

遮阴对橡胶树砧木叶片形态和光合参数的影响

周 艳^{1,2}, 张凤良^{1,2}, 李小琴^{1,2*}, 杨 湑^{1,2}, 吴 裕^{1,2}

(1. 云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室, 云南景洪 666100;

2. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

[摘要]选取橡胶树 GT1 品种一年生实生苗作为试验材料, 根据其生长环境选择 3 个光照条件(无遮阴、半遮阴和全遮阴)进行观测, 通过测定苗木的生长量、叶片形态及光合生理参数等指标, 探讨橡胶树砧木在不同遮阴条件下的生长适应能力, 为橡胶树苗木栽培管理及利用提供理论依据。结果表明: (1) 3 种遮阴条件下橡胶树砧木生长及光合生理参数等各指标差异绝大部分达到极显著水平, 10 个叶片性状只有形状因子、比叶面积和叶片含水量差异不显著, 其余均达到极显著水平; (2) 遮阴使橡胶树苗木叶片变小、变薄, 叶脉更紧密, 组织含水量变大; (3) 遮阴下橡胶树叶片叶绿素含量高于正常光照, 并使得橡胶树的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和瞬时水分利用效率(WUEi)显著降低, 胞间 CO_2 浓度(C_i)升高。综合分析发现遮阴对橡胶树砧木生长、叶片形态、光合生理等影响较大, 光照充足的环境才适合其正常生长, 在遮阴程度较大时, 苗木生长严重受阻, 就此对苗期栽培管理提出了相关建议。

[关键词]橡胶树; 砧木; 光照; 生长; 光合生理; 苗木培育

中图分类号: S794.101 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2026)03-0092-07

Effect of Shading on Leaf Morphology and Photosynthetic Parameters *Hevea brasiliensis* Varieties RootstocksZHOU Yan^{1,2}, ZHANG Fengliang^{1,2}, LI Xiaoqin^{1,2*}, YANG Tian^{1,2}, WU Yu^{1,2}

1. Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China

Abstract: *Hevea brasiliensis* varieties GT1 one-year-old seedlings were selected as experimental materials. Based on their growth environment, three light conditions (no shading, semi-shading, and full shading) were chosen for observation. By measuring the growth increment, leaf morphology, and photosynthetic physiological parameters of the seedlings, the growth adaptability of rubber tree rootstocks under different shading conditions was explored, providing a theoretical basis for the cultivation management and utilization of rubber tree seedlings. The results showed: (1) Most of the differences in growth and photosynthetic physiological parameters of *H. brasiliensis* rootstocks under the three treatments reached a highly significant level; there were no significant differences in shape factor, specific leaf area and leaf water content among the 10 leaf traits, with all other traits reaching highly significant levels. (2) Shading treatment led to smaller, thinner leaves with tighter veins and increased tissue water content in *H. brasiliensis* rootstocks. (3) Shading increased chlorophyll content in *H. brasiliensis* rootstocks leaves, and it significantly reduced photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), and instantaneous water use efficiency (WUEi), while intercellular CO_2 concentration (C_i) elevated. Comprehensive analysis reveals that shading significantly affects the growth, leaf morphology, and photosynthetic physiology of *H. brasiliensis* rootstocks. Only environments with sufficient light are suitable for normal growth. When shading is

收稿日期: 2026-01-26

基金项目: 云南省基础研究专项面上项目(202501AT070387); 云南省热带作物科技创新体系建设专项资金项目(RF2025);

云南省现代农业橡胶树产业技术体系建设育种与繁育研究室(2024KJTX012-02)

作者简介: 周艳(1998—), 女, 研究实习员, 硕士, 研究方向为橡胶树遗传育种。E-mail: 3500353938@qq.com

*通信作者: 李小琴(1979—), 女, 副研究员, 硕士, 研究方向为橡胶树遗传育种。E-mail: 512504431@qq.com

severe, seedling growth is severely hindered. Based on this, relevant suggestions for cultivation management during the seedling stage are proposed.

