

引文格式: 韦兴兰, 井卉竹, 茶晓飞, 等. 白枪杆幼苗氮、磷、钾含量及化学计量特征对遮阴的响应[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(2): 130–136. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202210084](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202210084)

白枪杆幼苗氮、磷、钾含量及化学计量特征对遮阴的响应*

韦兴兰¹, 井卉竹¹, 茶晓飞², 郭焕仙¹, 张梅¹, 孙丽娟¹, 董琼^{1**}
(1. 西南林业大学, 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点试验室, 云南昆明 650224;
2. 云南省怒江州林业和草原局, 云南怒江 673199)

摘要:【目的】比较不同遮阴条件下白枪杆(*Fraxinus malacophylla*)幼苗氮(N)、磷(P)、钾(K)含量及化学计量特征对遮阴的响应规律, 为白枪杆的林下种植提供科学管理依据。【方法】以1年生白枪杆盆栽苗为材料, 设置4种遮阴处理(全光照、25%遮阴、50%遮阴和75%遮阴), 持续观察3个月, 然后测定白枪杆幼苗苗高与地径、各器官生物量、各器官N、P、K含量, 并分析N、P、K化学计量特征等指标。【结果】50%遮阴处理下, 叶N含量、茎和叶P含量、根和叶K含量最高; 75%遮阴处理下, 根和茎N含量最高, 且白枪杆幼苗P利用效率最高。白枪杆幼苗叶片的N、P、K分配比例均在75%遮阴处理下达到最大值。随着遮阴程度的增加, 白枪杆幼苗各器官内N、P、K积累量均呈先升高后降低的趋势, 且均在50%遮阴处理下达到最大值。【结论】本研究条件下, 全光照和过度遮阴均会显著影响白枪杆幼苗的生长, 而在50%遮阴处理下可以促进白枪杆幼苗的生长及其各器官N、P、K和生物量的积累。可见, 白枪杆幼苗具有一定的耐阴性, 适宜在50%遮阴环境下生长。

关键词: 白枪杆幼苗; 遮阴; 化学计量特征; 生物量

中图分类号: S792.410.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2024)02-0130-07

Responses of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Contents and Stoichiometric Characteristics of *Fraxinus malacophylla* Seedlings to Shading

WEI Xinglan¹, JING Huizhu¹, CHA Xiaofei², GUO Huanxian¹,
ZHANG Mei¹, SUN Lijuan¹, DONG Qiong¹

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2. Nujiang Forestry and Grassland Bureau, Nujiang 673199, China)

Abstract: [Purpose] To compare the contents of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) and stoichiometric characteristics of white lance pole (*Fraxinus malacophylla*) seedlings under different shade conditions in response to shading, providing a scientific management basis for understory

收稿日期: 2022-10-31

修回日期: 2024-04-25

网络首发日期: 2024-05-20

*基金项目: 国家自然科学基金项目(31260191); 云南省教育厅科学研究基金项目(2021J0166)。

作者简介: 韦兴兰(1997—), 女, 贵州安顺人, 在读硕士研究生, 主要从事森林培育研究。

E-mail: 2256026171@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 董琼(1973—), 男, 湖北云梦人, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复与保持研究。E-mail: dqyeam@swfu.edu.cn

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240520.0945.002>



planting of *F. malacophylla* seedlings. [Methods] One-year old *F. malacophylla* potted seedlings were used as materials, and four shading treatments (full light, 25% shading, 50% shading and 75% shading) were set up for three months, and then the height and diameter of *F. malacophylla* seedlings were measured, biomass of each organ, and N, P, and K contents of each organ were determined, and the stoichiometric characteristics of N, P, and K were analyzed. [Results] Under 50% shading treatment, N content in leaves, P content in stems and leaves, and K content in roots and leaves were highest; under 75% shading treatment, N content in roots and stems was highest, and P use efficiency was highest in *F. malacophylla* seedlings. The N, P, and K partitioning ratios in leaves of *F. malacophylla* seedlings all reached maximum values under the 75% shading treatment. With the increase of shading, N, P and K accumulation in all organs of *F. malacophylla* seedlings tended to increase and then decrease, and reaching a maximum value at 50% shading. [Conclusion] Under the conditions of this study, both full light and excessive shade affect the growth of *F. malacophylla* seedlings, while the growth of *F. malacophylla* seedlings and the accumulation of N, P, K and biomass in each organ of *F. malacophylla* seedlings can be promoted under 50% shading treatment. It can be seen that *F. malacophylla* seedlings have a certain degree of shading tolerance and are suitable for growth under 50% shading.

