

## 不同温度下秋茄树幼苗叶绿素荧光参数对光强的响应

李 红<sup>1</sup>, 郑春芳<sup>2</sup>, 陈继浓<sup>2</sup>, 于 冯<sup>1</sup>, 康华靖<sup>1</sup>

(1. 温州市农业科学研究院, 浙江 温州 325006; 2. 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室,  
浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江 温州 325005)

**摘要:** 为了更好地开展秋茄树 *Kandelia obovata* 的引种、繁育等工作, 以其 2 年生移植容器苗为材料, 设置了昼夜温度分别为 A (25/20℃), B (20/15℃), C (15/10℃) 和 D (10/5℃) 共 4 个处理, 研究了电子传递速率 ( $ETR$ )、光系统 II (PSII) 反应中心的激发能捕获效率 ( $F_v'/F_m'$ )、PSII 反应中心电荷分离实际量子效率 ( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭系数 ( $qP$ ) 和非光化学猝灭系数 ( $qN$ ) 等参数对光强 ( $PAR$ ) 的响应曲线。结果表明, 光响应机理模型和双指数模型可以较好地拟合不同温度处理下秋茄树幼苗  $ETR$  对  $PAR$  的响应, 所得结果与实测值较为接近 ( $P>0.05$ ); 在不同温度下, 秋茄树幼苗叶片的饱和  $PAR$  有所差异, 在  $1\ 000 \sim 1\ 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之间; 以光响应机理模型拟合的结果为例, 在 A, B, C, D 不同处理下, 秋茄树叶片的最大电子传递速率 ( $ETR_{\text{max}}$ ) 间均有显著差异 ( $P<0.05$ ), 分别为 124.393, 110.812, 64.153 和 33.427  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; D 处理下的  $F_v'/F_m'$ ,  $\Phi_{PSII}$ ,  $qP$  和  $qN$  均处于最低水平, 说明 5℃ 以下低温对秋茄树幼苗的光合影响较大。因此, 建议在幼苗阶段, 夏季进行适当遮阳, 冬季喷施植物生长调节剂或采用其他措施进行保温。

**关键词:** 秋茄树; 昼夜温度; 荧光参数; 光强

中图分类号: S796 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776 (2020) 02-0017-06

## Response of Chlorophyll Fluorescence Parameters of *Kandelia obovata* Seedlings to Light Intensity in Incubator with Different Temperature

LI Hong<sup>1</sup>, ZHENG Chun-fang<sup>2</sup>, CHEN Ji-nong<sup>2</sup>, YU Feng<sup>1</sup>, KANG Hua-jing<sup>1</sup>

(1. Wenzhou Academy of Agricultural Sciences of Zhejiang, Wenzhou 325006, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resource, Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China)

**Abstract:** In spring of 2017, container *Kandelia obovata* seedlings were transplanted into plastic drum and in January 2019, experiments were conducted after 7 days slow rooting. Seedlings were treated in incubators with different day-night temperature such as 25/20℃ (A), 20/15℃ (B), 15/10℃ (C) and 10/5℃ (D). The results showed that the response of electron transfer rate ( $ETR$ ) to the light intensity of different treated seedlings could be fitted well by the light response mechanism model and the double exponential model. The fitted values were close to the measured ones. The light saturation points of the leaves of different treated seedlings ranged from  $1\ 000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  to  $1\ 400\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Taking the result of model fitting by light response mechanism as an example, the maximum electron transfer rates of seedling leaves were significantly different at different temperatures ( $P<0.05$ ), which were 124.393, 110.812, 64.153, and 33.427  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , respectively. Seedlings with treatment of D had the lowest excitation energy capture efficiency of  $P_{SI}$  ( $F_v'/F_m'$ ), the actual photochemical quantum efficiency of PSII ( $\Phi_{PSII}$ ), photochemical quenching

收稿日期: 2019-09-23 ; 修回日期: 2020-01-30

基金项目: 浙江省自然科学基金资助 (项目编号为 LY18C030001); 温州市重点科技创新团队项目资助 (项目编号为 C20150008-2)

作者简介: 李红, 硕士, 副教授, 从事环境生态学研究; E-mail: lihong1114@126.com。通信作者: 康华靖, 博士, 副教授, 从事植物生理生态学研究; E-mail: kanghuajing@126.com。

coefficient ( $qP$ ) and non-photochemical quenching coefficient ( $qN$ ). It indicated that the low temperature had significant effect on the photosynthesis of *K. ogovata* seedlings.