Key words: *Hevea brasiliensis*; rootstock; illumination; growth; photosynthetic physiology; seedling cultivation

光是调控植物光合代谢与形态建成的关键环境因子, 既为植物生长发育提供能量, 也对其生存适应及生态系统构建起重要作用^[1]。光照强度差异会影响叶片形态与光合生理机能, 调控碳同化产物的合成、转运与分配, 进而调节苗木生理机能^[2]。强光易诱导光抑制、降低光化学效率甚至损伤光氧化系统; 弱光则限制光合效率与生产力, 长期低光胁迫可能导致植株死亡^[3]。适度遮阴可促进植株生长, 增加生物量和叶绿素含量, 缓解强光胁迫下的光抑制^[4]; 但过度遮阴会损伤光系统Ⅱ反应中心, 降低最大光化学效率, 减少光合产物, 进而无法满足植物正常生长需求^[5]。适宜光照范围内, 幼苗生物量与光照强度呈显著正相关; 长期处于强光或弱光环境中, 植物会在生物量积累、叶片解剖结构、气孔形态等方面表现出相应的适应性^[6]。叶片对环境敏感、可塑性强, 其光能吸收量直接影响植物光能利用率^[7]。

橡胶树(*Hevea brasiliensis*)为热带阳生常绿树种, 其光合生理结构高度适应强光环境。光合作用是其生长与胶乳合成的关键生理过程^[8]。胶乳合成以叶片光合产物蔗糖为唯一碳源, 光合能力直接影响干物质积累与产胶潜力^[9]。其光合色素、气孔调节、碳同化效率对光照高度敏感, 光照强度与时长通过调控色素合成、气孔导度及关键酶活性影响净光合速率、蒸腾速率等核心参数^[10-12]。橡胶树幼苗光合生理可塑性是适应光环境的重要基础, 砧木光合特性与长势直接决定嫁接苗成活率及后期长势。目前关于遮阴对热带林木光合特性的影响研究多集中于果树与珍稀树种, 缺乏橡胶树砧木苗期对遮阴胁迫的光合响应机制研究。为此, 本研究以GT1砧木为材料, 根据其自然生长环境选择无遮阴、半遮阴、全遮阴3个光照环境进行观测, 系统分析不同光照环境下其生长、叶片形态及光合生理指标的响应规律, 揭示其对遮阴环境的光合适应机制, 为优质

砧木繁育及苗期光照管理提供理论与技术依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料及处理

研究地位于云南省热带作物科学研究所(21° 59' ~ 22° 01' N, 100° 40' ~ 100° 50' E), 年平均气温18.6 ~ 21.9 °C, 海拔约550 m, 年平均降雨量约1 200 mm, 最冷月份平均气温15.6 °C, 最热月份平均气温25.2 °C, 土壤为酸性红土, pH值4.5 ~ 5.5。

选用橡胶树常规砧木品种GT1为试材, 于2024年9月收集种子并进行沙床催芽育苗, 约30 d后将育出小苗按照株行距40 cm × 60 cm移栽定植于苗圃地内, 按常规苗木管理。

根据自然生长环境遮阴情况, 选择3种光照环境进行观测: 正常光照(无遮阴)、每日12:00之后有自然光照(半遮阴)、全天仅有极少量散射光照(全遮阴), 每个观测共计100株。于2025年9月对各处理植株苗木的生长情况、叶片性状、叶绿素含量及光合生理特性等进行测定。

1.2 测定方法

1.2.1 生长和叶片性状的测定

各处理分别选取20株长势均匀的健康苗木, 用游标卡尺测量离地5 ~ 10 cm处地径(X_1), 用塔尺测量株高(X_2)。每个处理分别选择5株苗木测定叶片性状, 采集由上而下第2蓬叶的中部健康叶片, 每个处理共计30片, 测定指标及方法见表1。叶片性状分别采用游标卡尺(精确到0.01 mm)及YMJ-D叶面积测量仪(精确到0.01 cm²)测量, 叶片鲜重及干重用万分之一天平称量, 用烘箱烘干至恒重。