Keywords: *Fraxinus malacophylla* seedlings; shading; stoichiometric characteristics; biomass

弱光环境下植物捕获光能受限, 导致光合速率下降, 植物可通过提高叶绿素含量来提高光能捕获能力^[1-3]。西南地区海拔高, 自然光照强, 植物幼苗无法适应强光环境, 遮阴可有效降低太阳辐射和蓄热量, 增加空气湿度, 缓解强光照带来的伤害^[4-5]。氮(N)、磷(P)、钾(K)是植物生长发育的3种必需营养元素, 其生态化学计量特征可以反映出各元素在不同器官中的分配及相互关系, 同时也可作为判断植物生长限制元素和养分利用率的重要依据^[6-7]。马志良等^[8]研究发现: 适度遮阴可提高紫花苜蓿地上部分碳(C)、N、P、K的含量和利用效率; 顾洪涛等^[9]研究发现: 不同光照环境中, 耐阴植物可利用N、P分配进行调节, 进而影响总生物量和总N、P积累量, 这源于植物N、P利用策略的改变; 李冬林等^[10]研究发现: 遮阴对香果树幼苗的形态生长和生理指标产生显著影响, 随着遮阴强度的增加, 香果树幼苗单叶面积和比叶面积不断增大, 叶绿素和类胡萝卜素含量也不断增加。这些结果表明: 不同光照强度下, 植物通过调节生长、光合特性、营养元素积累和分配来适应光环境的变化^[11-13]。

白枪杆(*Fraxinus malacophylla*)为木樨科(Oleaceae)栲属(*Fraxinus*)落叶乔木, 树高约10 m, 树皮灰白色, 主要分布于云南和广西海拔500~1500 m的石灰岩山地中^[14]。白枪杆生长速度快,

造林成活率高, 可较好地适应滇东南石漠化环境, 是石漠化地区治理的优良阔叶树种^[15], 也因其木材可以做家具、根皮可入药而具有较好的产业前景^[16]。目前, 白枪杆幼苗相关研究主要集中在造林技术^[17]、激素和施肥对幼苗生长的影响以及生长特性和光合作用对水分的响应^[18-19]等方面, 有关其遮阴和生态化学计量特征方面的研究较少。因此, 本研究以1年生白枪杆幼苗为研究对象, 分析不同程度遮阴对其N、P、K积累和分配特征的影响, 并筛选适宜的田间栽培管理和养分管理条件, 为西南地区白枪杆幼苗培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省昆明市西南林业大学后山树木园(25°03'N, 102°46'E, 海拔约1800 m)。该试验地位于亚热带季风气候区, 霜期短, 气候温和, 光照充足; 年平均温度16.5℃, 年平均降水量1035 mm, 年平均相对湿度67%; 土壤为砖红壤, pH值为7.65, 有机质含量高, 排水良好。

1.2 试验材料

白枪杆1年生实生营养袋苗由云南省红河哈尼族彝族自治州建水县林业局提供, 苗高6~7 cm, 平均地径1.50 mm。供试材料先进行3个

月脱肥处理, 后于 2019 年 6 月将无病虫害、大小一致、生长状况良好的白枪杆实生苗移栽至直径 11 cm、高 15 cm 的无纺布袋中, 基质为 $V_{\text{腐殖质}}: V_{\text{红壤}}=1:2$, 每袋 1 株, 定期浇水。于 2019 年 7—12 月进行试验。

1.3 试验设计

设置 4 个遮阴处理 (由 SW-6023 照度计测得后换算成相对折光率), 分别为全光照 (遮阴率为 0)、25% 遮阴、50% 遮阴和 75% 遮阴, 每个处理 3 次重复, 每次重复 5 株苗, 共 60 株苗。选择平坦且无遮挡的空旷地表搭设遮阴棚, 其长×宽×高为 3.0 m×3.0 m×1.5 m。试验时统一进行除草和施肥管理。

1.4 样品采集及指标测定

于 2019 年 12 月末对白枪杆幼苗进行破坏性采样, 每个处理选出 6 株具有代表性的幼苗, 共采集 24 株幼苗样品。

1.4.1 生长指标的测定

在采集样品前, 用直尺测量苗高 (精确度 0.1 cm), 用游标卡尺测量地径 (精确度 0.01 mm)。将每个样品的根、茎、叶分开装入信封中带回实验室, 置于 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min, 后于 80 ℃ 条件下烘干至恒量, 分别记录其干质量即为各器官生物量。