**Key words:** *Kandelia ogovata*; day-night temperature; chlorophyll fluorescence parameters; light intensity

红树林是国际《湿地公约》《生物多样性公约》《联合国海洋法公约》《中国湿地行动计划》和《中华人民共和国海洋环境保护法》等的重要保护对象之一<sup>[1]</sup>。它的高生产力、高归还率和高分解率功能给近海海洋生态系统提供了强大的物质基础,在防止海岸侵蚀、减缓海平面上升、减轻污染、海洋药物研发、科研教育、生态旅游等方面发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。红树植物广泛分布于热带亚热带海岸潮间带地区,温度是影响其分布的最主要因素。温度是影响植物生长发育及其地理分布的一个重要生态因素,植物只有在适宜的温度环境下才能正常生长发育并顺利完成其生活史<sup>[3]</sup>。研究树种生境中温度等逆境胁迫对光合作用的影响及其与植物的生态分布和演替状态之间的联系,一直倍受关注<sup>[4-6]</sup>。

光合作用是绿色植物生长发育的基础。目前低温对红树植物光合作用的影响一直深受关注。杨盛昌等<sup>[7]</sup>发现,低温抑制红树植物叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用率,促进胞间  $\text{CO}_2$  浓度增加。Kao 等<sup>[8]</sup>认为,低温胁迫使红树植物叶片光系统 II (PSII) 反应中心电荷分离实际量子效率 ( $\Phi_{\text{PSII}}$ ) 以及电子传递速率 ( $ETR$ ) 降低,抑制了 PSII 活性和  $ETR$ ,致使光合功能受损。秋茄树 *Kandelia obovata* 是一种典型红树植物,由于其适应性广,是我国亚热带海岸滩涂绿化应用最广的红树之一<sup>[9]</sup>。秋茄树属于耐寒红树植物之一,也是浙江省温州市红树林引种成林最北缘的唯一品种<sup>[10]</sup>。另外,杨娟等<sup>[11]</sup>研究了温度对相同引种地三个秋茄树居群遗传多样性的影响,结果表明低温导致了秋茄树遗传多样性的减少。为了缓解低温对红树的伤害,余敏等<sup>[12]</sup>探讨了外源 NO 缓解秋茄树低温胁迫的生理机制;郑春芳等<sup>[10]</sup>研究了烯效唑对低温胁迫下秋茄树幼苗光合作用与抗氧化系统的影响,认为烯效唑处理能减少低温胁迫对秋茄树叶片细胞的伤害。

鉴于秋茄树重要的生态功能和价值,人们一直致力于其向高纬度地区引种。秋茄树虽是众多红树植物中耐寒性最强的种类,但高纬度地区冬季极端低温天气会使得秋茄树遭受到冻害,甚至引起植株的死亡。因此,本文拟通过室内不同温度下的受控实验,研究秋茄树幼苗叶绿素荧光参数对光强 ( $PAR$ ) 变化的响应,以期为高纬度地区秋茄树幼苗的繁育和造林提供理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 材料培养与试验设计

