



主持人: 朱国鹏

水椰幼苗适应低光照环境的生理响应 及转录组差异变化的研究

王 鹏[#], 怀志文, 刘子涵, 雷 鹏, 耿晓晓^{*}

(海南大学生态学院, 海南 海口 570228 中国)

摘 要: 为了揭示水椰(*Nypa fruticans*)幼苗在低光照水平下的生理响应与转录组的差异变化, 本研究通过遮荫试验, 探究了水椰幼苗在低光照水平(CK 为自然光强 100%、Z1 为自然光强 30%、Z2 为自然光强 20%)下的生理变化和转录组表达差异。结果表明: 低光照水平下水椰幼苗在 40 d 时, Z1 的超氧化物歧化酶(SOD)活性比 CK 高 57.1%, Z2 比 CK 高 62.1%, Z1 的过氧化物酶(POD)活性比 CK 高 41.2%, Z2 比 CK 高 35.7%, Z1 的丙二醛(MDA)含量比 CK 低 42.6%, Z2 比 CK 低 32.9%, Z1 的叶绿素(Chl)含量比 CK 低 61.1%, Z2 比 CK 低 70.3%, 可溶性蛋白(SP)含量稳定无显著差异, Z1 的根冠比比 CK 低 57.6%, Z2 比 CK 低 48.1%。水椰幼苗在低光照水平的情况下, 在 10 d 左右通过提升抗氧化酶活性、增加叶面积、侧根生长等方式来适应光照强度不足的环境变化。若是光照更弱, 水椰会通过提高光吸收率和调节生长激素水平来适应环境变化。

关键词: 水椰; 遮荫试验; 生理响应; 转录组

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054(2025)03-0461-08

王鹏, 怀志文, 刘子涵, 等. 水椰幼苗适应低光照环境的生理响应及转录组差异变化的研究 [J]. 热带生物学报, 2025, 16(3): 461-468. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240114

红树植物广泛分布于热带和亚热带地区的海岸带海陆交错区^[1], 是生物多样性、生产力最高的生态系统之一, 具有巨大的生态价值^[2]。水椰(*Nypa fruticans*)是一种隶属于棕榈科(Arecaceae)水椰属(*Nypa*)的真红树植物^[3], 具有防风固堤、净化空气的重要作用^[4]。水椰的果肉富含矿物质、维生素, 其羽状复叶可以编制工艺品, 也拥有着较高的经济价值。此外, 在热带植物区系、古生物学、海洋地质考古及古植物学等多个学科领域中水椰均展现出极高的科研价值^[3]。2021 年, 中国正式将水椰列为二级保护植物, 并将其纳入《国家重点保护野生植物名录》^[5]。20%~30%的透光率最适宜阴生植物走马胎(*Ardisia gigantifolia*)生长^[6]。江南油杉(*Keteleeria fortunei* var. *Cyclolepis*)幼苗在遮荫率为 60% 的环境下受光胁迫较小, 其生长, 叶片

表现特征, 光合能力以及生物量积累与分配等表现最优^[7]。张孟文等^[8]的研究表明, 海南岛水椰群落高度多为 8~10 m, 郁闭度多为 50%~80%。水椰高大、密集等特点降低了林下的光照环境, 因此, 通过探究水椰幼苗在低光照水平下的生理变化及转录组表达差异, 旨在揭示水椰幼苗在低光照水平下的生理与转录组如何响应的问题, 为水椰的繁育工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域基本概况 试验地点位于海南省海口市东寨港红树林保护区附近的桂南下村(19°56'52.86"N, 110°34'28.26"E)。该区域日照充足, 年平均日照时数超过 2 000 h, 太阳辐射量达到 11~12 万 K。气候温暖湿润, 年平均气温为

收稿日期: 2024-07-06

修回日期: 2024-08-04

基金项目: 海南省重点研发揭榜挂帅项目(ZDYF2023SHFZ172)

[#]第一作者: 王鹏(1998—), 男, 海南大学生态学院 2021 级硕士研究生。E-mail: 15529981129@163.com

^{*}通信作者: 耿晓晓(1996—), 女, 海南大学生态学院 2023 级博士研究生。研究方向: 生态系统生态学。E-mail: gengxiao0421@163.com

24.4 ℃, 最高平均气温约 28 ℃, 最低平均气温约 18 ℃。年降水量丰富, 年平均降水量为 1 696.6 mm, 而年平均蒸发量为 1 834 mm。该区域的风向以东南风和东北风为主, 年平均风速为 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 海拔 3 m^[9]。这些气候条件为水椰幼苗的生长提供了良好的环境。

1.2 试验设计 选取 225 株长势一致的水椰幼苗 [1 年苗龄、株高约为 $(45 \pm 5) \text{ cm}$ 、基径约为 $(18 \pm 3) \text{ cm}$] 作为试验材料进行水椰幼苗遮阴试验 (遮阴 40 d)。转录组测序材料选自遮荫试验遮荫 40 d 的水椰幼苗叶片。