1.4.2 N、P、K 含量的测定

用高速粉碎机将白枪杆根、茎、叶样品粉碎, 过 0.149 mm (100 目) 筛, 装入密封袋保存待测。白枪杆幼苗样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮后, N、P、K 含量分别采用奈氏比色法、钼锑抗比色法和火焰分光光度法测定^[20]。

1.5 数据统计与分析

根据白枪杆幼苗各器官生物量和 N、P、K 含量, 计算白枪杆幼苗 N、P、K 积累量和分配

比例。养分利用效率为单位养分所产生的生物量, 即利用效率 (g/mg)=白枪杆幼苗整株干质量 (g)/单株白枪杆幼苗 N (或 P 或 K) 养分积累量 (mg); 单株白枪杆幼苗各器官 N (或 P 或 K) 积累量 (mg)=白枪杆幼苗各器官干质量 (g)×白枪杆幼苗各器官 N (或 P 或 K) 含量 (mg/g)。各器官 N、P、K 积累量之和为单株积累量, 根据单株积累量计算出各器官的 N、P、K 分配比例。

采用 Excel 2010 整理和计算数据; 采用 Origin 2021 作图; 采用 SPSS 25.0 进行统计分析。运用单因素方差进行分析, 显著性检验采用 LSD 法, 检验的显著性水平定为 0.05。数据均以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 不同遮阴处理对白枪杆幼苗生长指标的影响

随着遮阴程度的增加, 白枪杆苗高、地径和生物量呈先上升后下降的趋势 (表 1)。50% 遮阴处理下, 白枪杆幼苗的苗高达到最大值, 且显著高于 75% 遮阴处理 ($P<0.05$), 其苗高增加 6.5 cm; 75% 遮阴处理下, 白枪杆幼苗的地径显著小于其他处理 ($P<0.05$), 且比 50% 遮阴处理减少 1.74 mm; 50% 遮阴处理下, 白枪杆幼苗茎、叶生物量均显著高于其他处理 ($P<0.05$), 较全光照 (CK) 处理分别增加 0.56 和 1.72 g; 75% 遮阴处理下, 白枪杆的地径、根和茎生物量均显著低于 CK 处理, 分别降低 1.9 mm、1.67 g 和 0.53 g。可见, 50% 遮阴处理有利于白枪杆幼苗生长, 而 75% 遮阴处理下白枪杆幼苗生长受到抑制。

2.2 不同遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 含量及积累量的影响

由图 1 可知: 白枪杆幼苗各器官的 N、P、K 含量在不同遮阴处理下具有显著差异 ($P<0.05$)。

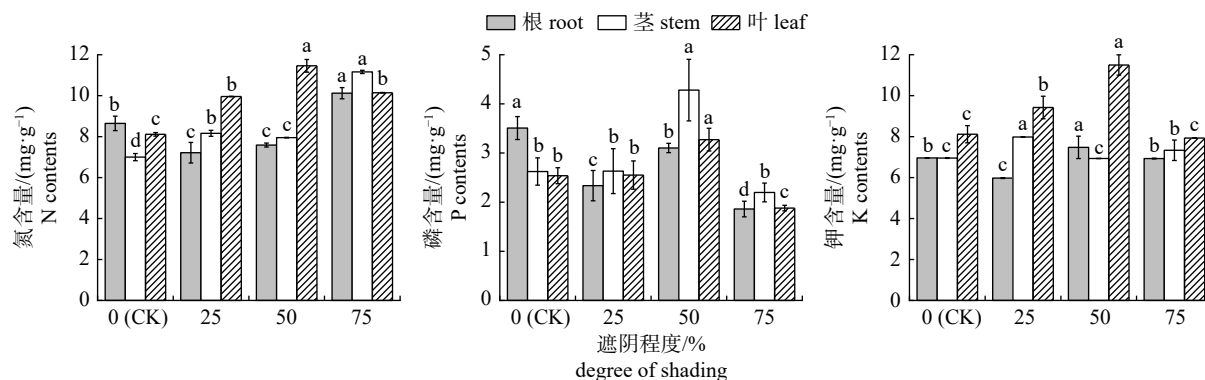
表 1 不同遮阴处理对白枪杆幼苗生长指标的影响

Tab. 1 Effects of different shading treatments on the growth indexes of *Fraxinus malacophylla* seedlings