供试秋茄树为 2 年生移植容器苗,由浙江海洋水产养殖研究所提供。幼苗于 2017 年春季移植,统一种植在口径为 25 cm,底直径为 20 cm,高 25 cm 的塑料小水桶中。桶内装有 3 kg 自然风干的滩涂淤泥 ( $\text{NaCl}$  含量为  $1.29 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),每桶 4 株幼苗。于 2018 年 1 月置于温州市农业科学研究院实验室的培养箱(昼/夜温度为  $25/20^\circ\text{C}$ ,湿度为 75%)中适应 7 d,然后进行各试验处理,具体昼/夜温度分别设置为 A ( $25/20^\circ\text{C}$ ),B ( $20/15^\circ\text{C}$ ),C ( $15/10^\circ\text{C}$ ),D ( $10/5^\circ\text{C}$ ) 和 E ( $5/0^\circ\text{C}$ ),昼、夜处理时间各为 12 h,培养箱中  $PAR$  为  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,湿度均设置为 75%,由外置加湿器保证湿度的稳定,共处理 28 d。每种处理 3 盆,每盆 4 株,常规管理,3 次重复,完全随机排列。

### 1.2 测定内容与方法

测量前分别选取长势一致的植株各 7 株,每株上各选取一张叶片待测(由于 E 处理生长状况极差,叶片脱落严重,故不予测量)。此时秋茄树幼苗高度集中在 35 ~ 40 cm,地径约 1.5 cm。植株生长正常。所选叶片的叶色较绿,均为完全发育成熟且健壮的叶片。

利用便携式光合仪 (LI-6400-40, LI-COR INC., USA) 于 9:00 – 16:00 进行数据测量。仪器参数设置参考文献[13],光梯度设置为 1 800, 1 600, 1 400, 1 200, 1 000, 800, 600, 400, 200, 150, 100 和  $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,并应用自动测量程序自动记录气体交换参数和叶绿素荧光参数,仪器可直接测量得到叶片的  $ETR$ , PSII 反应中心的激发能捕获效率 ( $F_v'/F_m'$ ),  $\Phi_{\text{PSII}}$ , 光化学猝灭系数 ( $qP$ ) 和非光化学猝灭系数 ( $qN$ ) 等参数对  $PAR$  的响应曲线。

每次记录最小等待时间为 60 s, 最大等待时间为 90 s。

1.3 数据处理

根据光合计算软件 4.1 (井冈山大学生命科学学院 数理学院), 分别应用光响应机理模型 (Model I)、直角双曲线模型 (Model II)、非直角双曲线模型 (Model III) 和双指数方程模型 (Model IV) 进行拟合及计算<sup>[14]</sup>。SPSS19.0 版本 (SPSS, Chicago, IL) 软件进行计算、处理和方差差异显著性分析, 采用 Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 秋茄树 ETR 对 PAR 的响应

由图 1 可以看出, 各处理秋茄树幼苗叶片的 ETR 在 PAR<600  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时均先随 PAR 的升高而快速增大, 随后, ETR 上升较为平缓, 并在 1 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时达到最大, 之后, 随着 PAR 的增加而略有下降。从图 1 还可以看出, A 和 B 处理下秋茄树幼苗叶片的 ETR 较为接近, 整体上远高于 C 和 D 处理 ( $P<0.05$ )。另外, C 处理的 ETR 整体上也明显高于 D 处理 ( $P<0.05$ )。

以 A 处理数据为例, 分别应用 Model I, Model II, Model III 和 Model IV 进行拟合, 其结果见图 2。从图 2 可看出, 除 Model II 不能很好地拟合高 PAR 下 ETR 下降的趋势外, 其余模型均能较好地拟合测量值的变化趋势。从确定系数 ( $R^2$ ) 来看, 4 种模型的  $R^2$  均高于 0.9 (表 1)。

表1 ETR对光响应曲线的拟合结果 (平均数±标准误差)