根据自然群落中拥有幼苗较多的郁闭度 (50% ~ 80%) 且通过预试验筛选, 设置了 3 个光强处理: 通过使用不同透光度的黑色尼龙网得到相对自然光强的 100% (CK, 对照)、30% (Z1) 和 20% (Z2), 于 2023 年 5 月 11 日开始, 分别设置在 5 个小区, 每个小区包含 3 个光强处理, 每个处理有 15 株水椰幼苗, 共 225 株。幼苗栽种于 3.14 L 的花盆中, 每盆一株, 放置于苗圃进行 40 d 的遮阴处理。在遮阴初期, 选择了连续 3 d 的晴朗天气, 采用文献 [10] 的方法测量每天 9: 00、12: 00 和 15: 00 各遮阴棚内和全光照处理下的光量子通量密度 (表 1)。

表 1 各光照处理的相对光强

Tab. 1 Relative light intensity measured in the three light treatments

时间 Time	CK	Z1	Z2
9: 00	100	33.4	22.1
12: 00	100	32.1	19.8
15: 00	100	30.9	20.2
均值 Mean	100	32.3	20.7

1.3 采样方法 在 0、10、20、30、40 d 时随机采取各小区各处理的叶片, 进行生理指标的测量; 在第 40 天时各小区各处理内随机挑选一株进行生物量测量。在取样过程中, 从每个处理中挑选了 3 株幼苗, 并从每株幼苗中随机采集了 3 ~ 4 片新鲜且成熟的叶片, 采集后用液氮处理, 带回实验室 -80 ℃ 冰箱进行保存, 待 40 d 采样后进行指标测量。这些叶片被用于测定可溶性蛋白 (Soluble proteins, SP) 含量、丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量、叶绿素 (Chlorophyll, Chl) 含量以及超

氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 的活性。在 40 d 时随机采取各小区各处理的叶片共 15 片, 液氮处理后置于干冰中保存, 送公司测序。

1.4 生理指标测定方法 首先, 使用电子天平 (精度为 0.000 1 g) 称取大约 0.3 g 的新鲜叶片, 并将其与预冷的提取液 (包含磷酸缓冲液、EDTA-Na₂ 和 PVP) 混合, 在冰浴条件下研磨成匀浆。随后, 在 4 ℃ 条件下, 以 $16\,000 \times g$ 的离心力对混合物进行 20 min 的离心处理, 以获取上清液, 用于后续的 SP 含量和酶活性测定。在测定 SP 含量时, 采用了考马斯亮蓝染色法, 并使用牛血清蛋白作为标准曲线。对于 SOD 活性的测定, 参考了文献 [11] 的方法, 通过比较酶液与磷酸缓冲液在光化还原氮蓝四唑反应中的差异来计算酶活力单位 (U), 并将酶活性表示为 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。对于 POD 活性的测定, 则采用了文献 [12] 的方法, 以 OD_{470} 值的变化速率作为酶活力单位的衡量标准, 酶活性表示为 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。MDA 含量的测定参照了文献 [13] 的方法 (TBA 法), MDA 在高温及酸性条件下与 TBA 反应形成有色物, 在 532 nm 波长处有最大吸收值, 600 nm 波长处有最小吸收值, 而 Chl 含量的测定则遵循了文献 [14] 的方法 (80% 丙酮浸提法) 将叶片细丝投入含 5 mL 80% 丙酮的刻度试管中, 封管口后于暗中提取至细丝完全变为白色为止 (过夜即可)。

1.5 转录组差异分析方法 用于转录组测序的材料来自水椰幼苗遮阴试验, 采集遮阴 40 d 的幼苗叶片, 液氮冷冻后干冰保存寄给公司进行测序, 得到 RANseq 二代测序结果, 对得到的原始测序数据用 fastp 软件进行质量控制, 去除前端 20 个不稳定的碱基得到干净数据, 经过严格的数据筛选过程, 排除了存在接头、长度不足 50 bp 以及质量低于 Q20 的低质量 Reads, 确保最终数据的纯净度。经过这一步骤, 成功获得了总计 22.6 G 的清洁碱基以及 278 143 个高质量的清洁读段。随后, 利用这些精选的高质量序列进行了从头拼接, 从而生成了转录本序列, 即 Unigene, 统计后共有 128 245 条。对比了试验组 (Z1 和 Z2) 与对照组 (CK) 的基因表达差异。使用 Trinity 进行从头组装, 利用 BUSCO 软件进行组装结果评估, 去除冗余; 利用 bowtie2 软件进行比对和定量, 用 Trinotate 软件

NR 库进行注释,得到表达矩阵,用 EDSeq2 进行差异分析,利用微生信在线平台绘制了火山图,eggNOG-mapper 对蛋白质序列进行注释,用 R 语言进行 GO 功能富集分析,Go 注释的基因有 39 491 条;通过注释文本,筛选出有关植物光合作用、呼吸作用、抗氧化酶的基因共 303 条。用 R 语言进行自建 GO 数据库,进行 GO 富集分析。

1.6 数据分析与处理方法 数据用 Microsoft Excel 2021 软件计算平均值和标准误,采用 SPSS Pro 在线分析软件进行统计分析,当 $P < 0.05$ 时表示有统计学意义。SOD 活性、POD 活性、MDA