1.2.2 光合参数的测定

选择晴朗无风天气, 测定时间为上午9:00—11:00, 采用LCpro-SD便携式光合测定仪(ADC Bioscientific Ltd., 英国)对橡胶树叶片气体交换参数进行测定。每个处理测定3株, 选择植株由上

而下第2蓬叶的中部健康叶片,每株测定3片。采用LED红蓝光源叶室,光合有效辐射(PAR)设置为 $1\,500\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,气体流速设定为 $500\,\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$,叶室温度(25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, CO_2 浓度以所测环境的为准,选择叶片中部避开主脉测定,每片叶重复测定3次。气体交换参数测定指标主要包括:净光和速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)及胞间 CO_2 浓度(C_i)。叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)用净光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r)之比来表示。

表1 橡胶树叶片性状指标与测定方法

序号	指标	单位	测定方法
X_3	叶长	cm	叶面积测量仪测量
X_4	叶宽	cm	叶面积测量仪测量
X_5	叶面积	cm^2	叶面积测量仪测量
X_6	叶形指数		叶长/叶宽
X_7	形状因子		叶面积测量仪测量
X_8	叶厚	mm	每组5片,层叠测量后取平均
X_9	叶周长	cm	叶面积测量仪测量
X_{10}	叶脉密度	$\text{条}\cdot\text{m}^{-1}$	叶脉密度=叶脉数/叶长 $\times 100$
X_{11}	比叶面积	$\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$	叶面积与叶片干重比
X_{12}	叶片含水量	%	(鲜叶重-干叶重)/鲜叶

1.2.3 光合色素的测定

测定完光合参数后的叶片立即取下,低温避光保存带回实验室用于叶绿素含量的测定。总叶绿素、叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量采用乙醇提取法测定^[13]。

1.3 数据处理

采用Excel 2003录入、整理数据,Graphpad Prism 10.1.2作图,SPSS 23.0软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 遮阴对橡胶树砧木生长的影响

从表2可以看出,不同程度遮阴条件下橡胶树砧木的地径、苗高差异均达到了极显著水平。无遮阴条件下地径、苗高等指标均为最大值,平均分别为24.00 mm、318.50 cm,地径是半遮阴和全遮阴的1.54倍和2.49倍,苗高为1.80倍和3.15倍。所测定的整个群体苗木地径、苗高的变异系数远大于各处理,进一步说明了苗木在不同的光

环境下分化较大。

表2 遮阴对橡胶树砧木生长的影响

光照条件	地径		苗高	
	均值/ mm	变异系数/ %	均值/ cm	变异系数/ %
无遮阴	$24.00\pm 2.55^{\text{A}}$	10.63	$318.50\pm 33.17^{\text{A}}$	10.41
半遮阴	$15.61\pm 1.91^{\text{B}}$	12.24	$176.80\pm 24.81^{\text{B}}$	14.03
全遮阴	$9.64\pm 1.71^{\text{C}}$	17.72	$101.00\pm 15.95^{\text{C}}$	15.79
总体	$16.42\pm 6.32^{**}$	38.51	$198.77\pm 94.96^{**}$	47.77

注:同列数据不同大写字母表示处理间在0.01水平上差异显著,**表示总体差异显著($P<0.01$),下同。

2.2 遮阴对橡胶树砧木叶片性状的影响

叶片性状作为植物适应环境的关键表型参数,对环境变化具有重要指示作用。不同遮阴条件下橡胶树砧木10项叶片性状的测定结果见表3。方差分析表明:叶长(X_3)、叶宽(X_4)、叶面积(X_5)、叶形指数(X_6)、叶厚(X_8)、叶周长(X_9)及叶脉密度(X_{10})等7项指标在不同遮阴条件下差异均达到极显著水平。随着遮阴程度的加剧与光照时长的缩短,砧木叶片呈现出显著的适应性变化:叶面积显著减小,叶脉密度显著增加(结构更紧密),叶片厚度降低,而叶片组织含水量(X_{12})呈上升趋势。