Table 1 Fitting of response curve of ETR to light

模型	处理	初始斜率	$ETR_{\max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	饱和 PAR/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$R^2$
实测值	A	—	128.480±14.158	≈1 400	—
	B	—	115.089 0±14.896	≈1 200	—
	C	—	72.061±11.719	≈1 400	—
	D	—	33.427±8.010	≈1 000	—
Model I	A	0.468±0.065 b	124.393±17.004 b	1 337.130±137.261a	0.933±0.023
	B	0.467±0.073 b	110.812±15.513 b	1 255.383±188.880 a	0.945±0.036
	C	0.354±0.059 a	64.153±14.689 b	1 118.327±73.603 a	0.906±0.093
	D	0.166±0.042 a	31.567±3.629 b	1 076.744±57.450 a	0.905±0.034
Model II	A	0.578±0.090 a	147.936±20.944 a	503.924±38.743 b	0.903±0.018
	B	0.571±0.080 a	129.572±23.805 a	441.029±60.558 b	0.916±0.035
	C	0.398±0.093 a	81.177±18.339 a	450.795±47.811 b	0.920±0.031
	D	0.191±0.049 a	37.438±5.893 a	449.614±63.624 b	0.902±0.024
Model III	A	0.393±0.037 c	130.299±17.453 ab	411.050±52.166 c	0.929±0.008
	B	0.363±0.056 c	116.111±17.009 ab	387.857±81.522 c	0.947±0.033
	C	0.254±0.045 c	72.070±14.696 ab	361.749±50.280 c	0.945±0.035
	D	0.141±0.029 ab	35.351±6.519 a	397.066±76.821 b	0.915±0.017
Model IV	A	0.445±0.084 b	125.119±21.462 b	1 236.420±104.464 a	0.925±0.006
	B	0.448±0.073 b	116.360±14.841 ab	1 163.419±165.915 a	0.938±0.040
	C	0.298±0.061 b	78.143±2.331 ab	1 178.053±59.228 a	0.944±0.040
	D	0.131±0.033 b	32.307±4.430 ab	1 042.090±176.987 a	0.926±0.020

注: 数字后的不同小写字母表示同一处理不同模型拟合值之间存在显著差异 ( $P<0.05$ )。

从拟合得到的最大电子传递速率 ( $ETR_{\max}$ ) 来看, Model I, Model III 和 Model IV 拟合得到的结果较为接近, 且与实测  $ETR_{\max}$  较为吻合; 虽然 Model III 拟合得到的值相对较高, 但除 A 处理外, 其余处理下的拟合值也与实测  $ETR_{\max}$  间无显著差异 ( $P>0.05$ )。然而, 从拟合得到的饱和 PAR 来看, 4 种模型拟合的效果存在较大差异。整体来看, Model I 和 Model IV 拟合得到的饱和 PAR 较高, 前者拟合得到的饱和 PAR 分别为 1 337.130 (A),

1 255.383 (B), 1 118.327 (C) 和 1 076.744 (D)  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 后者拟合得到的饱和  $PAR$  则分别为 1 236.420 (A), 1 163.419 (B), 1 178.053 (C) 和 1 042.090 (D)  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 且与实测  $ETR_{\max}$  所对应的  $PAR$  较为接近, 远高于 Model II 和 Model III 拟合的结果 ( $P<0.05$ )。由此判断, Model I 和 Model IV 的拟合效果较好。另外, 由初始斜率的拟合值来看, 在同一模型下, A 和 B 处理值较为接近, 且远高于 C 和 D 处理 ( $P<0.05$ )。