含量、SP 含量和 Chl 含量使用单因素方差分析 (One-way ANOVA)方法进行显著性检验,箱线图由 cnsknowall 在线平台绘制。

2 结果与分析

2.1 不同光照条件下水椰幼苗生物量的变化 从表 2 可知,遮阴 40 d 后水椰幼苗的干质量和鲜质量在 Z1、Z2、CK 之间没有显著差异;根冠比 Z1、Z2 与 CK 之间有显著差异,根冠比 Z1 较 CK 低了 57.6%, Z2 较 CK 低了 48.1%。Z1、Z2 间的根冠比差异不显著。

表 2 遮阴 40 d 后水椰幼苗的生物量

Tab. 2 Biomass of *Nypa fruticans* seedlings after 40 days of shading

指标 Indicator	Z1	Z2	CK
干质量 Dry weight/kg	0.128 ± 0.017 ^{ns}	0.16 ± 0.016 ^{ns}	0.106 ± 0.006 ^{ns}
鲜质量 Fresh weight/kg	0.474 ± 0.062 ^{ns}	0.534 ± 0.047 ^{ns}	0.462 ± 0.032 ^{ns}
根冠比 Root-shoot ratio	0.133 ± 0.025 ^b	0.163 ± 0.023 ^b	0.314 ± 0.034 ^a

注:不同字母表示各光照处理之间存在显著差异($P < 0.05$),ns表示无显著差异($P > 0.05$)。

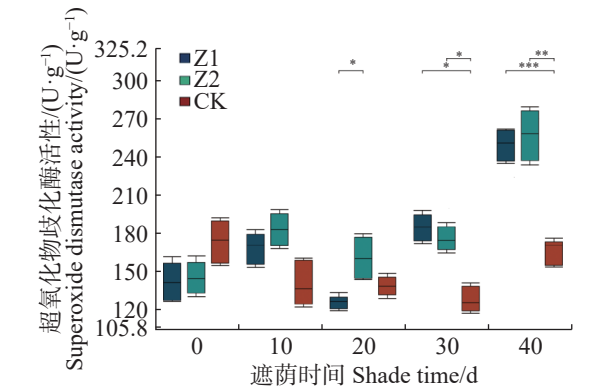
Note: Different letters indicate significant differences between various light treatments ($P < 0.05$); ns indicates no significant difference ($P > 0.05$).

2.2 不同光照条件下水椰幼苗的生理变化 从图 1 可知,在试验 0 和 10 d 时,遮阴处理(Z1 和 Z2)对水椰幼苗的 SOD 活性未产生统计学上的显著影响($P > 0.05$)。在 20 d 时,Z1 和 Z2 两种遮荫处理之间的 SOD 活性存在显著差异。30 和 40 d 时,遮阴处理显著提高了 SOD 活性,与对照组

(CK)相比,Z1 处理下的 SOD 活性分别增加了 39.3% 和 57.1%, Z2 处理则分别增加了 34.9% 和 62.1%。

从图 2 可知,遮阴对水椰幼苗 POD 活性在 0 和 10 d 没有产生显著影响($P > 0.05$),Z1 在 40 d 与 CK 相比有显著差异,比 CK 高 41.2%, Z2 在 20、30、40 d 与 CK 相比有显著差异,分别比 CK 高 25.6%、16.8%、35.7%。Z1 和 Z2 的光照处理之间没有显著差异。

从图 3 可知,遮阴对水椰幼苗 MDA 含量在 0、



* 代表 $P < 0.05$; ** 代表 $P < 0.01$; *** 代表 $P < 0.005$; **** 代表 $P < 0.001$; ns 代表 $P > 0.05$ 。下同。
* means $P < 0.05$; ** means $P < 0.01$; *** means $P < 0.005$; **** means $P < 0.001$; ns means $P > 0.05$. Similarly hereinafter.

图 1 不同光照强度下水椰幼苗超氧化物歧化酶活性变化
Fig. 1 Superoxide dismutase activity of *Nypa fruticans* seedlings under different light intensities

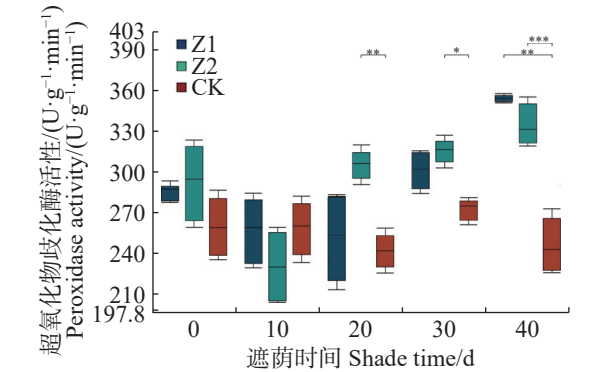


图 2 不同光照强度下水椰幼苗过氧化物酶活性变化
Fig. 2 Changes in peroxidase activity of *Nypa fruticans* seedlings under different light intensities

10 d 没有产生显著影响($P > 0.05$); 在 20、30、40 d 产生显著影响, Z1 分别比 CK 低 9.5%、47.3%、42.6%, Z2 分别比 CK 低 4.2%、41.9%、32.9%。Z1 和 Z2 的光照处理之间没有显著差异。遮阴处理水椰幼苗的 MDA 含量比未遮阴的对照组更低。