10项叶片性状中,仅形状因子(X_7)、比叶面积(X_{11})及含水量(X_{12})的处理间差异未达到显著水平。形状因子主要表征叶形特征,表明橡胶树砧木叶形受遮阴的影响较小,性状稳定性较高。从变异系数分析来看,叶长(X_3)、叶宽(X_4)、叶厚(X_8)及叶脉密度(X_{10})的总体变异系数均大于各处理的变异系数,这些指标多与叶片大小及质地相关,说明叶片大小和质地相较于叶形更易受光照条件调控,环境表型可塑性更强。

2.3 遮阴对橡胶树砧木叶片光合色素的影响

由表4可知,不同遮阴条件下橡胶树砧木叶片光合色素含量均表现为无遮阴<全遮阴<半遮阴。与无遮阴相比,半遮阴条件下砧木的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素及类胡萝卜素含量分别增加了9.93%、6.77%、9.26%和18.03%;全遮阴条件下则分别增加了5.48%、1.22%、4.60%和11.39%。尽管各指标均有不同程度的提升,但统计分析显示,各处理间差异均未达到显著水平。

表 3 遮阴对橡胶树砧木叶片性状的影响

光照条件	X ₃				X ₄				X ₅				X ₆			
	平均/ cm	最小/ cm	最大/ cm	变异 系数/%	平均/ cm	最小/ cm	最大/ cm	变异 系数/%	平均/ cm ²	最小/ cm ²	最大/ cm ²	变异 系数/%	平均	最小	最大	变异 系数/%
无遮阴	14.43 ^A	11.78	17.98	16.77	8.71 ^A	7.79	9.99	11.40	87.09 ^A	66.69	116.18	2.01	1.67 ^A	1.18	2.11	18.69
半遮阴	10.14 ^B	9.25	11.08	7.40	7.81 ^A	7.23	8.33	4.62	54.30 ^B	50.20	58.05	5.17	1.30 ^B	1.10	1.53	10.74
全遮阴	7.85 ^C	7.24	8.81	7.10	6.12 ^B	5.52	6.64	6.96	5.17	32.76 ^C	28.47	36.69	1.28 ^B	1.13	1.46	8.41
总体	10.49 ^{**}	7.24	17.98	28.94	7.42 ^{**}	5.52	9.99	16.88	55.46 ^{**}	28.47	116.18	4.38	1.40 [*]	1.10	2.11	18.18

光照条件	X ₇				X ₈				X ₉			
	平均	最小	最大	变异系数/ %	平均/ mm	最小/ mm	最大/ mm	变异系数/ %	平均/ cm	最小/ cm	最大/ cm	变异系数/ %
无遮阴	0.73	0.69	0.82	7.22	0.17 ^A	0.16	0.17	4.21	38.88 ^A	34.84	45.91	10.37
半遮阴	0.69	0.57	0.81	14.69	0.14 ^B	0.14	0.14	1.72	30.10 ^{AB}	27.01	34.15	8.22
全遮阴	0.65	0.21	0.86	41.53	0.11 ^C	0.10	0.12	5.01	27.84 ^B	20.59	45.46	31.76
总体	0.68	0.21	0.86	26.56	0.14 ^{**}	0.10	0.17	17.39	31.94 ^{**}	20.59	45.91	22.91

光照条件	X ₁₀				X ₁₁				X ₁₂ /%			
	平均/ (条·m ⁻¹)	最小/ (条·m ⁻¹)	最大/ (条·m ⁻¹)	变异系数/ %	平均/ (cm ² ·g ⁻¹)	最小/ (cm ² ·g ⁻¹)	最大/ (cm ² ·g ⁻¹)	变异系数/ %	平均	最小	最大	变异 系数
无遮阴	12.76 ^C	10.31	14.73	14.39	102.31	75.79	120.39	18.72	59.92	55.10	62.74	5.83
半遮阴	17.65 ^B	15.15	19.79	10.35	127.01	98.03	162.27	19.08	62.32	60.37	63.74	1.89
全遮阴	23.18 ^A	18.09	25.62	10.81	136.62	97.51	226.11	30.39	66.40	60.17	77.40	8.65
总体	18.71 ^{**}	10.31	25.62	24.49	125.25	75.79	226.11	25.98	63.37	55.10	77.40	7.28

