



水氮处理对岛礁植物假茉莉生理适应性的影响

聂丽云, 张弯弯, 李仕裕, 简曙光, 刘东明, 邢福武, 王发国

引用本文:

聂丽云, 张弯弯, 李仕裕, 等. 水氮处理对岛礁植物假茉莉生理适应性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(4): 403–410.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4172>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

竹柏2种颜色叶片的光合特性研究

Photosynthetic Characteristics of Two Color Leaves of *Podocarpus nagi*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 177–184 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4134>

海南不同生活型植物叶片和根系C、N、P化学计量特征

C, N, and P Concentrations and Their Stoichiometry of Leaves and Roots with Different Life Forms in Hainan Province

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 131–135 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4115>

植物营养体胎生研究进展

Research Progress of Vegetative Vivipary in Plants

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 209–216 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4124>

UV-B预处理诱导拟南芥耐旱性的提高

UV-B-induced Drought Tolerance Improvement in *Arabidopsis thaliana*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 171–176 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4104>

6种园林植物耐旱性分析

Drought Tolerance of Six Garden Species

热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 310–316 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4128>

水氮处理对岛礁植物假茉莉生理适应性的影响

聂丽云^{1,2}, 张弯弯^{1,3}, 李仕裕^{1,2}, 简曙光¹, 刘东明¹, 邢福武¹, 王发国^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 中国科学院海岛与海岸带生态修复工程实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广州 510225)

摘要: 为了解假茉莉(*Clerodendrum inerme*)对热带珊瑚岛礁的生理适应性, 采用不同浇水频率和氮素处理, 对假茉莉的光合特性及抗逆生理生化特性进行了研究。结果表明, 不同浇水频率对于假茉莉生理特性影响较大, 而不同氮素处理间的差异不大, 说明假茉莉对水分胁迫更加敏感。在低浇水频率下, 假茉莉叶绿素 a 含量和叶绿素 a/b 最高, 且与其他浇水频率间的差异显著, 净光合速率、气孔导度、水分利用率均显著高于高浇水频率, 而蒸腾速率显著低于高浇水频率, 表现出较好的光合同化效率和水分利用效率; 中等浇水频率的脯氨酸含量最高, 为(5.04±1.21) mg/g, 可降低植物体的渗透压, 保证干旱胁迫下对水分的吸收。低浇水频率的相对电导率最低, 为 0.17±0.03, 可减少干旱胁迫对细胞膜系统的损伤。因此, 假茉莉对干旱、贫瘠的热带珊瑚岛礁生境具有很好的适应能力。

关键词: 假茉莉; 水分; 氮; 适应性; 热带珊瑚岛礁

doi: 10.11926/jtsb.4172

Effects of Water and Nitrogen Treatment on Physiological Adaptability of Island Reef Plant *Clerodendrum inerme*

NIE Li-yun^{1,2}, ZHANG Wan-wan^{1,3}, LI Shi-yu^{1,2}, JIAN Shu-guang¹, LIU Dong-ming¹, XING fu-wu¹, WANG Fa-guo^{1*}

(1. Engineering Laboratory for Vegetation Ecosystem Restoration on Islands and Coastal Zones, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Horticulture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: In order to understand the physiological adaptability of *Clerodendrum inerme* to tropical coral islands, the photosynthetic and stress resistance characteristics of *C. inerme* were studied under different water and nitrogen treatments. The results showed that watering frequency had greater effects than nitrogen treatment on physiological characteristics of *C. inerme*. The chlorophyll (Chl) a content and Chl a/b were the highest under low watering frequency with significant difference under other watering frequencies. The net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and water use efficiency (WUE) under low watering frequency were significantly higher than those under high watering frequency, while the transpiration rate (T_r) was significantly low, showing better photosynthetic capacity and water use efficiency. The proline (Pro) content under medium watering frequency was the highest with (5.04±1.21) mg/g, which could reduce the osmotic pressure and increase water absorption under drought stress; the relative conductivity under low watering frequency was the lowest with 0.17±0.03, which could reduce membrane system damage caused by drought stress. Therefore, *Clerodendrum*

收稿日期: 2019-11-07 接受日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金重点项目(U1701246); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13020500); 广东省科技计划项目(2019B121201005); 国家自然科学基金项目(41571056); 军队后勤开放研究项目(AHJ8J003)资助
This work was supported by the Key Programs of NSFC-Guangdong Province Union Funds (U1701246); the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13020500); the Guangdong Science and Technology Program (2019B121201005); the National Natural Science Foundation of China (41571056); and the Open Project for Research of Army Logistics (Grant No. AHJ8J003).

作者简介: 聂丽云(1996~), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物分类与资源利用。E-mail: nieliyun@scbg.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wangfg@scbg.ac.cn

inerme has a good adaptability to drought and barren habitats in tropical coral islands.