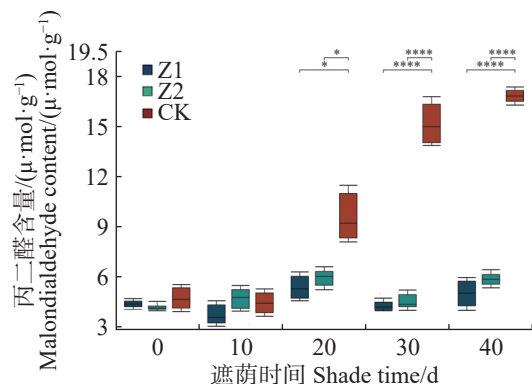


图3 不同光照强度下水椰幼苗丙二醛含量变化
Fig. 3 Changes in malondialdehyde content of *Nypa fruticans* seedlings under different light intensities

从图4可知, 遮阴对水椰幼苗 SP 含量除 10 d 时 Z1 与 CK 存在显著差异外, 其他无显著差异。

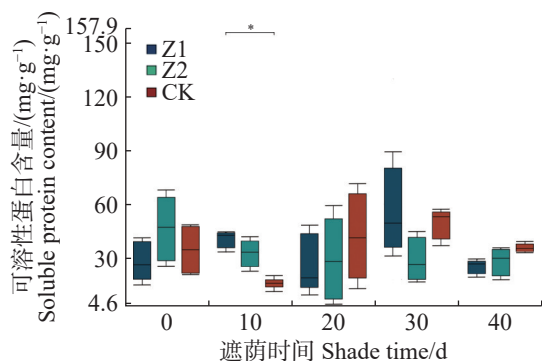


图4 不同光照强度下水椰幼苗可溶性蛋白含量变化
Fig. 4 Changes in soluble protein content of *Nypa fruticans* seedlings under different light intensities

从图5可知, Chl 含量与 CK 相比在 30、40 d 产生显著影响, 在 20 d 时 Z2 与 Z1、CK 存在显著差异; 在 10 d 时相较于 0 d 较高有增加趋势, Z1 分别比 CK 高 26%、0.6%, Z2 分别比 CK 低 8.2%、高 0.6%, 在 20、30、40 d 时 Z1、Z2 的叶绿素含量下降, Z1 分别比 CK 低 10%、66.3%、61.1%, Z2 分别比 CK 低 42.7%、54.6%、70.3%, 未遮荫的对照组的叶绿素含量持续上升。

2.3 不同光照条件下水椰幼苗转录组的变化 从图6可知, 与 CK 相比, Z1 组上调基因 69 687 条, 其中显著差异($P < 0.05$)的 857 条; 下调基因 58 558 条, 显著差异的 1 970 条。而在 Z2 组, 上调基因

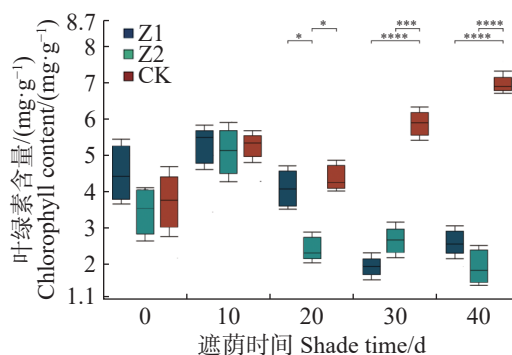
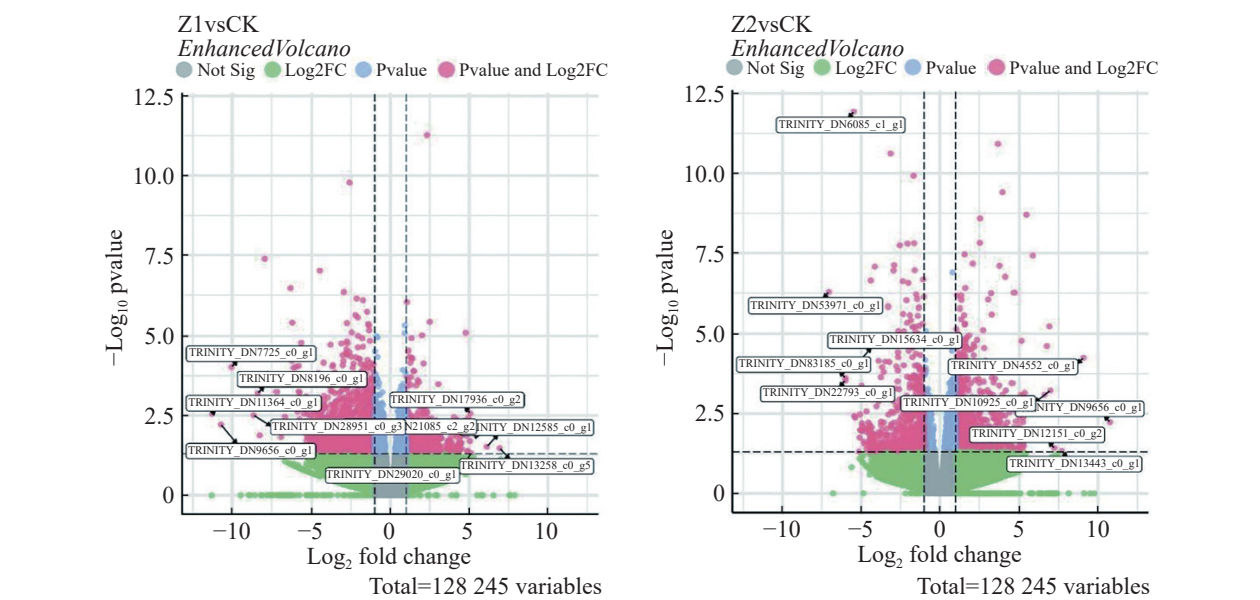