表 4 遮阴对橡胶树砧木叶片光合色素的影响

光照条件	叶绿素 a 含量/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b 含量/ (mg·g ⁻¹)	总叶绿素含量/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素比值 (a/b)	类胡萝卜素含量/ (mg·g ⁻¹)
无遮阴	4.068±0.152	1.064±0.104	5.132±0.048	3.850±0.519	1.431±0.027
半遮阴	4.472±0.739	1.136±0.455	5.607±1.193	4.139±1.007	1.689±0.363
全遮阴	4.291±0.689	1.077±0.324	5.368±1.013	4.074±0.587	1.594±0.323
总体	4.277±0.491	1.092±0.256	5.369±0.732	4.021±0.586	1.571±0.247

2.4 遮阴对橡胶树砧木光合生理特性的影响

由图 1 分析可知,遮阴环境下,橡胶树砧木的净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均呈现极显著差异;而胞间 CO₂ 浓度与瞬时水分利用效率在半遮阴中仅表现出升高或降低趋势,未达到显著水平。进一步分析可知,气孔导度的降低与胞间 CO₂ 浓度的升高呈同步变化趋势,表明气孔导度的下降会阻碍 CO₂ 向叶肉细胞的扩散过程,进而抑制植株对 CO₂ 的固定与转化效率。具体数据显示,半遮阴的瞬时水分利用效率与净光合速率相较于无遮阴分别下降 40.04% 与 51.16%;全遮阴的上述两项指标降幅更为显著,分别达 79.22% 与 92.53%。上述结果充分证实,遮阴可通过影响橡胶树砧木的光合生理代谢过程显著调控其生长

速率与生长状况。

2.5 各性状相关性分析

对橡胶树砧木 12 项生长性状的相关性分析结果如表 5 所示,其中多数性状间的相关性达到显著或极显著水平。具体来看:地径(X₁)、苗高(X₂)及叶长(X₃)除与形状因子(X₇)、比叶面积(X₁₁)、叶片含水量(X₁₂)的相关性不显著外(地径还与叶周长相关性不显著),与其余性状均表现为显著或极显著相关;叶宽(X₄)仅与叶形指数(X₆)、形状因子(X₇)、比叶面积(X₁₁)无显著相关性,与其他性状均呈显著或极显著相关。结果表明,橡胶树砧木 12 项生长性状中,地径、苗高、叶长、叶宽、叶面积等可较好反映橡胶树砧木的整体生长状况,可作为早期选择的关键指标。