Key words: *Clerodendrum inerme*; Water; Nitrogen; Physiological adaptability; Tropical coral islands

热带珊瑚岛光照强且季节性干旱明显, 岛上的岩石主要是第四纪珊瑚、贝壳碎屑灰岩和近期海浪堆积的珊瑚、贝壳碎屑砂, 土壤贫瘠、保水能力差^[1-2]。植物在岛礁环境生长定居时, 极易遭受干旱和氮素胁迫, 只有少数能耐盐碱、干旱、贫瘠等极端环境的热带海滨植物才能在珊瑚岛存活生长, 把珊瑚岛恢复或建成可持续发展的绿色宜居生态岛时, 需要大量适生的工具种植物^[3-4]。

环境胁迫会直接或间接引起植物一系列代谢功能的变化, 这些变化可以作为鉴定植物抗逆性的重要指标^[4]。光合色素是植物光合作用的载体, 叶绿素(Chl) a能够吸收光能, 并将光能转化为化学能, Chl b和类胡萝卜素则可将吸收的光能传递给 Chl a, 推动光化学过程, 促进光合产物的生成^[5]。而 Chl a/b则反映了捕光色素复合体 II(LHC II)在所有含叶绿素的结构中所占的比例, 比值高说明捕光能力强^[6]。光合作用是植物合成同化产物的基础, 干旱胁迫下植物光合作用降低主要受两个因素限制, 一是气孔因素, 干旱胁迫时植物关闭气孔以降低蒸腾作用, 导致 CO₂ 吸收减少, 光合作用下降; 二是非气孔因素, 由于叶绿体活性和核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶活性下降, 核酮糖二磷酸羧化酶再生能力降低, 导致叶片光合作用能力下降^[6-9]。另外, 在植物干旱胁迫响应及其适应过程中, 渗透调节也发挥着重要的作用, 渗透调节即植物体内通过积累脯氨酸、可溶性糖、甜菜碱、无机离子等提高细胞液浓度, 降低渗透势来保持植物体内水分^[10]。

假茉莉(*Clerodendrum inerme*)是热带珊瑚岛礁的常见灌木, 隶属于马鞭草科(Verbenaceae)大青属, 分布于亚洲东南部至大洋洲北部的海岸沙滩及岛屿, 常生于红树林、海岸带的群落林缘^[11]。因其具有耐干旱、耐盐碱^[12-13]、抗病虫^[14-16]等优良特性, 被认为是海岛植被恢复的潜在工具种。有研究表明, 同种栽培基质中, 假茉莉在中、低浇水频率, 少施氮肥或不施氮肥条件下仍然能够获得较高的生物量^[17-18]; 对假茉莉在干旱、贫瘠环境胁迫下的生理特性进行分析, 有利于该物种的开发利用。另外, 目前岛礁人工种植的苗木成活率不高, 后期养护成本投入较大, 因此, 如何提高苗木存活率, 减少后期养护成本是十分关键的问题。本研究分析了

不同水分、氮肥条件下假茉莉的生理特性, 总结出最适合假茉莉的水氮养护管理技术, 为进一步完善岛礁植被的栽培管理技术, 改善岛礁生境条件, 构建能自我维持宜居生态岛奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

于 2016 年 6-12 月, 选取生长健壮、高度约为 90 cm 的 2 a 生假茉莉(*Clerodendrum inerme*)幼苗(图 1), 在广州中国科学院华南植物园实验大棚进行试验, 将原栽培土去除后分别按照不同配比的基质, 将幼苗种植于 30 cm×25 cm 的花盆中。栽培基质为珊瑚砂、红壤土、泥炭、椰糠按不同质量比混合, 施加一定的氮素肥料。

试验设计 2 个因素: 水分和氮肥。浇水频率设置 3 个水平: 高频(W₀, 2 d 浇 1 次)、中频(W₁, 5 d 浇 1 次)和低频(W₂, 7 d 浇 1 次); 氮素设置 3 个水平: 低氮(N₀, 不施氮肥)、中氮(N₁, 施 0.2 g/kg 氮肥)和高氮(N₂, 施 0.4 g/kg 氮肥); 设计交叉试验共计 9 个处理, 每处理 30 株苗。

1.2 方法

光合指标的测定 从 2016 年 6 月起, 每隔 45 d, 选取有代表性的植株测定光合指标。每个处理选取 3~10 株长势一致的植株, 选择晴朗天气, 在上午 8:30-11:30 用 LI-6400 便携式光合仪(LI-COR, Inc, USA)测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s), 并计算水分利用率 WUE=P_n/T_r^[19]。

光合色素含量的测定 光合色素采用 95% 乙醇萃取比色法^[20]提取, 然后用 UV759CRT 紫外可见分光光度计分别在 665、649 和 470 nm 波长处测定吸光度(A₆₆₅, A₆₄₉, A₄₇₀), 计算叶片的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和类胡萝卜素(Car)含量以及 Chl a/b^[21]。光合色素浓度(mg/L)的计算公式: Chl a=13.95A₆₆₅-6.88A₆₄₉, Chl b=24.96A₆₄₉-7.32A₆₆₅, Car=(1000A₄₇₀-2.05Chl a-114.8Chl b)/245, 并转换为光合色素含量(mg/g)。

抗逆生理指标的测定 采用电导率仪法^[22]测定叶片相对电导率(REC), 采用茛三酮比色法^[22]



图 1 假茉莉的花(A)、果(B)和全株(C)

