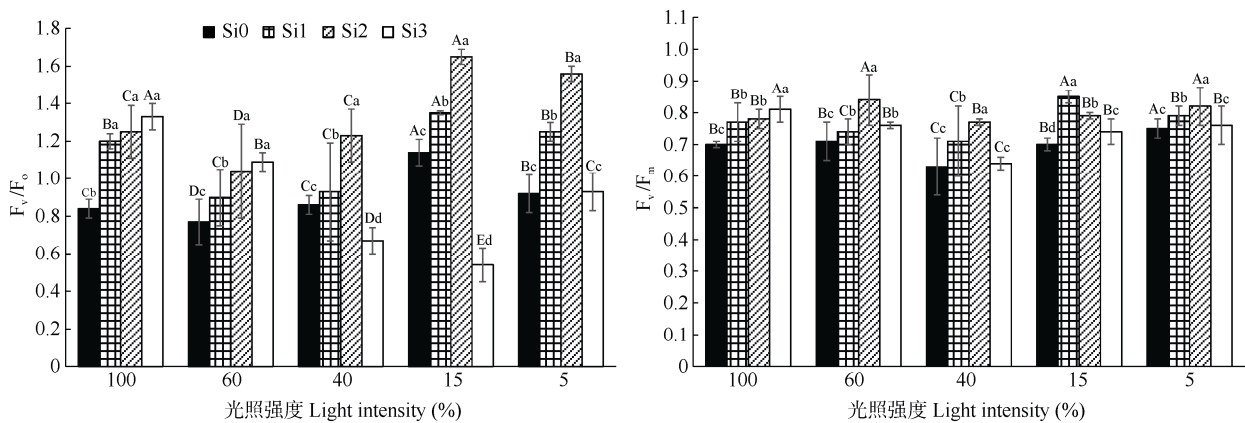


图 3 外源硅添加对楠木幼苗叶片 F_v/F_o 、 F_v/F_m 的影响

Fig. 3 Effect of exogenous silicon addition on F_v/F_o and F_v/F_m in leaves of *Phoebe bournei* seedlings under different light intensities

2.3 硅添加对幼苗叶绿素荧光参数的影响

由图 3 可见, 未添加硅时, 楠木幼苗叶片的 F_v/F_o 在 15%光照强度下显著高于其他光照强度, F_v/F_m 在 5%光照强度下显著高于其他光照强度。在硅添加量相同时, 随光照强度的降低, 幼苗叶片的 F_v/F_o 、 F_v/F_m 总体表现为先下降后上升; Si1 处理下, F_v/F_o 和 F_v/F_m 在 15%光照强度下显著高于其他光照强度, Si2 处理下, F_v/F_o 在 5%~15%光照强度下显著高于其他光照强度, F_v/F_m 在 5%和 60%光照强度下显著高于其他光照强度; Si3 处理下, F_v/F_o 和 F_v/F_m 在 100%全光照强度下显著高于其他光照强度。在相同的光照强度下, Si1 和 Si2 处理的 F_v/F_o 和 F_v/F_m 显著高于未添加硅处理。这表明中低光照强度有利于楠木幼苗叶绿素荧光参数的提高, Si1 和 Si2 处理则进一步提高了楠木幼苗在各光照强度的叶绿素荧光参数, 促进楠木幼苗的光合作用, 使之具有更好的光照胁迫适应能力。

2.4 硅添加对叶片光合参数的影响

由表 2 可见, 未添加硅时, 在 40%光照强度下的叶片 P_n 、 T_r 显著高于其他光照强度, 在 40%、5%光照强度下的 G_s 显著高于其他光照强度, 在

40%、60%光照强度下的 C_i 浓度显著低于其他光照强度。在硅添加量相同时, 随光照强度的降低, 幼苗叶片的 P_n 呈先上升后下降的变化; Si1 处理下, 在 40%光照强度下的 P_n 显著高于全光照强度, 而 G_s 、 T_r 、 C_i 均显著低于全光照; Si2 处理下, 在 40%光照强度下的 P_n 、 G_s 、 T_r 显著高于全光照, C_i 显著低于全光照, G_s 、 T_r 、 C_i 与全光照无显著差异。在相同的光照强度下, 5%~60%光照强度下进行 Si1、Si2 处理的 P_n 均显著高于未添加硅处理。这表明 40%的光照强度有利于提高楠木幼苗叶片 P_n 、 G_s 和 T_r , 降低 C_i , 促进楠木幼苗光合能力的提高, 而 Si1 和 Si2 处理则进一步提高不同光照强度下的楠木幼苗叶片 P_n , 从而提高了楠木幼苗光照胁迫适应能力。