遮阴程度/% degree of shading	苗高/cm seedling height	地径/mm ground diameter	生物量/g biomass		
			根 root	茎 stem	叶 leaf
0 (CK)	17.82±5.08 ab	4.17±0.95 a	1.94±0.94 a	0.76±0.34 b	1.10±0.47 c
25	16.70±3.07 b	3.97±0.55 a	2.03±0.33 a	0.81±0.17 b	2.11±0.37 b
50	21.52±2.84 a	4.01±0.59 a	2.13±0.66 a	1.32±0.32 a	2.82±0.79 a
75	15.02±2.52 b	2.27±0.32 b	0.27±0.07 b	0.24±0.08 c	0.86±0.22 c

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 下同。

Note: In the same column, different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$); the same as below.



注: 不同小写字母表示相同器官、不同处理间差异显著 ($P<0.05$); 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments for the same organ; the same as below.

图1 不同遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 含量的影响

Fig. 1 Effects of different shading treatments on the N, P and K content in *Fraxinus malacophylla* seedlings

叶 N 含量在 50% 遮阴处理下最高, 为 11.46 mg/g, 根和茎的 N 含量在 75% 遮阴处理下较高, 分别为 10.12 和 11.16 mg/g。50% 遮阴处理下, 茎和叶的 P 含量显著高于其他遮阴处理 ($P<0.05$), 分别为 4.28 和 3.27 mg/g; 根和叶的 K 含量也显著高于其他遮阴处理 ($P<0.05$), 分别为 7.47 和 11.49 mg/g。

由图 2 可知: 白枪杆幼苗 N、P、K 总积累量变化趋势一致, 均表现为先增加后减少, 50% 遮阴处理时达到峰值。白枪杆幼苗茎和叶的 N 积累量与总积累量变化趋势一致, 最大积累量分别为 10.51 和 32.42 mg。白枪杆幼苗茎和叶的 P 积累量与总积累量变化趋势一致, 最大积累量分别为 5.64 和 9.25 mg; 根的 P 积累量呈降低—升高—降低的趋势, 全光照时积累量最高, 为 6.80 mg。白枪杆根、茎、叶的 K 积累量与总积累量变化趋势一致, 均在 50% 遮阴处理达到峰值, 最大积累量分别为 16.16、9.16 和 32.49 mg。

2.3 不同遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 化学计量特征的影响

由图 3 可知: 遮阴处理显著影响白枪杆幼苗的 N:P、K:P 和 N:K ($P<0.05$)。75% 遮阴处理下, 白枪杆幼苗各器官的 N:P、K:P 和 N:K 均达到最大值。白枪杆幼苗根的 N:P 和 K:P 呈升高—降低—升高的趋势, N:K 呈先降低后升高的趋势; 茎的 N:P 和 K:P 呈升高—降低—升高的趋势, N:K 呈逐渐升高的趋势; 叶的 N:P、N:K 和 K:P 均呈升高—降低—升高的趋势。与全光照 (CK) 相比, 75% 遮阴显著增加各器官的 N:P、K:P 和 N:K。可见, 75% 遮阴处理下, 白枪杆幼苗各器官的化学计量比均最高, N:P 在不同器官中的表现为根>叶>茎, N:K 在不同器官中的表现为茎>根>叶, K:P 在不同器官中的表现为叶>根>茎。