Fig. 1 Flowers (A), fruits (B) and whole plant (C) of *Clerodendrum inerme*

测定脯氨酸(Pro)含量。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据录入, 利用 R 3.5.3 软件^[23]对不同浇水频率下, 假茉莉的光合指标和抗逆生理指标进行单因素方差分析(LSD 法), 对于少数不符合方差齐性的组别, 采用秩和检验 Kruskal-Wallis 法^[24]; 对不同水氮处理下, 假茉莉的生理指标进行双因素方差分析, 并利用 R corrplot 进行相关性分析^[25]。

2 结果和分析

2.1 不同浇水频率的影响

对色素含量的影响 不同浇水频率处理对假茉莉的光合色素含量有显著影响(图 2)。Chl a 含量和 Chl a/b 表现为 $W_2 > W_1 > W_0$, 且不同浇水频率间的差异显著, Chl a+b 含量表现为 W_1 、 W_2 显著高于 W_0 , 类胡萝卜素(Car)含量表现为 W_0 、 W_2 显著高于 W_1 , 而 Chl b 的差异不显著; 中、低浇水频率的假茉莉叶绿素含量较高, 表明适度干旱能够提

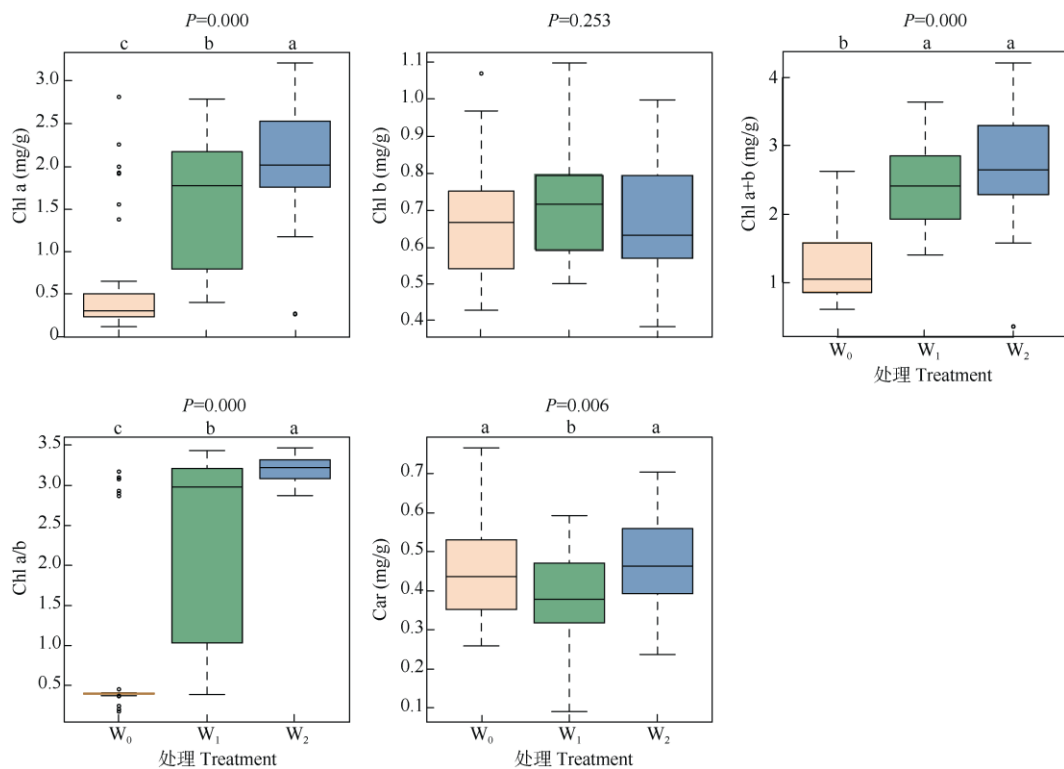


图 2 浇水频率对假茉莉光合色素含量的影响。柱上不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Fig. 2 Effect of watering frequency on photosynthetic pigment contents of *Clerodendrum inerme*. Different letters indicate significant differences at 0.05 level.

The same is following Figures.

高假茉莉的光合作用。

对光合特征的影响 光合作用是植物生长发育最重要的生理过程, 对干旱胁迫非常敏感。不同浇水频率下假茉莉的光合特征存在显著差异(图 3)。W₂ 处理的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、水分利用率(WUE)均显著高于 W₀ 处理的, 而蒸腾速率(T_r)显著低于 W₀, 这表明在低浇水频率下, 假茉莉能够通过调节气孔, 在保证较高气孔导度的同时保持较小的蒸腾速率, 以保证吸收充足的 CO₂, 提高净光合速率, 同时减少水分散失, 进而提高水分利用率。

对抗逆生理生化的影响 不同浇水频率对假茉莉抗逆生理生化特性具有显著影响(图 4), 脯氨酸(Pro)含量表现为 W₁、W₂ 显著高于 W₀, 而相对电导率(REC)则呈现 W₁>W₀>W₂, 且差异显著。W₁ 处理的 Pro 含量最高, 为(5.04±1.21) mg/g, 这有利于降低植物体渗透压, 保证干旱胁迫下植物对水分的正常吸收; W₂ 处理的 REC 最低, 为 0.17±0.03, 这可减少干旱胁迫对膜系统的损伤。