2.5 交互效应分析

不同光照强度下添加外源硅, 研究对楠木幼苗生长及光合性状的影响, 双因素方差分析结果表明(表 3), 除叶干重与茎干重不受光照强度×外源硅添加的显著影响外, 其他生长及光合性状均受光照强度和外源硅添加双因素及其交互效应的显著或极显著影响($P<0.05$)。

表 2 硅添加和光照强度对楠木叶片气体交换参数的影响

Table 2 Effects of silicon addition and light intensities on the gas exchange parameters of *Phoebe bournei* leaves

光照强度 Light intensity	硅水平 Silicon	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	G_s [$\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	C_i [$\mu\text{mol}/(\text{mol}\cdot\text{s})$]
100%	Si0	3.29±0.24Cd	0.14±0.00Bb	2.23±0.02Cb	391.43±3.04Ab
	Si1	5.94±0.08Ba	0.34±0.02Aa	4.32±0.15Aa	403.36±1.39Aa
	Si2	3.92±0.10Cb	0.11±0.00Cc	1.78±0.05Dc	374.71±4.03Ac
	Si3	3.48±0.09Cc	0.15±0.04Ab	2.39±0.45Ab	395.88±7.53Ab
60%	Si0	4.40±0.68Bc	0.14±0.03Bb	2.32±0.44Cb	381.11±4.03ABa
	Si1	5.18±0.12Cb	0.10±0.00Cc	1.74±0.03Cc	346.94±2.69Bc
	Si2	9.05±0.22Aa	0.41±0.01Aa	5.40±0.05Aa	380.57±1.63Aa
	Si3	3.66±0.06Cd	0.08±0.01Bc	1.48±0.18Bc	360.58±10.49Bb
40%	Si0	5.47±0.25Ac	0.17±0.03Aa	2.96±0.41Ba	366.90±11.95Bb
	Si1	7.74±0.33Aa	0.16±0.02Ba	4.13±0.48Aa	338.04±13.42Bc
	Si2	6.07±0.17Bb	0.16±0.01Ba	2.91±0.20Ba	359.07±6.77Bb
	Si3	3.79±0.34Bd	0.17±0.03Aa	2.99±0.47Aa	385.14±10.80Aa
15%	Si0	3.74±0.01Cc	0.10±0.02Ca	1.87±0.29Cb	359.64±10.72Ca
	Si1	4.35±0.53Db	0.09±0.01Cb	1.78±0.25Cb	346.66±20.55Ba
	Si2	5.58±0.52Ba	0.13±0.01Ca	2.35±0.19Ca	348.81±13.99Ba
	Si3	4.91±0.07Ab	0.06±0.00Bb	1.33±0.05Bc	298.48±4.07Cb
5%	Si0	3.42±0.06Cd	0.20±0.03Aa	2.75±0.28Aa	394.30±4.63Aa
	Si1	4.62±0.32Db	0.06±0.00Dc	1.12±0.02Dc	296.05±10.92Cc
	Si2	5.86±0.20Ba	0.16±0.02Bb	2.71±0.28Bb	363.54±8.88Bb
	Si3	3.95±0.32Bc	0.08±0.01Bc	1.46±0.10Bc	352.74±8.70Bb

P_n : 净光合速率; G_s : 气孔导度; T_r : 蒸腾速率; C_i : 胞间 CO_2 浓度。下同

P_n : Net photosynthetic rate; G_s : Somatal conductance; T_r : Transpiration rate; C_i : Intercellular CO_2 concentration. The same below

表 3 硅添加和光强对楠木幼苗生长和光合性状的方差分析

Table 3 Variance analysis of silicon addition and light intensities on growth traits and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings

性状 Character	光照强度 (A) Light intensity		外源硅添加 (B) Exogenous silicon addition		A×B		
	F	P	F	P	F	P	
生长性状 Growth character	苗高 Seedling height	328.6	<0.01	795.0	<0.01	87.9	<0.01
	地径 Ground diameter	340.8	<0.01	904.4	<0.01	243.4	<0.01
	全株干重 Plant dry weight	1 868.9	<0.01	112.4	<0.01	3.8	<0.01
	叶干重 Leaf dry weight	202.7	<0.01	14.7	<0.01	1.1	0.42
	茎干重 Stem dry weight	358.5	<0.01	18.2	<0.01	1.6	0.15
	根干重 Root dry weight	150.7	<0.01	9.5	<0.01	2.4	<0.05
	叶长 Leaf Length	1 751.5	<0.01	516.6	<0.01	79.5	<0.01
	叶宽 Leaf width	22.6	<0.01	26.8	<0.01	3.0	<0.01
	叶面积 Leaf area	2 403.0	<0.01	6 297.7	<0.01	1 000.3	<0.01
光合性状 Photosynthetic character	Chl a	603 537.2	<0.01	563 198.5	<0.01	160 451.3	<0.01
	Chl b	131 730.9	<0.01	112 228.2	<0.01	25 023.3	<0.01
	Chl	1 304 203.3	<0.01	1 170 407.1	<0.01	302 059.5	<0.01
	P _n	61.1	<0.01	200.9	<0.01	53.1	<0.01
	G _s	49.6	<0.01	47.3	<0.01	67.8	<0.01
	C _i	53.2	<0.01	31.4	<0.01	19.8	<0.01
	T _r	29.3	<0.01	45.8	<0.01	56.0	<0.01
	F _v /F _o	3 109.3	<0.01	10 843.7	<0.01	2 704.2	<0.01
	F _v /F _m	337.0	<0.01	530.1	<0.01	69.9	<0.01

F_v/F_o: PSII 潜在光化学效率; F_v/F_m: PSII 最大光合量子产量。

F_v/F_o: Potential photochemical efficiency of PSII; F_v/F_m: Maximum photosynthetic quantum yield of PSII.

3 讨论和结论

遮荫有利于幼苗苗高和地径的增长, 促进幼苗的生物量累积, 在遮荫条件下, 幼苗通过增加叶片生物量来保持各器官的正常生长, 根系生物量的累积也会随之增加, 从而为幼苗的生长发育提供了保障^[21]。而叶片作为最容易受光照影响的器官, 在不同光环境下, 植物叶片能够通过不同的方式调控其光合性能^[22-23]。本研究中, 遮荫处理下的楠木幼苗叶形态指标高于全光照, 表明高光照使楠木幼苗的叶片形态呈受抑制状态, 而遮荫处理有利于楠木幼苗叶形态生长, 这与楠木本身耐荫的生物学特性一致, 也与人^[16,24]的研究结果相似。在遮荫和添加硅后, 楠木幼苗的苗高、地径、叶形态和生物量均有不同程度的增加, 苗高和叶形态在 Si1、地径和生物量在 Si2 添加水平下达到最大值, 显著高于未添加硅处理, 交互效应分析进一步表明了硅添加可以有效地提高楠木幼苗的光照胁迫适应能力, 促进幼苗生长。