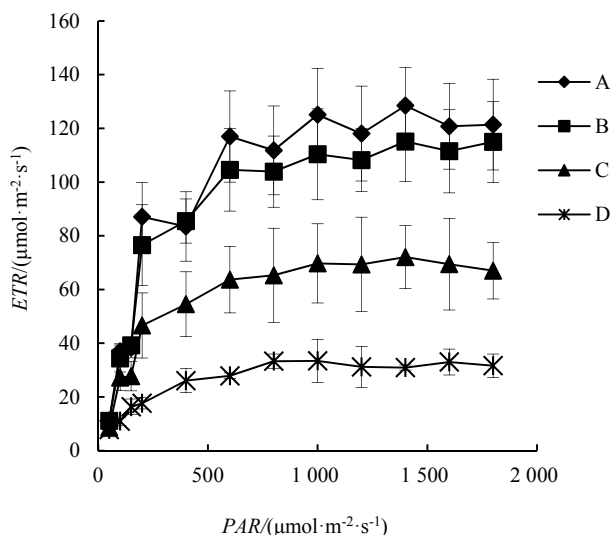


图1 不同温度处理下秋茄树幼苗叶片  $ETR$  对  $PAR$  的响应

Figure 1 Response of  $ETR$  of different treated *K. obovata* on  $PAR$

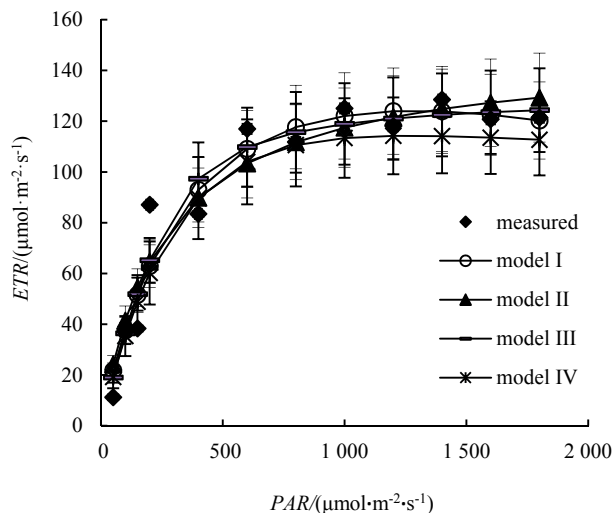


图2 Model I, Model II, Model III 和 Model IV 对  $ETR$ -光响应曲线的拟合

Figure 2 Fitting of 5 models and measure values of different treated *K. obovata*

## 2.2 秋茄树幼苗 $F_v/F_m'$ 和 $\Phi_{PSII}$ 对 $PAR$ 的响应

由图 3 a 可以看出, 同一温度处理下, 秋茄树幼苗的  $F_v/F_m'$  随着  $PAR$  的升高而整体波动较小。比较不同温度下的  $F_v/F_m'$  可以看出, 在 A 和 B 处理下的  $F_v/F_m'$  值极为接近, 显著高于 C 和 D 处理 ( $P<0.05$ )。由图 3b 可以看出, 随着  $PAR$  的升高, 秋茄树幼苗的  $\Phi_{PSII}$  逐渐降低。同样, 比较不同温度下的  $\Phi_{PSII}$  可以看出, 在 A 和 B 处理下的  $\Phi_{PSII}$  极为接近, 显著高于 C 和 D 处理 ( $P<0.05$ )。