2.4 遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 分配的影响

由图 4 可知: 随着遮阴程度的增加, N、P、

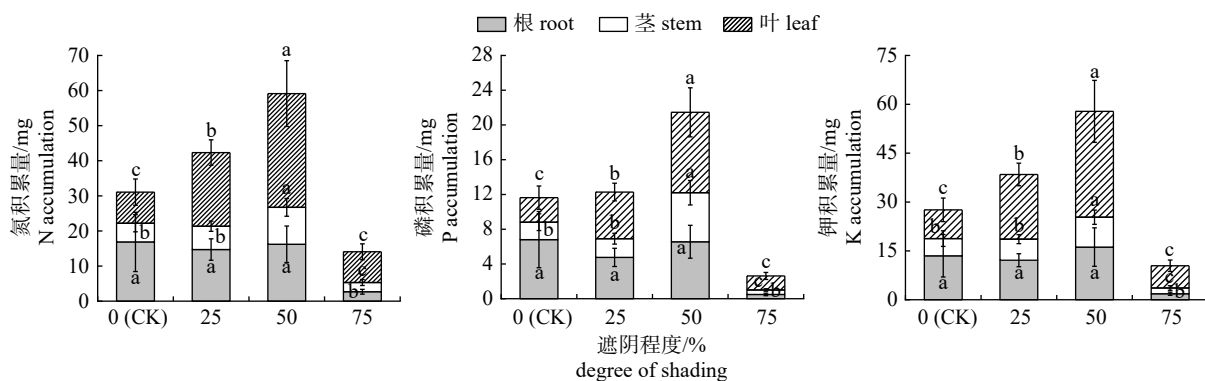


图2 不同遮阴处理对单株白枪杆幼苗 N、P、K 积累量的影响

Fig. 2 Effects of different shading treatments on the N, P and K accumulation in *F. malacophylla* seedlings per plant

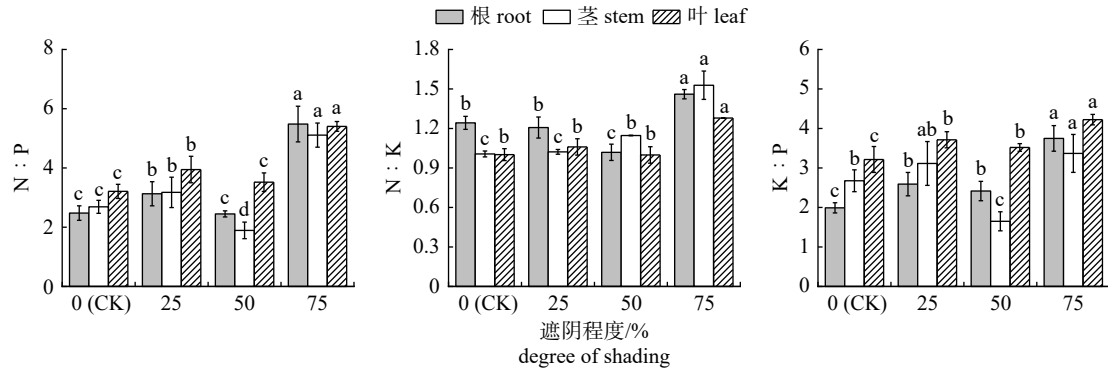


图 3 不同遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 化学计量特征的影响

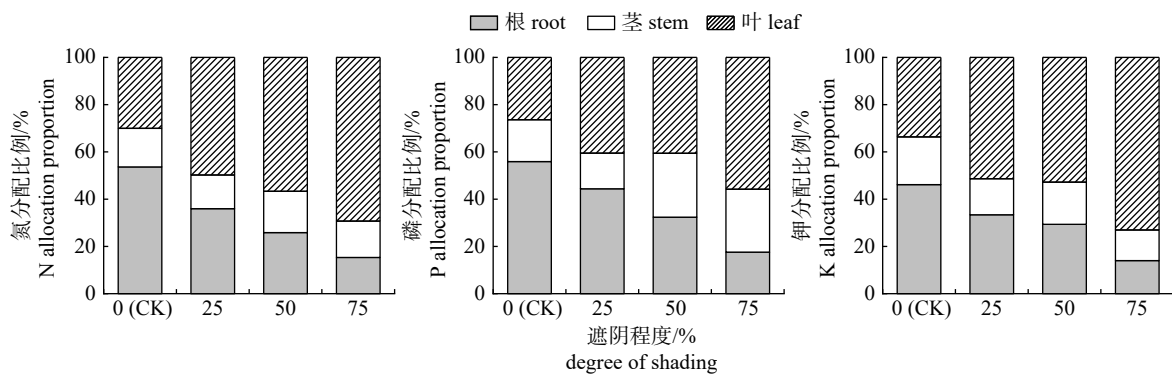
Fig. 3 Effects of different shading treatments on the N, P, K stoichiometric characteristics of *F. malacophylla* seedlings

图 4 不同遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 分配比例的影响

Fig. 4 Effects of different shading treatments on the N, P and K allocation proportion of *F. malacophylla* seedlings