本研究中, 未添加外源硅时, 楠木幼苗的叶绿

素含量随着光照强度的降低表现为先上升后下降的变化, 在遮荫条件下, 楠木幼苗的 Chl a、Chl b、Chl a+b 含量在 40%光照强度时达到最大值, 可能是遮荫一方面使叶片中的色素减少, 促使叶片中的叶绿素含量增加, 另一方面, 遮荫使幼苗周围环境气温下降, 气温的降低提高了叶绿素生物合成中相关酶的活性, 进而促进叶绿素含量的增加, 这与唐星林等^[11,25]的研究结果相似。楠木幼苗叶片 F_v/F_o、F_v/F_m 在 5%~15%光照强度下最大, 没有发生光抑制现象, 体现了一定的光合可塑性, 表明适当的遮荫处理有利于提高植物潜在光合活性, 增强光合能力; 楠木幼苗叶片 P_n、G_s、T_r 在 40%光照强度时达到最大, 显著高于全光照, 而 C_i 较低且显著低于全光照, 这表明随着光照强度的降低, 幼苗叶片气孔导度增大, 光合作用增强, 从而降低了胞间 CO₂ 浓度, 提高了净光合速率, 这与施福军等^[18]的研究结果一致。而在添加外源硅后, 楠木幼苗在中低光照强度下的各叶绿素含量、F_v/F_o、F_v/F_m、净光合速率均显著高于未添加硅, 这表明中低硅添加缓解了全光照对楠木幼苗总叶绿素含量的显著抑制作用, 促

进了中低光照强度下的 Chl a、b 含量的提高,减轻了光照胁迫所带来的伤害。硅添加增加或维持了楠木幼苗光合作用所需叶片的气孔导度,增强了捕获光照的能力进而提高了净光合速率,这与前人^[26-27]的研究结果基本一致。交互效应分析则进一步表明,遮荫与外源硅添加对楠木幼苗的各光合性状参数均产生了显著影响,由此可见,在遮荫条件下添加外源硅能够提高楠木幼苗叶片中的叶绿素含量,改善光合气体交换,保证 CO₂ 供应,提高光合效率。

综上,本研究结果表明楠木作为耐荫树种,遮荫和添加硅肥对楠木幼苗的生长性状和光合特性均有明显影响,遮荫条件下,40%的光照强度更适宜楠木幼苗的生长,而 1 000~2 000 mg/kg 的硅添加则进一步促进了楠木幼苗生长,提高了楠木幼苗的光照适应能力。因受试验时长与条件的限制,试验未对楠木幼苗受光照强度和硅肥的长效影响以及幼苗体内不同器官硅富集程度的变化做进一步研究,后续研究中,拟针对硅添加对楠木幼苗处于不同生长和胁迫环境下的光合作用影响机制、内部生理变化机理以及体内硅含量的动态变化做进一步的深入研究,以提高硅肥施用的生产实用性与理论价值。