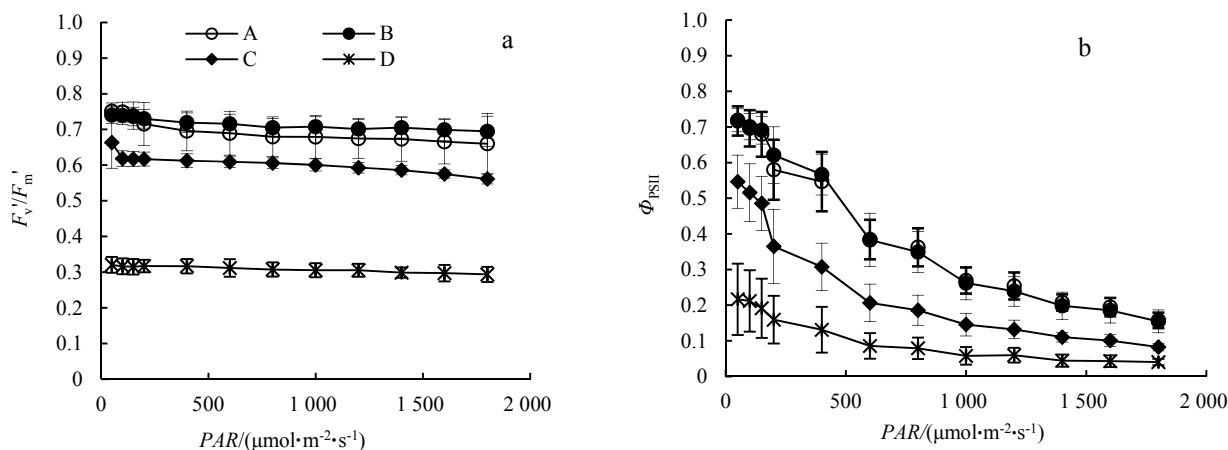


图3 不同温度下秋茄树幼苗实际  $F_v/F_m'$  (a) 和实际  $\Phi_{PSII}$  (b) 对  $PAR$  的响应

Figure 3  $F_v/F_m'$  and  $\Phi_{PSII}$  of different treated *K. obovata*

## 2.3 秋茄树幼苗 $qP$ 和 $qN$ 对 $PAR$ 的响应

由图 4a 可以看出, 同一温度处理下, 秋茄树幼苗光的  $qP$  随着  $PAR$  的升高而逐渐降低。比较不同温度下的

$F_v/F_m'$ 可以看出, 随着处理温度的降低, 秋茄树幼苗的  $qP$  也逐渐下降。由图 4b 可以看出, 随着  $PAR$  的升高, 秋茄树幼苗的  $qN$  整体波动较小; 而比较不同温度下的  $qN$  可以看出, 在 A 和 B 处理下的  $qN$  值极为接近, 且显著高于 C 和 D 处理 ( $P<0.05$ )。同样, 在 C 和 D 处理之间的  $qN$  也存在显著差异 ( $P<0.05$ )。

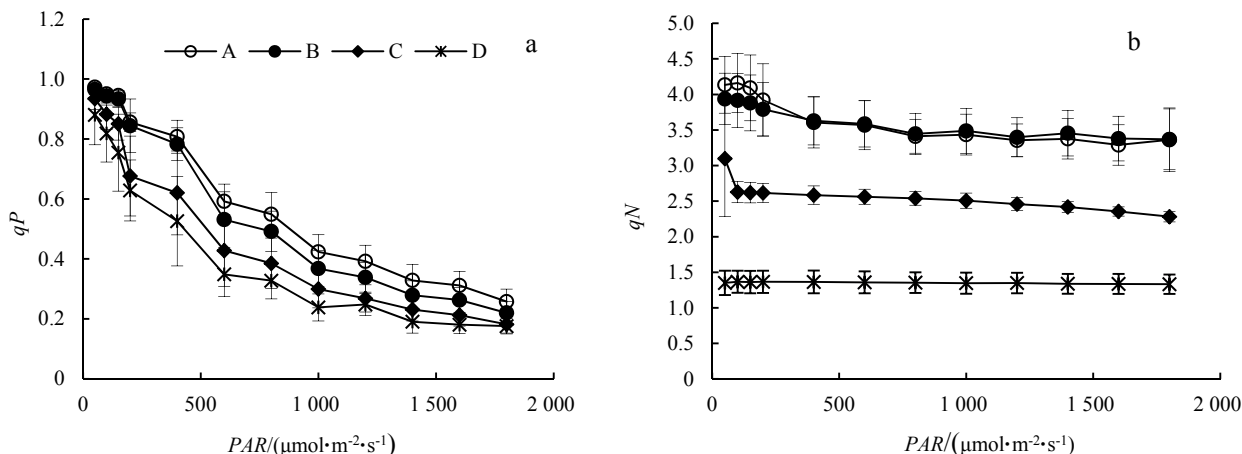


图 4 不同温度下秋茄树幼苗  $qP$  (a) 和  $qN$  (b) 对  $PAR$  的响应

Figure 4 Light-response curves of  $qP$  and  $qN$  of different treated *K. obovata*