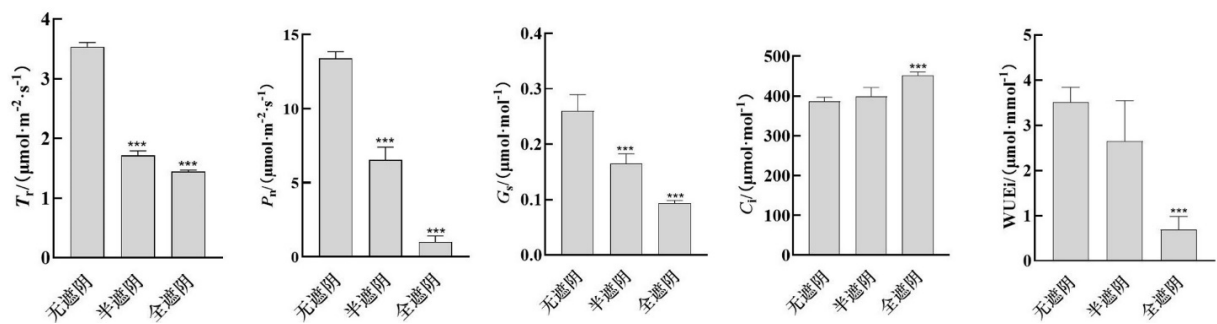


图1 遮阴对橡胶树砧木叶片气体交换参数变化的影响

注: ***表示与无遮阴处理相比差异极显著 ($P < 0.001$)。

表5 橡胶树砧木性状的相关性分析

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_2	0.941**										
X_3	-0.651**	-0.642**									
X_4	-0.565**	-0.588**	0.757**								
X_5	-0.649**	-0.627**	0.974**	0.854**							
X_6	-0.519*	-0.486*	0.832**	0.275	0.709**						
X_7	-0.391	-0.462	0.068	0.009	0.088	0.090					
X_8	-0.788**	-0.766**	0.806**	0.599*	0.836**	0.663**	0.236				
X_9	-0.443	-0.600**	0.724**	0.622**	0.675**	0.528*	0.279	0.465			
X_{10}	0.635**	0.634**	-0.663**	-0.614**	-0.737**	-0.441	-0.339	-0.808**	-0.453		
X_{11}	0.218	0.140	-0.292	-0.433	-0.361	-0.056	0.152	-0.204	-0.004	0.313	
X_{12}	0.436	0.365	-0.46	-0.634**	-0.575*	-0.129	0.236	-0.556*	-0.076	0.536*	0.758**

注: *表示显著相关 ($P < 0.05$), **表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

3 结论与讨论

3.1 遮阴对橡胶树砧木生长及形态建成的影响

已有研究发现,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)地径随光强减弱逐渐变小^[14],遮阴使马尾松(*Pinus massoniana*)幼苗的基径和株高增长量均显著减小^[15]。本研究中,遮阴程度也与橡胶树砧木地径、苗高呈极显著负相关,无遮阴条件下砧木地径、苗高分别为全遮阴的2.49倍、3.15倍,且这2项生长指标的群体变异系数远高于各处理组内的,说明光照强度差异是导致苗木生长分化的核心因子。其原因可能是橡胶树作为热带阳生植物,遮阴造成的光能不足限制了其光合产物积累,使茎干增粗、植株增高的营养生长过程受阻;同时,地径降幅高于苗高,体现了砧木在弱光下的生长策略,即优先将有限光合产物分配至株高生长以获取更多光照。

10项叶片性状中,除形状因子、比叶面积和

叶片含水量外,其余指标对遮阴均呈极显著响应,体现了光照环境对叶片形态的强可塑性。随遮阴程度加深,叶长、叶宽、叶面积、叶厚呈梯度下降,叶脉密度呈梯度上升,这与遮阴使麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)和闽楠[*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang]幼苗总叶面积减小,而对比叶面积影响不大的研究结果一致^[16]。原因可能是砧木在弱光下的适应:叶片变小变薄会减少接收光能的叶面积,叶脉密度增加则提升叶片水分与养分运输效率,弥补光合产物积累不足的缺陷,同时增强薄叶的机械支撑性。形状因子在各处理间无显著差异,说明其受遗传特性主导,性状稳定性高,可作为橡胶树砧木形态鉴定的稳定指标;而叶长、叶宽、叶厚的群体变异系数显著高于各处理组内,表明这类与叶片大小、质地相关的性状是响应光照环境的核心形态指标,可作为苗期光照管理的监测依据。此外,叶片含水量随遮阴加深呈上升趋势,源于遮阴下蒸腾速率降低、水