K 增加了向叶的分配比例, 减少了向根、茎的分配比例。75% 遮阴处理下, 白枪杆幼苗叶片 N、P、K 的分配比例达到最大值, 根的 N、P、K 分配比例达到最小值; 茎 N 的分配比例在 50% 遮阴处理下最高 (17%), 在 25% 遮阴处理下低 (14%); 茎 P 的分配比例在 50% 和 75% 遮阴处理下最高 (27%), 在 25% 遮阴处理下分配比例最低 (15%); 茎 K 的分配比例在全光照 (CK) 处理下最高 (20%), 在 75% 遮阴处理下最低 (13%)。

2.5 不同遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 利用效率的影响

不同遮阴处理下, 白枪杆幼苗的 N、P、K 利用效率为 $P > K > N$ (表 2)。75% 遮阴处理可以提高白枪杆幼苗 P 利用效率, 与全光照 (CK) 相比, 提高了 57.6%; 也可降低 N、K 的利用效率, 分别降低 25.0% 和 7.0%。

3 讨论

3.1 遮阴对白枪杆幼苗生长和生物量的影响

适当遮阴有利于木本植物生长, 而过强光照

表 2 遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 利用效率的影响

Tab. 2 Effects of different shading treatments on the N, P and K use efficiency of *F. malacophylla* seedlings

遮阴程度/% degree of shading	氮 nitrogen	磷 phosphorous	钾 potassium
0 (CK)	0.12±0.00 a	0.33±0.02 c	0.14±0.00 a
25	0.11±0.00 b	0.40±0.02 b	0.13±0.00 b
50	0.10±0.00 c	0.29±0.01 d	0.11±0.00 c
75	0.09±0.00 d	0.52±0.03 a	0.13±0.01 b

对幼苗生长具有抑制作用^[21-22]。本研究发现: 白枪杆幼苗苗高和生物量分配明显受遮阴影响, 与全光照相比, 50% 遮阴处理有利于促进白枪杆幼苗生长, 而 75% 遮阴处理下白枪杆幼苗高和地径的增长受到抑制, 说明随着遮阴程度的增加, 白枪杆幼苗通过减少苗高和地径生长来应对不利于生长的弱光环境, 目的是为满足幼苗生长发育, 将更多的能量用于茎的生长以获得足够光照^[23]。因此, 在白枪杆苗木培育过程中, 适当遮阴有利于白枪杆苗木生长。

3.2 遮阴对白枪杆幼苗 N、P、K 化学计量特征的影响

植物各器官中 N、P、K 含量可以反映植物对养分的吸收和需求以及环境适应能力,而 N、P、K 含量在不同时空也会产生差异^[24-25]。本研究表明:50%遮阴处理下白枪杆幼苗叶 N 含量、茎和叶 P 含量、根和叶 K 含量最高,75%遮阴处理下根和茎 N 含量最高。因此,适当遮阴可以提高白枪杆幼苗各器官 N、P、K 含量,与前人研究结果^[26]相似;但也有所不同,75%遮阴处理下根和茎中 N 含量最高,可能会因为过度遮阴而使植株增加 N 在根和茎的分配以提高光利用效率,促进光合作用。白枪杆幼苗叶片 N、P、K 含量平均值分别为 9.92、2.56 和 9.24 mg/g,其中叶片中 N 含量低于中国陆生植物叶片中 N 含量平均值(19.09 g/kg),也低于常绿木本植物叶片中 N 含量平均值(14.71 g/kg);K 含量低于中国陆生植物叶片中 K 含量平均值(15.09 g/kg)和中国阔叶树 K 含量的平均水平(9.85 g/kg);叶片中 P 含量高于中国陆生植物叶片中 P 含量平均值(1.56 g/kg)^[27-29],这可能与白枪杆幼苗生长环境中土壤 N、P、K 含量有关。

生境不同,植物生理生化也存在差异,植物会通过调节各器官内 N、P、K 积累量和分配比例来适应生长环境,从而影响其生态化学计量特征^[30]。当 N:P<14 时,N 为植物生长的主要限制性元素;当 N:P>16 时,P 为植物生长主要限制性元素;当 N:P 为 14~16 时,N 和 P 都是植物生长的限制性元素;当 N:K>2.1、K:P<3.4 时,K 是植物生长的主要限制性元素^[31]。孙丽娟等^[32]研究表明:在养分充足时,改变光照强度会使植物光合作用增强,地上部分生长缓慢,导致 N:P 增加。本研究结果与之相似,75%遮阴处理下根、茎、叶的 N:P、K:P 和 N:K 均最大,N:P 表现为根>叶>茎。本研究的 N:P 为 1.89~5.48,N:K 为 1.00~1.52,K:P 为 1.64~3.74,推测白枪杆幼苗生长主要受到 N 限制。因此,在白枪杆幼苗生长过程中适当增施氮肥,可有效促进白枪杆幼苗生长。