图5 不同光照强度下水椰幼苗叶绿素含量变化
Fig. 5 Changes in chlorophyll content of *Nypa fruticans* seedlings under different light intensities

73 322 条, 显著差异的 1 856 条; 下调基因 54 923 条, 显著差异的 1 124 条。

从图7可知, 遮阴组 Z1 与对照组 CK 相比, 生物学过程(BP)中基因差异比例大于 0.1 的有 lateral root formation(侧根形成)、lateral root morphogenesis(侧根形态发育)、post-embryonic root morphogenesis(后生根形态发育)、lateral root development(侧根发育)、post-embryonic plant organ morphogenesis(后生植物器官形态发育)、gravitropism(向地性)、response to gravity(对重力的响应)、tropism(向性)、embryonic pattern specification(胚胎模式规范)、phototropism(向光性)。细胞成分(CC)中基因差异比例大于 0.1 的有 plant-type cell wall(植物型细胞壁)、cell surface(细胞表面)。分子功能(MF)中基因差异比例大于 0.1 的有 antioxidant activity(抗氧化活性)、peroxidase activity(过氧化物酶活性)、oxidoreductase activity, acting on peroxide as acceptor(以过氧化物为受体的氧化还原酶活性)。

遮阴组 Z2 与对照组 CK 相比, 生物学过程(BP)基因差异比例大于 0.1 的有 response to blue light(对蓝光的响应)、response to red light(对红光的响应)、response to far red light(对远红光的响应)、photosynthesis, light harvesting in photosystem I(光合作用, 光系统 I 中的光捕获)、photosynthesis, light harvesting(光合作用, 光捕获)、abaxial cell fate specification(背轴细胞命运决定)、cytokinin catabolic process(细胞分裂素分解代谢过程)、hormone catabolic process(激素分解代谢过程)、cytokinin metabolic process(细胞分裂素代谢过程)、floral meristem determinacy(花序分生组织决定



$-\log_{10} p\text{-value}$ 为对 P 值取以 10 为底的对数后再取负值; $\log_2 \text{fold change}$ 中的 fold change 表示基因在 2 个样本之间的表达倍数变化。
 $-\log_{10} p\text{-value}$ is the negative value of the logarithm of the pvalue taken to the base of 10; $\log_2 \text{fold change}$ refers to the logarithm to the base of 2 of the fold change, where fold change represents the magnitude of change in gene expression between two samples.