分散失减少,同时弱光下细胞分裂伸长减慢导致细胞间隙水分占比增加,但该变化会降低叶片组织透气性,间接影响叶肉细胞 CO_2 供应。

3.2 遮阴对橡胶树叶片光合色素的影响

光合色素作为光能捕获的物质基础,其含量随光照强度减弱呈上升趋势,半遮阴处理的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素及类胡萝卜素含量均高于无遮阴和全遮阴,呈非完全线性变化特征。朝鲜崖柏(*Thuja koraiensis*)叶片中,随遮阴度的升高,叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量逐渐增加^[17],木荷(*Schima superba*)和枫香(*Liquidambar formosana*)中,各叶绿素含量也是随遮光率增加而上升,但并不是完全呈正相关关系^[18],与研究结果一致。可能是因为弱光下叶绿素合成增加,能提升叶片对光能的捕获效率,弥补光照强度不足;类胡萝卜素含量增加则可能源于在捕获光能的同时,光合过程中产生的活性氧得到清除,缓解了弱光下光合电子传递链的氧化胁迫^[19]。而全遮阴下色素含量低于半遮阴,是因为长期弱光导致光合产物积累不足,无法为色素合成提供充足碳源与能量,同时过度遮阴会降低叶绿体发育程度,影响色素的结合与储存。各色素指标在处理间无显著差异,说明橡胶树砧木的光合色素系统对遮阴响应存在缓冲性,短期遮阴下的色素合成调控可在一定程度上抵消光能不足的影响,这也是其光合生理可塑性的重要体现。

3.3 遮阴对橡胶树光合参数的影响

遮阴使得濒危植物朝鲜崖柏^[17]、桢楠(*Phoebe zhennan*)幼苗^[20]、松属3个树种[油松(*P. tabulaeformis*)、黑松(*P. thunbergii*)、赤松(*P. densiflora*)]幼树^[21]净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、水分利用效率(WUE_i)和蒸腾速率(T_r)降低。本研究同样发现遮阴对橡胶树砧木光合气体交换参数产生极显著影响,净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、瞬时水分利用效率(WUE_i)随遮阴程度加深呈梯度下降,胞间 CO_2 浓度(C_i)则呈梯度上升,该变化源于气孔与非气孔的双重抑制机制。从气孔因素来看,遮阴导致气孔导度显著降低,进而直接阻碍 CO_2 扩散到叶肉细胞,造成胞间

CO_2 浓度积累,是光合效率下降的直接原因^[22];从非气孔因素来看,长期弱光使光合色素的缓冲性调控失效,叶绿体光反应效率降低,ATP和NADPH生成不足,抑制卡尔文循环中 CO_2 的固定与还原,使胞间 CO_2 浓度较高,叶肉细胞碳同化效率显著下降,是光合效率下降的根本原因^[23]。半遮阴下净光合速率、瞬时水分利用效率较全光照分别下降51.16%、40.04%,全遮阴下降幅度达92.53%、79.22%,表明光合作用速率和水分利用效率随光照的减弱而逐渐下降。同时,蒸腾速率与净光合速率同步下降,体现了砧木在遮阴下通过降低蒸腾速率减少水分运输,以适应弱光下的物质合成不足,而瞬时水分利用效率显著下降说明遮阴下光合速率的下降幅度远大于水分消耗的下降幅度,植株水分利用效率大幅降低。

综合来看,橡胶树GT1砧木的苗期生长与光合生理高度依赖光照环境,遮阴会通过改变叶片形态、调控光合色素合成、抑制光合气体交换等多重途径,导致光合产物积累不足,最终抑制植株生长,半遮阴下砧木可通过形态与生理的适应性调控维持一定光合效率,而全遮阴则会导致其光合效率受到严重抑制,生长严重受阻。该结果为橡胶树砧木苗期栽培管理提供了关键技术参考:苗圃繁育阶段需保证充足光照,合理设计种植密度,避免因种植过密导致遮阴,影响苗木生长质量与抗逆能力;热带地区夏季强光时段可进行轻度遮阴,缓解强光诱导的光抑制现象,兼顾光合效率与植株生长势;苗期定植需选择光照充足的地块,避免与高大林木间作造成的遮阴胁迫,保障砧木正常生长,提升后期嫁接成活率。后续可开展不同遮阴时长、遮阴方式对砧木光合生理长期影响的研究,同时结合叶绿体超微结构、光合关键酶活性等指标,深入解析橡胶树砧木对遮阴胁迫的光合适应生理机制,为橡胶树砧木的抗逆育种与苗期精细化管理提供更全面的理论支撑。

参考文献:

- [1] 邢阿宝,崔海峰,俞晓平,等. 光质及光周期对植物生长发育的影响[J]. 北方园艺,2018(3):163-172.