3.3 遮阴处理对白枪杆幼苗 N、P、K 积累量、分配和利用效率的影响

为满足生长发育,植物对养分的吸收、分配及利用情况可以体现植物对不同程度遮阴的适应

策略,植物会通过调节各器官内营养物质来适应生长环境,各器官内 N、P、K 的含量和积累量是植物适应不同遮阴环境的结果^[33]。白枪杆幼苗根、茎、叶 N、P、K 积累量与遮阴程度存在良好的协同性,50%遮阴处理下 N、P、K 总积累量达到最大,N、P、K 积累量表现为叶>根>茎。本研究中,75%遮阴处理下白枪杆幼苗总生物量减少对根、茎的营养分配,将更多营养分配到叶片,从而促进光合作用。有研究表明:适当遮阴可以提高青桐幼苗的养分利用效率^[26],本研究结果与之略有不同,75%遮阴处理下白枪杆幼苗 P 仍然存在较高的利用效率,但 N 利用效率随着遮阴程度的增大而减小,75%遮阴处理下达到最小值,这可能与生长环境中限制性元素有关。

4 结论

白枪杆幼苗根、茎、叶的 N、P、K 含量、积累量、利用效率以及生态化学计量特征均受外界不同光照强度的显著影响。总体上,50%遮阴处理能有效促进白枪杆幼苗的生长并提高其幼苗各器官的生物量和 N、P、K 含量及积累量;75%遮阴处理下,白枪杆幼苗的生长受到抑制,生物量和 N、P、K 积累量减少,各器官的 N:P、K:P 和 N:K 均达到最大值,表明过度遮阴时白枪杆幼苗受到 N 元素的限制。可见,白枪杆幼苗具有一定的耐阴性,但过度遮阴以及全光照环境对白枪杆幼苗的伤害较大。因此,白枪杆可以在室外栽培、林下推广种植以及园林应用中选择 50%遮阴环境,有助于生物量、N、P、K 含量和积累量的增加。

[参考文献]

- [1] 童龙,张磊,高勇军,等.不同遮阴处理对多花黄精生理生长的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2020,40(3): 8. DOI: 10.11929/j.swfu.201906024.
- [2] 邓秀秀,施征,肖文发,等.干旱和遮阴对马尾松幼苗生长和光合特性的影响[J].生态学报,2020,40(8): 8. DOI: 10.5846/stxb201901310223.
- [3] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.11.051.
- [4] AHMED H A, TONG Y X, YANG Q C, et al. Spatial distribution of air temperature and relative humidity in the greenhouse as affected by external shading in arid climates[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(12):