图 6 差异表达基因分布图
Fig. 6 Distribution of differentially expressed genes

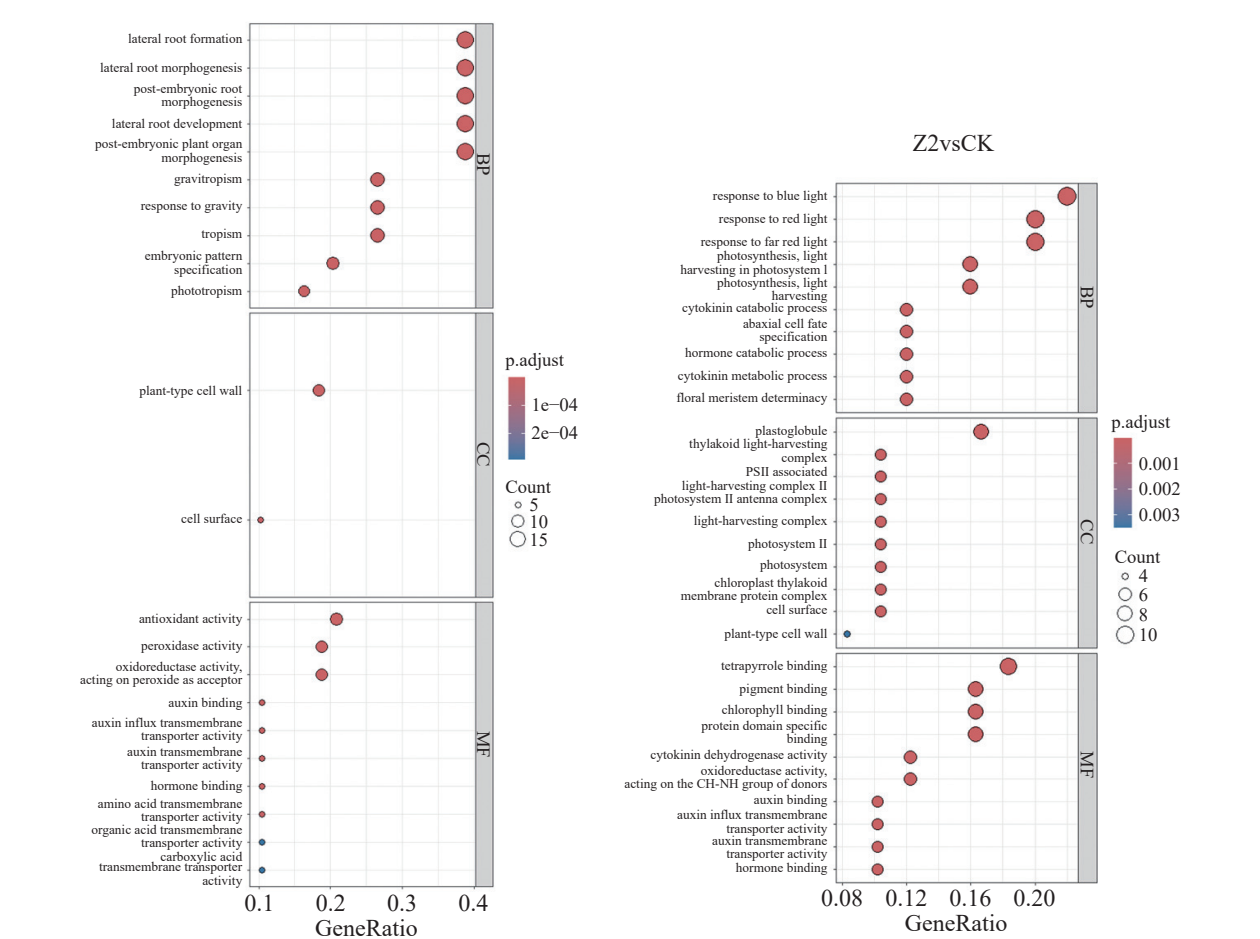


图 7 GO 功能富集点状图
Fig. 7 Dot plot of GO Functional Enrichment

性)。细胞成分(CC)基因差异比例大于 0.1 的有 plastoglobule(质体小球)、thylakoid light-harvesting(类囊体光捕获)、PS II(光系统 II)、light-harvesting complex II(光捕获复合体 II)、photosystem II antenna complex(光系统 II 天线复合体)、light-harvesting complex(光捕获复合体)、photosystem II(光系统 II)、photosystem(光系统)、chloroplast thylakoid membrane protein complex(叶绿体类囊体膜蛋白复合体)、cell surface(细胞表面)。分子功能(MF)基因差异比例大于 0.1 的有 tetrapyrrole binding(四吡咯结合)、pigment binding(色素结合)、chlorophyll binding(叶绿素结合)、protein domain specific(蛋白质域特异性)、cytokinin dehydrogenase(细胞分裂素脱氢酶)、oxidoreductase activity(氧化还原酶活性)、auxin binding(生长素结合)、transporter activity(转运子活性)、auxin transmembrane(生长素跨膜转运)、auxin influx transmembrane(生长素内流跨膜转运)、hormone binding(激素结合)。

3 讨论

3.1 水椰幼苗在低光照水平的生理变化 低光照水平(遮阴)对幼苗生长的影响具有双重性,适度的遮阴有助于幼苗的生长和发育,而过度的遮阴则会产生负面影响。如对于江南油杉幼苗来说,在遮阴率达到 60% 的条件下,其所受的光胁迫相对较小,从而有利于生物量的积累^[7];轻度遮阴对莲叶桐幼苗的生长具有促进作用,有助于增加其生物量的积累^[15]。然而,过度的遮阴则会削弱幼苗的光合作用^[16],导致产生的养分不足以支持其生长需求,进而抑制其正常生长^[17-18]。本研究发现,水椰幼苗在低光照水平下其超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性会有所提升,MDA 含量下降,可溶性蛋白维持稳定,叶绿素含量下降。

水椰幼苗在低光照水平下其超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性会有所提升,有利于水椰幼苗适应低光照水平环境。这与孙彦等^[19]和郭淑芸等^[20]的研究结果一致。可溶性蛋白含量的下降,是逆境对植物造成的一种损害表现^[21]。然而,耐阴性较强的植物在遮荫环境中,能够保持其可溶性蛋白的稳定含量,从而维持其正常生长和生理活动^[22]。

O_2^- 和 H_2O_2 是植物在代谢过程中产生的 2 种

活性氧,它们对细胞膜脂质具有强烈的氧化损害作用,进而产生丙二醛(MDA)。适合水椰分布的年平均温为 23.8 ~ 25.5 °C,试验区域正午温度可达 27 °C 以上,环境温度过高影响植物抗氧化系统清除活性氧的能力,在过度高温胁迫下,膜脂过氧化作用会被触发,导致酶活性中心的破坏、酶结构的改变或酶表达的抑制,未遮阴水椰的抗氧化酶通过增加活性来清除活性氧自由基的能力下降。水椰幼苗在较低的光照条件下的 MDA 含量降低与 ZHANG 等^[23]的研究结果相符。

一般植物应在低光照水平时增加叶绿素含量来维持稳定的光合速率,但本研究发现,遮阴 20、30、40 d 水椰幼苗的叶绿素含量比对照低。此结果产生可能是由于水椰幼苗是通过改变叶绿体的结构和功能,增加红光远红光的吸收,增长光合作用时间来维持稳定的光合产物累积造成的。