- [2] PAN TH, WANG YL, WANG LH, et al. Increased CO₂ and light intensity regulate growth and leaf gas exchange in tomato [J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, 168 (3):694-708.
- [3] 尹若勇,陈蕾如,邓鹏飞,等. 遮阴干旱对白及砧木光合特性的影响 [J]. *草业科学*, 2023, 40(12):2991-2999.
- [4] 胡万良,谭学仁,孔祥文,等. 遮阴对刺龙牙生长及光合特性的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2008(1):23-25.
- [5] MARKESTEIJN L, POORTER L, BONGERS F. Light-dependent leaf trait variation in 43 tropical dry forest tree species [J]. *American Journal of Botany*, 2007, 94 (4): 515-25.
- [6] 安慧,上官周平. 光照强度和氮水平对白三叶砧木生长与光合生理特性的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6017-6024.
- [7] CAI ZQ, POORTER L, HAN Q, et al. Effects of light and nutrients on seedlings of tropical *Bauhinia lianas* and trees [J]. *Tree Physiology*, 2008, 28(8):1277-85.
- [8] 王纪坤,谢贵水,陈邦乾. 不同橡胶树品系的光合特性 [J]. *西南农业学报*, 2010, 23(6):1882-1886.
- [9] KANPANON N, KASEMSAP P, THALER P, et al. Carbon isotope composition of latex does not reflect temporal variations of photosynthetic carbon isotope discrimination in rubber trees(*Hevea brasiliensis*) [J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(11):1166-75.
- [10] 姚庆群,张振文,谢贵水. 橡胶净光合速率及其影响因子日变化研究 [J]. *热带农业科学*, 2006(5):1-4.
- [11] WANG LF. Physiological and molecular responses to variation of light intensity in rubber Tree(*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) [J]. *Public Library of Science ONE*, 2014, 9 (2):e89514.
- [12] SENEVIRATHNA AM, STIRLING CM, RODRIGO VH. Growth, photosynthetic performance and shade adaptation of rubber(*Hevea brasiliensis*) grown in natural shade [J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(10):705-12.
- [13] 李合生. 现代植物生理学 [M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2012.
- [14] 吕宁宁,刘子哈,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]. *生态学报*, 2024, 44(9):3600-3611.
- [15] 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): 2735-2742.
- [16] 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.
- [17] 苑景淇,于忠亮,兰雪涵,等. 遮阴对濒危植物朝鲜崖柏光合特性的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(5):58-66.
- [18] 朱婷婷,王懿祥,朱旭丹,等. 遮光对木荷和枫香光合特性的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(1):28-35.
- [19] DING DX, LI J, XIE JM, et al. Exogenous zeaxanthin alleviates low temperature combined with low light induced photosynthesis inhibition and oxidative stress in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants [J]. *Current Issues in Molecular Biology*, 2022, 44(6):2453-2471.
- [20] 代大川,胡红玲,陈洪,等. 遮阴对桢楠幼苗生长和光合生理特性的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(4):56-64, 74.
- [21] 王巧,聂鑫,刘秀梅,等. 遮光对松属3个树种幼树光合特性和荧光参数的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(4):643-651.
- [22] SUN H, SCHMIDT N, LAWSON T, et al. Guard cell-specific glycine decarboxylase manipulation affects *Arabidopsis* photosynthesis, growth and stomatal behavior [J]. *New Phytologist*, 2025, 246(5):2102-2117.
- [23] LI Y, ZHAO JR, MA HL, et al. Shade tolerance in wheat is related to photosynthetic limitation and morphological and physiological acclimations [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15:1465925.