2869. DOI: [10.1016/s2095-3119\(19\)62598-0](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(19)62598-0).
- [5] 盛海燕, 李伟成. 延胡索光合与生长可塑性对光照的响应[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 168. DOI: [10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.06.022](https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.06.022).
- [6] KOERSELMAN W, MEULEMAN A. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441. DOI: [10.2307/2404783](https://doi.org/10.2307/2404783).
- [7] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2. DOI: [10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.002](https://doi.org/10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.002).
- [8] 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): 6. DOI: [10.13287/j.1001-9332.20140829.010](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.20140829.010).
- [9] 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. DOI: [10.17521/cjpe.2016.0248](https://doi.org/10.17521/cjpe.2016.0248).
- [10] 李冬林, 金雅琴, 崔梦凡, 等. 遮阴对香果树叶片生理特性及叶肉细胞超微结构的影响[J]. 植物研究, 2020, 40(1): 12. DOI: [10.7525/j.issn.1673-5102.2020.01.006](https://doi.org/10.7525/j.issn.1673-5102.2020.01.006).
- [11] QUERO J L, VILLAR R, MARANON T, et al. Relating leaf photosynthetic rate to whole-plant growth: drought and shade effects on seedlings of four *Quercus* species[J]. Functional Plant Biology, 2008, 35(8): 725. DOI: [10.1071/FP08149](https://doi.org/10.1071/FP08149).
- [12] LU X H, ZANG R G, DING Y, et al. Variations and trade-offs in functional traits of tree seedlings during secondary succession in a tropical lowland rain forest[J]. Biotropica, 2014, 46(4): 404. DOI: [10.1111/btp.12125](https://doi.org/10.1111/btp.12125).
- [13] 於艳萍, 毛立彦, 宾振钧, 等. 不同遮阴处理对秋枫幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2017(5): 56. DOI: [10.11937/bfy.201705014](https://doi.org/10.11937/bfy.201705014).
- [14] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第六十一卷[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [15] 黄俊威, 孙永磊, 周金星, 等. 白枪杆生长特性及光合特性对不同土壤水分的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1254. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2019.06.025](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2019.06.025).
- [16] 夏泽源, 何祯, 徐云鹏, 等. 氮磷钾配比施肥和激素处理对白枪杆生长的影响[J]. 林业调查规划, 2016, 41(3): 82. DOI: [10.3969/j.issn.1671-3168.2016.03.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3168.2016.03.019).
- [17] 黄春良, 陈强. 半干旱暖热石漠化地区白枪杆造林技术[J]. 林业实用技术, 2014(12): 20. DOI: [10.13456/j.cnki.lykt.2014.12.007](https://doi.org/10.13456/j.cnki.lykt.2014.12.007).
- [18] 李燕燕, 段华超, 李世民, 等. 3种外源植物激素对白枪杆幼苗生长特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(4): 112. DOI: [10.3969/j.issn.1001-3601.2021.04.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3601.2021.04.018).
- [19] 井卉竹, 董琼, 段华超, 等. 生长调节剂喷施对白枪杆幼苗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(5): 26. DOI: [10.11929/j.swfu.202104056](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202104056).
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 孟衡玲, 张薇, 卢丙越, 等. 不同遮阴处理对半夏生长、产量和质量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(6): 1080. DOI: [10.16211/j.issn.1004-390X\(n\).2016.06.017](https://doi.org/10.16211/j.issn.1004-390X(n).2016.06.017).
- [22] 吕宁宁, 刘子晗, 杨培蓉, 等. 不同遮阴处理对杉木幼苗生长及土壤碳氮代谢酶活性的影响[J/OL]. 生态学报, (2024-02-20)[2024-03-15]. DOI: [10.20103/j.stxb.202308131746](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202308131746).
- [23] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.005).
- [24] 孙雪娇, 常顺利, 宋成程, 等. 雪岭云杉不同器官N、P、K化学计量特征随生长阶段的变化[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1291. DOI: [10.13292/j.1000-4890.201805.015](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201805.015).
- [25] 王增, 蒋仲龙, 刘海英, 等. 油茶不同器官氮、磷、钾化学计量特征随年龄的变化[J]. 浙农林大学学报, 2019, 36(2): 264. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2019.02.007](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2019.02.007).
- [26] 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. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202103.023](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202103.023).
- [27] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带654种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665. DOI: [10.3321/j.issn:0250-3301.2007.12.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0250-3301.2007.12.001).
- [28] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 等. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片N、P化学计量学特征[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 947. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2007.03.015](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2007.03.015).
- [29] LIU Q Q, HUANG Z J, WANG Z N, et al. Responses of leaf morphology, NSCs contents and C : N : P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* to shading[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 354. DOI: [10.21203/rs.3.rs-21841/v2](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-21841/v2).
- [30] YAMAZAKI J, SHINOMIYA Y. Effect of partial shading on the photosynthetic apparatus and photosystem stoichiometry in sunflower leaves[J]. Photosynthetica, 2013, 51(1): 3. DOI: [10.1007/s11099-012-0073-z](https://doi.org/10.1007/s11099-012-0073-z).
- [31] 皮发剑, 袁丛军, 喻理飞, 等. 黔中天然次生林主要优势树种叶片生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 801. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.05.011](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.05.011).
- [32] 孙丽娟, 李世民, 郭焕仙, 等. 树番茄幼苗生长与氮磷钾化学计量特征对光照、肥料的响应[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(8): 1793. DOI: [10.3969/j.issn.1004-1524.20221220](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1524.20221220).
- [33] LIN J H, ZHANG R, HU Y Y, et al. Interactive effects of drought and shading on *Torreya grandis* seedlings: physiological and growth responses[J]. Trees, 2019, 33(3): 951. DOI: [10.1007/s00468-019-01831-8](https://doi.org/10.1007/s00468-019-01831-8).

责任编辑: 何承刚