2.2 不同氮素处理的影响

由表 1 可知, 不同浇水频率对假茉莉生理指标

均表现出显著或极显著差异; 而不同氮素处理, 除可溶性糖含量的差异显著外, 其他指标的差异均不显著。这表明, 不同氮素水平对假茉莉的生理特性影响不大, 低氮环境下假茉莉仍然能够正常生长。因此, 相比于氮素胁迫, 假茉莉对于水分胁迫更加敏感。

2.3 相关性分析

在不同水氮条件下, 假茉莉的生理指标间存在一定的相关性(表 2)。对于光合色素含量来说, Chl a 与 Chl b 含量的相关性不显著, 但 Chl a、Chl b 含量均与 Chl a+b、Chl a/b 存在显著的正相关关系; 相比于 Chl b 含量, Chl a 含量与 Chl a+b、Chl a/b 的相关系数均更大($r=0.81$ 和 0.85), 说明 Chl a 含量是影响 Chl a+b 和 Chl a/b 的最关键因素。另外, 相比于 Chl b 和 Chl a+b 含量, Chl a 含量与其他生理指标间具有更强的相关性, Chl a 与 Pro、P_n、G_s 和 WUE 呈显著的正相关关系, 相关系数 r 分别为 0.45、0.24、0.32 和 0.32, 与 REC 和 T_r 呈显著的负相关关系, 相关系数 r 分别为 -0.23 和 -0.21; Chl a/b 与其他生理指标间的相关性也显著。对于光合特征来说, P_n 与 T_r 呈显著的负相关关系($r=-0.31$), 与 G_s 呈显著的正相关关系($r=0.43$), T_r 和 G_s 的相关性不

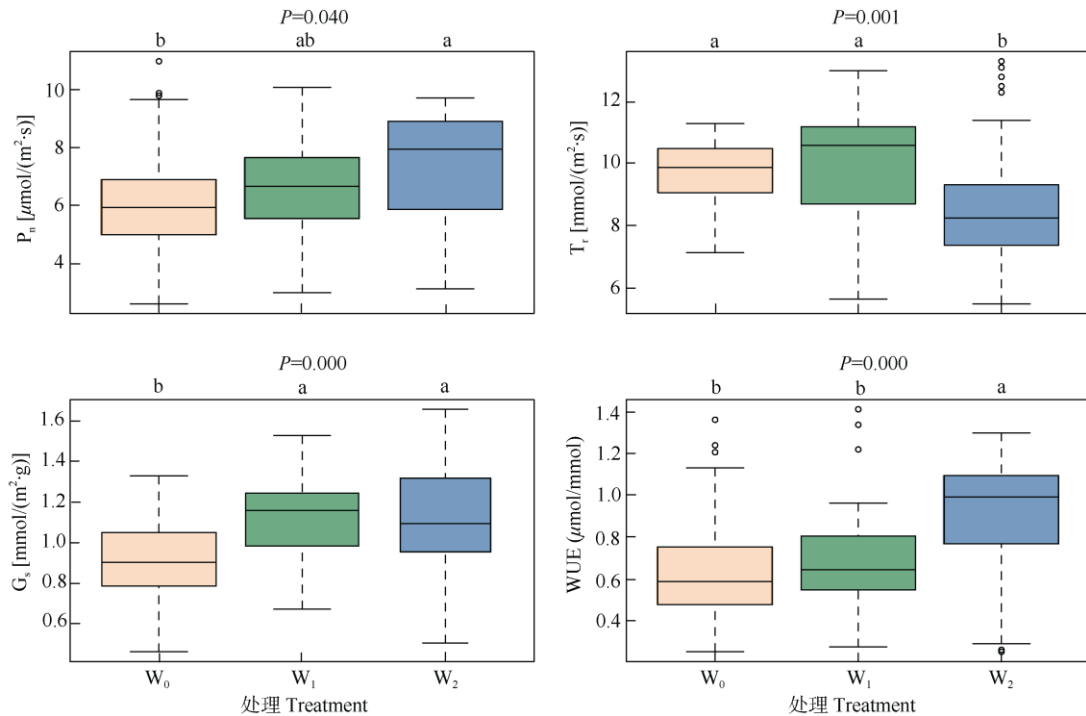


图 3 浇水频率对假茉莉净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和水分利用率(WUE)的影响

Fig. 3 Effect of watering frequency on net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) of *Clerodendrum inerme*