### 3 结论和讨论

叶绿素荧光动力学技术作为研究植物光合功能快速、无损伤的探针, 在测定叶片光合同化过程中, 光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有显著的优势。因此, 本文基于荧光数据比较了不同温度处理秋茄树幼苗对不同  $PAR$  的响应。

本试验运用了 4 种模型对不同温度下秋茄树叶片的饱和  $PAR$  进行了探讨。结果显示, Model I 拟合给出的饱和  $PAR$  分别为 1 337.130 (A), 1 255.383 (B), 1 118.327 (C) 和 1 076.744 (D)  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; Model IV 拟合给出的结果分别为 1 236.420 (A), 1 163.419 (B), 1 178.053 (C) 和 1 042.090 (D)  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 且以上 2 种模型拟合结果与实测  $ETR_{\max}$  对应的  $PAR$  较为接近 ( $P>0.05$ )。由此可见, 秋茄树幼苗叶片的饱和  $PAR$  范围为 1 000 ~ 1 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 说明秋茄树幼苗表现出较强的阳生植物特性。

从  $ETR_{\max}$  的拟合结果来看, 4 种模型的拟合结果整体上与实测  $ETR_{\max}$  较为吻合。而 A, B, C, D 不同处理下的  $ETR_{\max}$  之间差异显著 ( $P<0.05$ ), 以光响应机理模型的拟合值为例, 在 A, B, C, D 处理下, 秋茄树叶片的  $ETR_{\max}$  分别为 124.393, 110.812, 64.153 和 31.567  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 不同温度间  $ETR_{\max}$  的值均达到显著差异 ( $P<0.05$ )。可见, 温度低于 20℃ 对秋茄树幼苗的光合影响较大。这与秋茄树幼苗植株生长的外部形态观察结果较为一致。

$F_v/F_m'$  代表光合反应中心 PSII 的光合效率, 反映了光合反应中心在部分关闭的情况下的实际捕获能量的传递效率<sup>[15]</sup>。同样,  $\Phi_{\text{PSII}}$  也可作为研究植物光抑制的一种快速的、非损伤性的指标<sup>[16]</sup>。本试验结果表明, 在 C 和 D 处理下, 秋茄树幼苗的  $F_v/F_m'$  和  $\Phi_{\text{PSII}}$  显著降低 ( $P<0.05$ )。  $qP$  反映 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额, 并进一步反映 PSII 反应中心的开放程度和电子传递活性的大小<sup>[17-18]</sup>。从测量数据来看, 在 A 和 B 处理下, 秋茄树幼苗叶片的  $qP$  较为接近, 均显著高于 C 和 D 处理 ( $P<0.05$ ), 这说明温度高于 20℃ 处理的秋茄树幼苗叶片 PSII 反应中心的开放程度和电子传递活性的大小基本稳定。植物吸收的光能一部分用于光合作用外, 还有一部分可通过  $qN$  过程来调整过量能量的耗散, 保护 PSII 反应中心免受因吸收过多光能而引起的光氧化和光抑制伤害<sup>[19]</sup>。比较不同温度下的  $qN$  可以看出, 在 A 和 B 处理下的  $qN$  较高, 显著高于 C 和 D 处理 ( $P<0.05$ ), 说明较低温度下秋茄树幼苗叶片通过  $qN$  过程来调整过量能量耗散的能力较差。这与较低温度对红树的相关研究相一致<sup>[7-8]</sup>。郑春芳等<sup>[10]</sup>研究表明, 烯效唑处理能改善低温胁迫下秋茄树植株抗氧化系统运行, 减