参考文献

- [1] ASH D, PATTNAIK D, PANDA D, et al. Effect of low light stress on leaf chlorophyll a, b, a+b, a/b, catalase, peroxidase, SOD and yield of long duration rice varieties (*Oryza sativa* L.) [J]. *Int J Plant Soil Sci*, 2022, 34(22): 184–193. doi: 10.9734/ijpss/2022/v34i2231371.
- [2] SHI K, LI Z, ZHANG W J, et al. Influence of different light intensity on the growth, diurnal change of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of tung tree seedling [J]. *J CS Univ For Technol*, 2018, 38(8): 35–42. [石凯, 李泽, 张伟建, 等. 不同光照对油桐幼苗生长、光合日变化及叶绿素荧光参数的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(8): 35–42. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.08.006.]
- [3] ZHU Y M, LI T, SUN D G, et al. Effect of shading on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of seedlings of eight mangrove species [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2023, 31(6): 797–804. [朱一民, 李婷, 孙当歌, 等. 遮荫对 8 种红树植物幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(6): 797–804. doi: 10.11926/jtsb.4676.]
- [4] SHIRKE P A, PATHRE U V. Diurnal and seasonal changes in photosynthesis and photosystem 2 photochemical efficiency in *Prosopis juliflora* leaves subjected to natural environmental stress [J]. *Photosynthetica*, 2003, 41(1): 83–89. doi: 10.1023/A:1025864513663.
- [5] LI X G, MENG Q W, ZHAO S J. Photoinhibition and photoprotection mechanisms in *Ginkgo biloba* leaves under strong light stress [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, 40(3): 56–59. [李新国, 孟庆伟, 赵世杰. 强光胁迫下银杏叶片的光抑制及其防御机制 [J]. *林业科学*, 2004, 40(3): 56–59. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2004.03.009.]
- [6] QI L Y, WU F, WU R X, et al. Effects of shading and different forms of nitrogen fertilization on the growth of *Pinus koraiensis* seedlings [J]. *For Eng*, 2019, 35(4): 1–5. [祁鲁玉, 吴峰, 吴瑞雪, 等. 遮荫和不同形态氮素施肥对红松幼苗生长的影响 [J]. *森林工程*, 2019, 35(4): 1–5. doi: 10.16270/j.cnki.slgc.2019.04.001.]
- [7] TANG Y, YANG P R, LÜ N N, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Cunninghamia lanceolata* seedlings [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2023, 29(5): 1084–1092. [唐银, 杨培蓉, 吕宁宁, 等. 遮荫对杉木幼苗生长及光合特性的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(5): 1084–1092. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2022.06037.]
- [8] SONOBE K, HATTORI T, AN P, et al. Diurnal variations in photosynthesis, stomatal conductance and leaf water relation in *Sorghum* grown with or without silicon under water stress [J]. *J Plant Nutr*, 2009, 32(3): 433–442. doi: 10.1080/01904160802660743.
- [9] NAZ R, BATOOL S, SHAHID M, et al. Exogenous silicon and hydrogen sulfide alleviates the simultaneously occurring drought stress and leaf rust infection in wheat [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2021, 166: 558–571. doi: 10.1016/J.PLAPHY.2021.06.034.
- [10] KAYA C, TUNA L, HIGGS D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions [J]. *J Plant Nutr*, 2006, 29(8): 1469–1480. doi: 10.1080/01904160600837238.
- [11] TANG X L, JIANG J, JIN H P, et al. Effects of shading on chlorophyll content and photosynthetic characteristics in leaves of *Phoebe bournei* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30(9): 2941–2948. [唐星林, 姜姜, 金洪平, 等. 遮荫对闽楠叶绿素含量和光合特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 2941–2948. doi: 10.13287/j.1001-9332.201909.002.]
- [12] AN C R, WEI X L, YE J J, et al. Effect of low temperature on morphology and physiology characteristics of *Phoebe bournei* seedlings [J]. *J W China For Sci*, 2018, 47(3): 96–101. [安常蓉, 韦小丽, 叶嘉俊, 等. 低温胁迫对闽楠幼苗形态及生理特性的影响 [J]. *西部林业科学*, 2018, 47(3): 96–101. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2018.03.017.]
- [13] XU X D, CHEN Y B, LUO M X, et al. A study of the changes of photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* in different seasons [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2017, 39(5): 913–920. [徐晓迪, 陈永滨, 罗梅秀, 等. 闽楠不同季节光合特性日进程变化研究 [J]. *江西农业大学学报*, 2017, 39(5): 913–920. doi: 10.13836/j.jjau.2017118.]