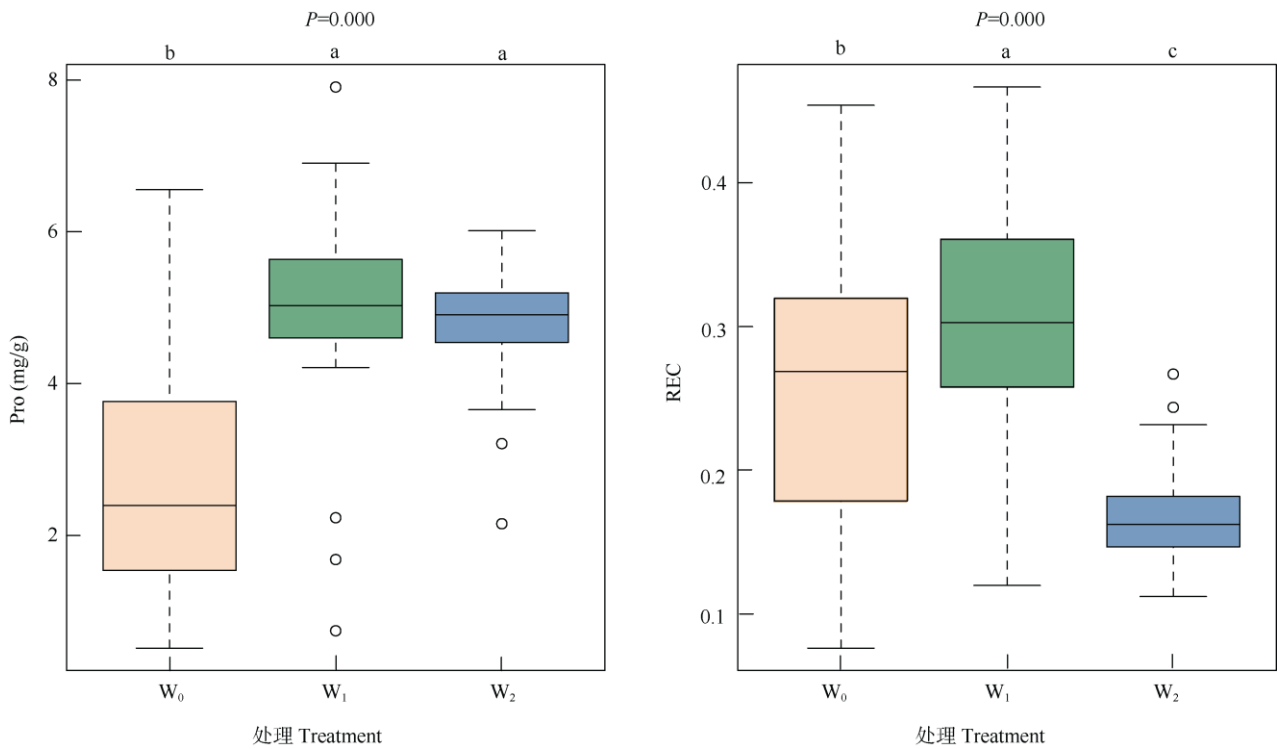


图 4 浇水频率对假茉莉脯氨酸(Pro)含量和相对电导率(REC)的影响

Fig. 4 Effect of watering frequency on proline (Pro) content and relative electrolytic conductance (REC) of *Clerodendrum inerme*

表 1 水氮处理对假茉莉生理指标的双因素方差分析

Table 1 Two-Way Anova analysis of watering frequency and nitrogen treatment on physiological indexes of *Clerodendrum inerme*

	群组 Group	Df	F	P(>F)		群组 Group	Df	F	P(>F)
Chl a	W	2	58.023	0.000***	REC	W	2	35.967	0.000***
	N	2	1.371	0.258		N	2	0.682	0.508
	W×N	4	1.264	0.288		W×N	4	1.794	0.134
Chl b	W	2	1.715	0.185	P _n	W	2	3.425	0.036*
	N	2	0.733	0.483		N	2	1.909	0.152
	W×N	4	1.108	0.357		W×N	4	1.855	0.122
Chl a+b	W	2	58.376	0.000***	T _r	W	2	7.040	0.001**
	N	2	0.960	0.386		N	2	1.444	0.24
	W×N	4	1.867	0.12		W×N	4	0.386	0.818
Chl a/b	W	2	98.120	0.000***	G _s	W	2	14.217	0.000***
	N	2	1.633	0.199		N	2	1.056	0.352
	W×N	4	0.760	0.553		W×N	4	1.738	0.147
Car	W	2	8.380	0.000***	WUE	W	2	8.418	0.000***
	N	2	1.073	0.345		N	2	0.006	0.994
	W×N	4	1.120	0.35		W×N	4	0.349	0.844
Pro	W	2	58.194	0.000***					
	N	2	1.563	0.213					
	W×N	4	3.318	0.013*					

Df: 自由度; W: 浇水频率; N: 氮素; Pro: 脯氨酸; REC: 相对电导率; P_n: 净光合速率; T_r: 蒸腾速率; G_s: 气孔导度; WUE: 水分利用率。***: P<0.001; **: P<0.01; *: P<0.05。下表同。

Df: Freedom degree; W: Watering frequency; N: Nitrogen; Pro: Proline; REC: Relative electrolytic conductance; P_n: Net photosynthetic rate; T_r: Transpiration rate; G_s: Stomatal conductance; WUE: Water use efficiency. ***: P<0.001; **: P<0.01; *: P<0.05. The same is following Table.