在荫阴条件下,可以减少水椰幼苗的蒸腾作用,使气孔导度增加,光合作用时间增加,更有利于植株的快速生长及生物量的增加^[24]。SOD、POD 活性提高,减少叶绿素含量生成,可溶性蛋白含量维持稳定的这些变化是提高水椰幼苗在低光环境下光能吸收和利用效率的重要策略。

3.2 水椰幼苗在低光照水平的转录组差异 本研究利用高通量测序技术对不同光照强度下遮阴 40 d 的水椰叶片进行转录组测序,筛选差异基因,获得了大量的数据和信息。遮荫组 Z1 与对照组 CK 相比,生物学过程(BP)中遮阴影响了植物幼苗的根系发育和形态发生过程。与对照组相比,遮荫组 Z1 的侧根形成增加,这有助于植物在光照不足的环境中扩大根系表面积,提高土壤资源的获取能力。同时,侧根形态发生和胚后根形态发生也发生了变化,使根系结构更加适应遮荫环境^[25]。此外,植物还可以通过调节叶片微观结构来维持自身生理机能来适应外部光照变化^[26]。细胞成分(CC)中遮荫对植物幼苗的细胞成分产生了显著影响。植物型细胞壁的成分和结构发生了调整,以适应遮荫环境。分子功能(MF)中遮阴导致植物幼苗的分子功能发生了广泛变化。过氧化物酶活性和氧化还原酶活性的调整有助于维持植物体内的氧化还原平衡,减轻由遮阴引起的氧化胁迫。抗氧化活性的增强有助于清除体内过多的活性氧,进而保护细胞免受氧化损伤。在激素调控方面,

生长素结合与转运蛋白活性的变化,能够显著影响生长素在植物体内的分布和浓度。此外,激素结合和氨基酸跨膜转运蛋白活性的变化也反映了植物在遮阴环境中对激素和营养物质的利用和调控方式的调整。

遮阴组 Z2 与对照组 CK 相比,生物学过程(BP)中遮阴组 Z2 的光合作用及相关过程受到影响。由于光照减少,光系统 I 中的光捕获能力发生变化,植物对红光、蓝光和远红光的响应也相应调整^[27]。此外,细胞分裂素的分解代谢过程增强,这可能反映了植物在遮阴条件下对激素水平的精细调控。细胞成分(CC)中遮阴组 Z2 的光捕获复合体发生了显著变化。类囊体光捕获复合体、与光系统 II 相关的光捕获复合体 II 以及光系统 II 天线复合体的差异变化,都表明植物在遮阴环境中对光能的捕获和利用进行了调整。此外,光系统 II、光系统以及藻蓝蛋白的变化也反映了植物在适应遮阴条件时叶绿体结构和功能的调整。叶绿体类囊体膜蛋白复合体的变化则可能影响了光能转换和电子传递的效率。分子功能(MF)中遮阴组 Z2 的色素结合能力发生了变化,这影响了植物对光的吸收和利用。叶绿素 II 结合和四吡咯结合能力的改变也进一步证明了这一点。细胞分裂素脱氢酶的变化反映了植物在遮阴条件下对细胞分裂素的代谢调控。生长素结合和生长素流入跨膜转运蛋白活性的变化则影响了生长素在植物体内的分布和浓度,进而调控了植物的生长和发育。此外,氧化还原酶活性的变化,以及针对供体 CH-NH 基团起作用的氧化还原酶活性的变动,也反映了植物在遮阴环境中氧化还原状态的调整。

总而言之,水椰幼苗在低光照水平下(自然光照强度的 20%、30%)拥有较高的抗氧化酶活性、较低的丙二醛含量、稳定的可溶性蛋白含量、低叶绿素含量和稳定的生物量,同时转录组差异分析发现,水椰幼苗在低光照水平下抗氧化酶、侧根形成、细胞壁组成、叶绿体对红光等基因表达差异显著。

参考文献:

- [1] 廖宝文. 红树林 中国海岸的“两栖植物”[J]. 森林与人类, 2019(3): 100–111.
- [2] 赖李佳子. 淇澳红树林湿地生态系统服务功能价值评估及其生态补偿研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2011.
- [3] 王萍, 刘立云, 陈思婷. 孑遗植物水椰的生物学特性及研究展望[J]. 中国野生植物资源, 2008, 27(3): 19–20.
- [4] WIDODO P, SUKARSA, HERAWATI W, et al. Distribution and characteristics of *Nypa palm* (*Nypa fruticans* wurmb.) in southern part of cilacap regency[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 550(1): 012010.
- [5] 于永福. 中国野生植物保护工作的里程碑——《国家重点保护野生植物名录(第一批)》出台[J]. 植物杂志, 1999(5): 4.
- [6] 王文涛, 魏蓉, 徐幸酬, 等. 不同水分和光照处理对走马胎生理生化特性的影响[J]. 广西科学院学报, 2023, 39(4): 403–411.
- [7] 张培, 庞圣江, 刘士玲, 等. 遮荫对江南油杉幼苗生长和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(10): 1716–1722.
- [8] 张孟文, 钟才荣, 吕晓波, 等. 中国孑遗红树植物水椰的资源现状与种群特征[J]. 生态学杂志, 2023(42): 2918–2925.
- [9] 海口气象局信息网. 海口市气候概况[EB/OL]. [2024-06-24]. <http://hkqx.net/Home/HaikouQX>.
- [10] 朱一民, 李婷, 景宇杭, 等. 八种红树植物幼苗的叶片可溶性蛋白和抗氧化酶活性对光强的响应[J]. 广西植物, 2023, 43(4): 606–615.
- [11] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases[J]. Plant Physiology, 1977, 59(2): 309–314.
- [12] 陈贻竹, 王以柔. 荔枝果实过氧化物酶(POD)的研究[J]. 中国科学院华南植物研究所集刊, 1989(5): 47–52.
- [13] 都浩, 王妮丽, 熊立仲. 水稻叶片中丙二醛(MDA)含量的测定[J]. Bio-protocol, 2018: e1010148. doi: 10.21769/BioProtoc.1010148.
- [14] 舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(4): 399–402.
- [15] 方赞山, 钟才荣, 程成, 等. 遮荫对莲叶桐幼苗生长及生物量分配的影响[J/OL]. 分子植物育种: 1–20. (2023-06-12)[2024-06-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230612.1151.004.html>.
- [16] 陶巧静, 吴月燕, 付涛, 等. 弱光胁迫对西洋杜鹃生理特性和叶片超微结构的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(3): 84–92.
- [17] 智西民, 王梦颖, 牛畔青, 等. 遮荫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.
- [18] 战丽杰, 张宏宝, 李宗泰, 等. 遮荫处理对芍药幼苗生长和矿质营养积累的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3473–3479.
- [19] 江佳琳, 孙彦. 遮荫强度对不同来源白颖苔草形态和生理指标的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(6): 1136–1143.
- [20] 李先民, 李春牛, 刘新亮, 等. 遮阴对杜鹃红山茶幼苗叶片生长特性及初生代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(2): 294–301.
- [21] DENG Y, LI C, SHAO Q, et al. Differential responses

- of double petal and multi petal jasmine to shading: I. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure[J]. *Plant Physiology and Biochemistry: PPB*, 2012, 55: 93 – 102.
- [22] 郭淑芸, 朱亚祥, 李铁华. 遮荫与加氮对青冈栎幼苗生长与生理特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(6): 1 – 10
- [23] ZHANG M, ZHANG G. A new combination of Caragana(Fabaceae)from China[J]. *Zhiwu Yanjiu*, 2004, 24(1): 5 – 6.
- [24] 苏泽阳, 杨再强, 龙宇芸, 等. 寡照条件下补光频率对番茄幼苗叶片光合特性的影响[J]. *中国农业气象*, 2022, 43(9): 720 – 731.
- [25] ZHANG W, FANG D, DONG K, et al. Insights into the environmental factors shaping lateral root development [J]. *Physiologia Plantarum*, 2023, 175(2): e13878.
- [26] 王玟玥, 赵丹丹, 张鸽香, 等. 毛茛科 3 种植物在遮光下叶片解剖结构比较及耐阴性评价 [J]. 南方农业学报, 2024, 55(6): 1713 – 1723.
- [27] XIE X, CHENG H, HOU C, et al. Integration of light and auxin signaling in shade plants: from mechanisms to opportunities in urban agriculture[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(7): 3422.

Physiological response and transcriptome differential changes of *Nypa fruticans* seedlings under low light environment

WANG Peng[#], HUAI Zhiwen, LIU Zihan, LEI Peng, GENG Xiaoxiao*
(College of Ecology, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: An attempt was made to analyze the physiological changes and transcriptome expression differences in *Nypa fruticans* seedlings under low light levels (CK: 100% of natural light intensity; Z1: 30% of natural light intensity; Z2: 20% of natural light intensity) through shading experiments to reveal the physiological responses and differential changes in the transcriptome of *N. fruticans* seedlings under low light levels, providing a scientific basis for the breeding of *N. fruticans*. The results indicated that at 40 days under low light conditions, the superoxide dismutase (SOD) activity in *N. fruticans* seedlings was 57.1% higher in Z1 and 62.1% higher in Z2 as compared to CK. Similarly, peroxidase (POD) activity was 41.2% higher in Z1 and 35.7% higher in Z2 compared to CK. Malondialdehyde (MDA) content was 42.6% lower in Z1 and 32.9% lower in Z2 compared to CK. However, chlorophyll (Chl) content was decreased by 61.1% in Z1 and 70.3% in Z2 compared to CK. Soluble protein (SP) content remained stable with no significant differences observed. The root-shoot ratio was 57.6% lower in Z1 and 48.1% lower in Z2 compared to CK. Under low light levels, *N. fruticans* seedlings were adapted to reduced light intensity within approximately 10 days by enhancing antioxidant enzyme activities, increasing leaf area, and promoting lateral root growth. Even in lower light availability, seedlings were further adapted to the environment by improving light absorption efficiency and regulating hormone levels.

Keywords: *Nypa fruticans*; shading experiment; physiological response; transcriptome

(责任编辑: 潘学峰)