- [14] SHENG J, CHEN Y H, WU J Y, et al. Study on photosynthetic characteristics of different families of *Phoebe bournei* at seedling stage [J]. J CS Univ For Technol, 2015, 35(6): 45–49. [盛杰, 陈月华, 吴际友, 等. 闽楠家系苗期光合特性的研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(6): 45–49. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.06.009.]
- [15] LI Z F, PAN J, WANG J D, et al. The effects of light environment on the growth and the phenotypic plasticity of the seedlings of *Phoebe bournei* [J]. J SW For Univ, 2014, 34(6): 65–69. [李肇锋, 潘军, 王金盾, 等. 光环境对闽楠幼树生长及其表型可塑性的影响 [J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(6): 65–69. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2014.06.011.]
- [16] 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 Agric Univ Jiangxi, 2014, 36(1): 109–114. [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. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2014.01.017.]
- [17] XU H D, XIONG J, CHENG X R, et al. Responses of leaf functional traits and biomass of *Quercus acutissima* and *Phoebe bournei* seedlings to light and fertilization [J]. Acta Ecol Sin, 2021, 41(6): 2129–2139. [徐海东, 熊静, 成向荣, 等. 麻栎和闽楠幼苗叶功能性状及生物量对光照和施肥的响应 [J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2129–2139. doi: 10.5846/stxb202007311998.]
- [18] SHI F J, SU C Q, WEI Y, et al. Effect of light and nitrogen interaction on photosynthetic physiological characteristics in leaves of *Phoebe bournei* seedlings [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2020, 40(4): 667–675. [施福军, 粟春青, 韦艺, 等. 光氮互作对闽楠幼苗叶片光合生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2020, 40(4): 667–675. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2020.04.0667.]
- [19] SHI C Y, SHA X M, MA D D, et al. On remediation of heavy metal cadmium contaminated soil with *Juniperus formosana* under the addition of exogenous silicon [J]. J Hangzhou Norm Univ (Nat Sci), 2019, 18(1): 46–52. [施辰阳, 沙旭明, 马丹丹, 等. 基于外源硅处理下刺柏对重金属镉污染土壤的修复治理研究 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2019, 18(1): 46–52. doi: 10.3969/j.issn.1674-232X.2019.01.010.]
- [20] ZHAO W Z, CHEN X D, DENG W P, et al. Effect of exogenous silicon treatment on pectin degradation of strawberry [J]. Plant Physiol J, 2021, 57(10): 1926–1936. [赵文哲, 陈修德, 邓文鹏, 等. 外源硅处理对草莓果实果胶物质降解的影响 [J]. 植物生理学报, 2021, 57(10): 1926–1936. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2021.0208.]
- [21] LIN Y, CHEN Z, YANG M, et al. Temporal and spatial variations of ecosystem photosynthetic parameters in arid and semi-arid areas of China and its influencing factors [J]. Chin J Plant Ecol, 2022, 46(12): 1461–1472. [林雍, 陈智, 杨萌, 等. 中国干旱半干旱区生态系统光合参数的时空变异及其影响因素 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(12): 1461–1472. doi: 10.17521/cjpe.2021.0426.]
- [22] CHEN C, LUO G Y, JIN Z X, et al. Effects of light intensities on leaf morphological structure, stoichiometry and non-structural carbohydrates of *Magnolia sinostellata* seedlings [J]. Chin J Ecol, 2023, 42(6): 1307–1315. [陈超, 罗光宇, 金则新, 等. 光照强度对景宁木兰幼苗叶片形态结构、化学计量特征和非结构性碳水化合物的影响 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1307–1315. doi: 10.13292/j.1000-4890.202306.009.]
- [23] XING H L, LIU T Y, ZHA S D J, et al. Effects of light and nitrogen addition on the tree growth, needle morphological and functions of *Picea koraiensis* saplings [J]. For Eng, 2022, 38(4): 1–9. [邢鸿林, 刘天义, 扎史都吉, 等. 光照与氮添加对红皮云杉幼树生长与叶形态功能的影响 [J]. 森林工程, 2022, 38(4): 1–9. doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2022.04.001.]
- [24] AN F, LI B Y, ZHONG Q L, et al. Effects of light intensity and nitrogen addition on the relationship between seedling growth and leaf traits of *Machilus pauhoi* [J]. J Fujian Norm Univ (Nat Sci), 2022, 38(5): 59–68. [安凡, 李宝银, 钟全林, 等. 光照强度和氮添加对刨花楠苗木生长与叶性状关系的影响 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 59–68. doi: 10.12046/j.issn.1000-5277.2022.05.008.]
- [25] TANG X L, LIU G Z, JIANG J, et al. Effects of shading on the chlorophyll fluorescence characteristics and light energy partitioning of one- and three-year-old *Phoebe bournei* seedlings [J]. Chin J Ecol, 2020, 39(10): 3247–3254. [唐星林, 刘光正, 姜姜, 等. 遮荫对闽楠一年生和三年生幼树叶绿素荧光特性及能量分配的影响 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3247–3254. doi: 10.13292/j.1000-4890.202010.013.]
- [26] SUN A, DENG H F, LIU H L, et al. The effects of drought stress on physicochemical Index of the seedling-stage ramie [J]. Acta Agrest Sin, 2016, 24(3): 577–580. [孙麇, 邓荟芬, 刘海林, 等. 干旱胁迫对苧麻苗期理化指标的影响 [J]. 草地学报, 2016, 24(3): 577–580. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2016.03.014.]
- [27] MAGHSOUDI K, EMAM Y, PESSARAKLI M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions [J]. J Plant Nutr, 2016, 39(7): 1001–1015. doi: 10.1080/01904167.2015.1109108.]