表 2 假茉莉生理指标间的相关性

Table 2 Correlation among physiological indexes of *Clerodendrum inerme*

	Chl b	Chl	Chl a/b	Car	Pro	REC	P _n	T _r	G _s	WUE
Chl a	0.11	0.81	0.85	0.32	0.45	-0.23	0.24	-0.21	0.32	0.32
Chl b		0.67	-0.29	0.68	-0.18	0.09	0.01	0.01	-0.08	-0.01
Chl			0.47	0.64	0.23	-0.12	0.19	-0.15	0.19	0.23
Chl a/b				0.02	0.49	-0.32	0.24	-0.22	0.37	0.34
Car					-0.12	-0.10	-0.03	-0.03	0.03	-0.01
Pro						0.01	0.03	-0.07	0.24	0.09
REC							-0.18	0.35	-0.31	-0.33
P _n								-0.31	0.43	0.86
T _r									-0.26	-0.71
G _s										0.48

显著。REC 和 Pro 不具有显著的相关关系。

3 结论和讨论

3.1 假茉莉对氮素胁迫的生理响应

所有营养元素中, 氮素对植物生长发育的影响最大。已有研究表明, 虽然珊瑚岛土壤贫瘠, 但是移栽到珊瑚岛上的多数海岛植物并未表现出显著的氮素亏缺, 表明这些海岛植物都能够适应海岛生境^[3]。珊瑚岛常见植物草海桐(*Scaevola sericea*)和长春花(*Catharanthus roseus*)等的根际土壤养分含量偏低, 但植物体内营养元素含量却较高, 且生长状况良好, 表明这些植物对土壤养分的利用效率都较高, 能够适应土壤贫瘠的珊瑚岛环境^[26-27]。本研究结果表明, 不同施氮水平下, 假茉莉各项生理指标的差异并不显著, 另外, 有研究表明, 不同氮素处理对假茉莉生物量的影响不大^[17]。可见, 假茉莉对于氮素胁迫具有一定的抗性, 在低氮条件下仍能较好生长。

3.2 假茉莉对水分胁迫的生理响应

干旱会导致植物生理性脱水, 进而导致植物呼吸、光合系统的紊乱和细胞膜透性损坏和代谢失调, 最终造成植株生长抑制、萎蔫、局部坏死或全株死亡^[6]。不同植物对于干旱胁迫具有不同的生理响应机制。如李婕等研究比较了七种热带滨海植物的适生性, 研究认为珊瑚岛上的植物主要通过降低蒸腾速率的方式来提高水分利用效率, 抵御干旱胁迫^[3]。另也有研究认为, 在干旱环境中, 叶绿素含量的降低有利于调整光能分配, 保证整个光合系统的正常运行^[28]。如张世柯等的研究表明, 滨海植物

红厚壳(*Calophyllum inophyllum*), 相比于西沙群岛优势乔木榄仁树(*Terminalia catappa*)和海滨木巴戟(*Morinda citrifolia*), 叶绿素含量更低, 以此来减少干旱环境引起的伤害, 并增强抗旱能力和对强光环境的适应能力^[29]。本研究结果显示, 相比于氮素胁迫, 假茉莉对于水分胁迫更加敏感。低浇水频率下假茉莉的 Chl a 含量和 Chl a/b 最高, 且与其他浇水频率间的差异显著, 这表明在低浇水频率下, 假茉莉具有较强的捕光能力, 因此适度干旱可提高假茉莉的光合作用。在低浇水频率下, 假茉莉的 P_n、G_s 和 WUE 均显著高于高浇水频率的, 而 T_r 显著低于高浇水频率; 表明低浇水频率下假茉莉仍能够有效调节气孔开闭, 保证充足的 CO₂ 吸收, 从而提高 P_n, 同时保持较低的 T_r, 减少水分散失, 进而提高水分利用率, 对于干旱胁迫做出响应。

而在渗透调节方面, 前人的研究表明, 在一定范围内, 植物受到的干旱胁迫或盐胁迫强度越大, Pro 积累越明显, 增加植物对渗透胁迫的抗性^[4,30]。假茉莉的 Pro 含量表现为中、低浇水频率显著高于高浇水频率, 而 REC 则呈现 W₁>W₀>W₂, 且差异显著。中等浇水频率的 Pro 含量最高, 为(5.04±1.21) mg/g, 有利于降低植物体内渗透压, 保证干旱胁迫下植物对水分的正常吸收; 低浇水频率的 REC 最低, 为 0.17±0.03, 有利于减少干旱胁迫对膜系统的损伤。

在干旱胁迫下, 植株能够对胁迫做出响应以提高水分利用率, 各生理指标的相关性分析结果表明, 假茉莉的水分利用率与 Chl a、Chl a+b、Chl a/b、净光合速率、气孔导度呈显著的正相关关系, 相关系数 *r* 分别为 0.32、0.23、0.34、0.86 和 0.48; 而与相对电导率, 蒸腾速率呈显著的负相关关系, 相关

系数 r 分别为-0.33 和-0.71, 这表明在低浇水频率下, 假茉莉能够提高光合色素含量, 尤其是 Chl a 含量, 保证较高的捕光能力, 同时具有较高的气孔导度, 保持 CO_2 的正常吸收, 以提高净光合速率, 降低蒸腾速率, 进而提高水分利用率, 保证假茉莉在干旱胁迫下的正常生长。