少低温胁迫对秋茄树叶片的伤害。因此,在温州地区进行秋茄树的推广应用,在其幼苗阶段建议喷施植物生长调节剂以提高其抗寒性。

综合本试验结果表明,不同温度下的秋茄树幼苗均表现出阳生植物特性,幼苗叶片饱和  $PAR$  范围为  $1\ 000 \sim 1\ 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 温度低于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  对秋茄树幼苗的光合影响较大; 最低温度低于  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  将影响幼苗的生存。因此,建议在幼苗阶段,夏季进行适当遮阳,冬季喷施植物生长调节剂或采用其他措施进行保温。

#### 参考文献:

- [1] 杜文琴, 马丽娜, 刘建, 等. 红树林区内互花米草防除技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14 (3): 154–156.
- [2] 林鹏. 中国红树林生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 297–316.
- [3] 何洁, 刘鸿先, 王以柔, 等. 低温与植物的光合作用[J]. 植物生理学通讯, 1986 (2): 1–6.
- [4] SAGE R F, KUBIEN D S. The temperature response of C3 and C4 photosynthesis[J]. Plant Cell Environ, 2007, 30: 1086–1106.
- [5] 姜籽竹, 朱恒光, 等. 低温胁迫下植物光合作用的研究进展[J]. 作物杂志, 2015 (3): 23–28.
- [6] 孙谷畴, 曾小平, 刘晓静, 等. 适度高温胁迫对亚热带森林 3 种建群树种幼树光合作用的影响[J]. 生态学报, 2007, 27 (4): 1283–1291.
- [7] 杨盛昌, 林鹏, 中须贺常雄.  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  夜间低温对红树幼苗光合速率和蒸腾速率的影响[J]. 植物研究, 2001, 21 (4): 587–591.
- [8] KAO W Y, SHIH C N, TSAI T T. Sensitivity to chilling temperatures and distribution differ in the mangrove species *Kandelia candel* and *Avicennia marina*[J]. Tree Physiol, 2004, 24: 859–864.
- [9] 卞阿娜, 王文卿. 厦门海湾大道耐盐园林植物的选择与配置[J]. 漳州师范学院学报, 2009, 22 (3): 125–129.
- [10] 郑春芳, 陈继浓, 仇建标, 等. 烯效唑对低温胁迫下秋茄幼苗光合作用与抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52 (1): 109–116.
- [11] 杨娟, 马小伟, 章宏琼, 等. 温度对相同引种地三个秋茄居群遗传多样性的影响[J]. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2013, 12 (6): 544–549.
- [12] 余敏, 杜照奎, 王丽佳, 等. 外源  $\text{NO}$  缓解秋茄低温胁迫伤害的生理机制研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56 (3): 490–493.
- [13] 康华靖, 余宏傲, 叶朝军, 等. 温州地区主栽蓝莓品种叶片饱和光强的研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26 (4): 399–406.
- [14] 叶子飘. 光合作用对光和  $\text{CO}_2$  响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34 (6): 727–740.
- [15] BILGER W, SJORKMAN O. Role of the xanthophylls cycle in photoprotection elucidated by measurements of light induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canafiensis*[J]. Photosynth Res, 1990 (25): 173–185.
- [16] FRACHEBOUD Y, HALDIMANN L P J, STAMP P. Chlorophyll fluorescence as a selection tool for cold tolerance of photosynthesis in maize (*Zea mays* L.)[J]. J Exp Bot, 1999, 50 (338): 1533–1540.
- [17] ZHANG S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics Parameters and their significance[J]. Chin Bull Bot, 1999, 16 (4): 444–448.
- [18] YORDANOVA R Y, ALEXIEVA V S, POPOVA L P. Influence of root oxygen deficiency on photosynthesis and antioxidant status in barley plants[J]. Russ J Plant Physio, 2003, 50 (2): 163–167.
- [19] WANG Y X, SUN G R, WANG J B, et al. Relationships among MDA content, plasma membrane permeability and the chlorophyll fluorescence parameters of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under NaCl stress[J]. Acta Ecol Sini, 2006, 26 (1): 122–129.