因此, 假茉莉对于氮素胁迫具有一定的抗性, 因而可以少施氮肥以提高氮肥利用率。假茉莉对于水分胁迫较敏感, 因而在热带珊瑚岛礁植被恢复中, 应优先考虑水分的管理, 采用合理低频浇水, 将有利于提高假茉莉的光合同化能力和抗逆性, 加强对热带岛礁干旱环境的适应。在热带珊瑚岛礁植被恢复工作中, 假茉莉是优良的新建植被先锋树种, 采用合理的低频浇水、少施氮肥, 即可达到快速、高效构建珊瑚砂环境植被的目标。

参考文献

- [1] GONG Z T, ZHANG G L, YANG F. Soils and the soil ecosystem in the South China Sea Islands [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, 22(2): 183–188. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.02.003.
龚子同, 张甘霖, 杨飞. 南海诸岛的土壤及其生态系统特征 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 183–188. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.02.003.
- [2] REN H, JIAN S G, ZHANG Q M, et al. Plants and vegetation on South China Sea Islands [J]. *Ecol Environ Sci*, 2017, 26(10): 1639–1648. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.001.
任海, 简曙光, 张倩娟, 等. 中国南海诸岛的植物和植被现状 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1639–1648. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.10.001.
- [3] LI J, LIU N, REN H, et al. Ecological adaptability of seven plant species to tropical coral island habitat [J]. *Ecol Environ Sci*, 2016, 25(5): 790–794. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.05.009.
李婕, 刘楠, 任海, 等. 7种植物对热带珊瑚岛环境的生态适应性 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 790–794. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.05.009.
- [4] LIN Y X, LIU H, HE P C, et al. Physiological and biochemical responses of three species to environment stresses of tropical coral islands [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2017, 25(6): 562–568. doi: 10.11926/jtsb.3755.
林忆雪, 刘慧, 贺鹏程, 等. 三种适生植物对热带珊瑚岛胁迫生境的生理生化响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(6): 562–568. doi: 10.11926/jtsb.3755.
- [5] XIE L Y, SUN X, ZHAO H L, et al. Responses of flag-leaf photosynthetic pigments at late growth stage and rice yield components to elevated CO_2 under FACE system [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2015, 23(4): 425–431. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.141258.
谢立勇, 孙雪, 赵洪亮, 等. FACE条件下水稻生育后期剑叶光合色素含量及产量构成的响应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(4): 425–431. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.141258.
- [6] TONG W J, DENG X P, XIE H, et al. Responses of physiological characteristics of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) to drought stress at root extending stage and drought resistances evaluation [J]. *J Agric Sci Technol*, 2018, 20(6): 28–40. doi: 10.13304/j.nykjdb.2017.0850.
童文杰, 邓小鹏, 谢贺, 等. 烤烟伸根期生理特性对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价 [J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(6): 28–40. doi: 10.13304/j.nykjdb.2017.0850.
- [7] KOVAČEVIĆ J, KOVAČEVIĆ M, CESAR V, et al. Photosynthetic efficiency and quantitative reaction of bread winter wheat to mild short-term drought conditions [J]. *Turk J Agric For*, 2013, 37(4): 385–393. doi: 10.3906/tar-1202-27.
- [8] LAUTERI M, HAWORTH M, SERRAJ R, et al. Photosynthetic diffusional constraints affect yield in drought stressed rice cultivars during flowering [J]. *PLoS One*, 2014, 9(10): e109054. doi: 10.1371/journal.pone.0109054.
- [9] ZHOU S S, LI M J, GUAN Q M, et al. Physiological and proteome analysis suggest critical roles for the photosynthetic system for high water-use efficiency under drought stress in *Malus* [J]. *Plant Sci*, 2015, 236: 44–60. doi: 10.1016/j.plantsci.2015.03.017.
- [10] LI X Q, JING Y T, FENG Q, et al. Effects of drought stress simulated by PEG on physiological characteristics in different flue-cured tobacco cultivars [J]. *Chin Tob Sci*, 2016, 37(3): 15–21. doi: 10.13496/j.issn.1007-5119.2016.03.003.
李晓青, 荆月婷, 冯全福, 等. PEG模拟干旱胁迫对不同烤烟品种生理特性的影响 [J]. *中国烟草科学*, 2016, 37(3): 15–21. doi: 10.13496/j.issn.1007-5119.2016.03.003.
- [11] PEI J, CHEN S L. *Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 65(1)* [M]. Beijing: Science Press, 1982: 154.
裴鉴, 陈守良. 中国植物志, 第65卷第1分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 154.
- [12] SHAN J L, ZHENG X Q. Isolation of cDNA related to salt-tolerance in mangrove *Clerodendrum inerme* by mRNA differential display [J]. *Chin J Trop Crop*, 2005, 26(2): 100–103.
单家林, 郑学勤. 利用 mRNA 差别显示技术分离红树植物许树耐盐相关 cDNA [J]. *热带作物学报*, 2005, 26(2): 34–38.
- [13] XIONG Y P, YAN H F, LIANG H Z, et al. RNA-Seq analysis of *Clerodendrum inerme* (L.) roots in response to salt stress [J]. *BMC*

- Genom, 2019, 20(1): 724. doi: 10.1186/s12864-019-6098-y.
- [14] GEBBINCK E A K, JANSEN B J M, de GROOT A. Insect anti-feedant activity of clerodane diterpenes and related model compounds [J]. *Phytochemistry*, 2002, 61(7): 737–770. doi: 10.1016/S0031-9422(02)00174-7.
- [15] PEREIRA J, GURUDUTT K N. Growth inhibition of *Musca domestica* L. and *Culex quinquefasciatus* (Say) by (–)-3-epicaryoptin isolated from leaves of *Clerodendron inerme* (Gaertn) (Verbenaceae) [J]. *J Chem Ecol*, 1990, 16(7): 2297–2306. doi: 10.1007/BF01026939.
- [16] BI X L, DENG Y C, CHEN K L. Inhibitory activities of the extracts from mangrove plants against spores of the three pathogens [J]. *Plant Prot*, 2008, 34(1): 89–92. doi: 10.3969/j.issn.0529-1542.2008.01.020.
毕秀莲, 邓业成, 陈凯灵. 红树植物提取物对 3 种植物病原真菌孢子的抑制活性 [J]. *植物保护*, 2008, 34(1): 89–92. doi: 10.3969/j.issn.0529-1542.2008.01.020.
- [17] NIE L Y, ZHANG W W, LI S G, et al. Effects of matrix and water-nitrogen management on water use efficiency and biomass of *Clerodendron inerme* (L.) Gaertn. [J]. *Guihaia*, 2020, 40(3): 367–374. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201907019.
聂丽云, 张弯弯, 李仕裕, 等. 基质和水氮处理对假茉莉水分利用率及生物量的影响 [J]. *广西植物*, 2020, 40(3): 367–374. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201907019.
- [18] ZHANG W W. Study on matrix and water-nitrogen management techniques of *Clerodendron inerme* in tropical reefs island [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2018: 1–20.
张弯弯. 热带岛礁植物假茉莉的基质及水氮管理技术研究 [D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2018: 1–20.
- [19] LUO Y Y, ZHAO X Y, HUANG Y X, et al. Research progress on plant water use efficiency and its measuring methods [J]. *J Desert Res*, 2009, 29(4): 648–655.
罗亚勇, 赵学勇, 黄迎新, 等. 植物水分利用效率及其测定方法研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2009, 29(4): 648–655.
- [20] LICHTENTHALER H K, WELLBURN A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents [J]. *Biochem Soc Trans*, 1983, 11(5): 591–592. doi: 10.1042/bst0110591.
- [21] ZHANG Z A, ZHANG M S, WEI R H. Experimental Guidance of Plant Physiology [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.
张治安, 张美善, 蔚荣海. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [22] CHEN J X, WANG X F. Experimental Guidance of Plant Physiology [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2015.
陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015.
- [23] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [CP/OL]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017. <https://www.R-project.org>.
- [24] BORCARD D, F. GILLET, PIERRE L. Numerical Ecology with R [M]. 2nd Ed. Cham.: Springer, 2018. (2018-03-20) doi: 10.1007/978-3-319-71404-2_6.
- [25] TAIYUN W, VILIAM S. R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84) [CP/OL]. 2017. <https://github.com/taiyun/corrplot>.
- [26] XU B B, LIU N, REN H, et al. Stress resistance biological characteristics of *Scaevola sericea* in Paracel Islands [J]. *Guihaia*, 2018, 38(10): 1277–1285. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201711012.
徐贝贝, 刘楠, 任海, 等. 西沙群岛草海桐的抗逆生物学特性 [J]. *广西植物*, 2018, 38(10): 1277–1285. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201711012.
- [27] TONG S H, LIU N, WANG J, et al. Physiological and ecological adaptability of *Catharanthus roseus* to tropical coral islands [J]. *Guihaia*, 2020, 40(3): 384–394. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201902010.
童升洪, 刘楠, 王俊, 等. 长春花(*Catharanthus roseus*)对热带珊瑚岛生理生态适应性研究 [J]. *广西植物*, 2020, 40(3): 384–394. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201902010.
- [28] WU S, ZHANG X Q, CAI Y. Effects of drought stress on chlorophyll contents and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(1):133–137.
吴顺, 张雪芹, 蔡燕. 干旱胁迫对黄瓜幼苗叶绿素含量和光合特性的影响 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(1):133–137.
- [29] ZHANG S K, HUANG Y, JIAN S G, et al. Stress resistance characteristics of *Calophyllum inophyllum*, A tropical beach plant [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(04): 391–398. doi: 10.11926/jtsb.4043.
张世柯, 黄耀, 简曙光, 等. 热带滨海植物红厚壳的抗逆生物学特性 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(04): 391–398. doi: 10.11926/jtsb.4043.
- [30] DOBRA J, MOTYKA V, DOBREV P, et al. Comparison of hormonal responses to heat, drought and combined stress in tobacco plants with elevated proline content [J]. *J Plant Physiol*, 2010, 167(16): 1360–1370. doi:10.1016/j.jplph.2010.05.013.