

涝渍胁迫下厚皮香幼苗光响应特征

刘臣琼¹,王小德^{1*},张娟¹,刘钰欣²

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院,浙江 临安 311300;2. 湖南农业大学 生物科学技术学院,湖南 长沙 410000)

摘要:以 1 年生厚皮香幼苗为材料,分别进行涝害与渍害处理,使用 Li-6400 光合仪,测定不同光照强度下的净光合速率 P_n ,并采用直角双曲线、非直角双曲线和直角双曲线修正 3 种数学模型对叶片光响应曲线进行拟合,探讨其在不同水淹程度下的光能利用能力。结果表明:随着光合有效辐射的增加,对照组在 $PAR \approx 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、渍害组在 $PAR \approx 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 增减趋势变得平缓。渍害组、涝害组与对照组相比初始量子效率和最大净光合速率 $P_{n\text{max}}$ 都下降,暗呼吸速率 R_d 则上升;涝渍胁迫对厚皮香幼苗有光合抑制作用,直角双曲线修正模型对厚皮香幼苗叶片光响应过程拟合精确度高于直角双曲线和非直角双曲线 2 种模型;对照组厚皮香幼苗叶片由数学模型拟合的光合参数值与渍害和涝害 2 组相比,更为准确。

关键词:厚皮香;涝渍胁迫;光响应模型;光合参数

中图分类号:S718.3 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2016)04-0048-05

Light Response Characteristics of Photosynthesis of *Ternstroemia gymnanthera* with Waterlogging Stress

LIU Chen-qiong¹, WANG Xiao-de^{1*}, ZHANG Juan¹, LIU Yu-xin²

(1. School of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;
2. School of Biological Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: Taking 1-year-old seedlings of *Ternstroemia gymnanthera* as materials that were subject to waterlogging with two levels (the water level was the same as the soil surface, ZH group, and higher than the soil surface, LH group), the net photosynthetic rates (P_n) of the *T. gymnanthera* seedlings under different light intensities were measured by portable photosynthesis system Li-6400. The light response curves were fitted by three models, such as the rectangular hyperbola, non-rectangular hyperbola and modified rectangular hyperbolar to examine the light energy utilization ability of *T. gymnanthera* under different water stresses. The results indicated that with the increase of photosynthetic active radiation (PAR), once the PAR for the control group reached to about $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and the ZH group reached to about $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, the variation trends of P_n became gentle. Compared with the control group, the initial quantum efficiency α of both ZH group and LH group decreased, the maximum net photosynthetic rate $P_{n\text{max}}$ decreased and the dark respiration rate R_d increased. The fitting effect of the rectangular hyperbola model for light response process was better than that of the other two models. The fitted light response curve of the control group was more accurate than those of ZH and LH groups.

Key words: *Ternstroemia gymnanthera*; waterlogging stress; light response model; photosynthetic parameters

光合作用是植物生长和发育的基础,是研究绿色植物环境胁迫适应性的重要指标^[1]。植物光响应

收稿日期:2015-09-14 修回日期:2015-11-12
作者简介:刘臣琼,女,硕士研究生,研究方向:植物景观设计与评价。E-mail:457478952@qq.com
*通信作者:王小德,男,教授,博士,硕士生导师,研究方向:园林植物引种与应用、植物造景和生态园林等。E-mail:wxd65@zafu. Edu. cn

曲线能够反映出植物光合速率随光照强度变化而变化的情况,是研究植物光合能力强弱的重要方法^[2]。通过光响应曲线的拟合可以获得植物的最大净光合速率 P_{nmax} 、暗呼吸速率 R_d 、光补偿点 LCP 和光饱和点 LSP 等光合特性参数,是判定植物光合作用能力和植物受环境胁迫影响程度的依据^[3]。目前,直角双曲线、非直角双曲线和直角双曲线修正 3 种模型在拟合植物光响应曲线中应用广泛^[4],但不同植物在不同时期与不同环境条件下所适应的光响应曲线模型存在一定的差异性^[5]。所以选择适宜的光响应曲线模型对植物的光合特性参数进行估算,对于植物光合作用能力判断是十分重要的。

厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*),常绿灌木或小乔木,枝叶生长茂盛,树形十分优美,是优良绿化树种,适宜栽植在门厅两侧、道路角隅、草坪边缘。对二氧化碳和氯化氢等气体抗性强,而且能够吸收大量有毒气体,适合用于工厂、街旁的绿化和环境林的营造^[6-7]。目前,虽然厚皮香在中国的一些省市生长良好,但其不耐水涝,在浙江等南方夏季高温多雨地区易受到涝渍胁迫影响,导致根系发育不良、叶片发黄脱落、开花数量降低、花朵观赏品质下降、结果量减少、植株生长缓慢、甚至死亡等现象,对厚皮香幼苗的生长和发育造成很大的危害。

以 1 年生厚皮香幼苗为材料,测定涝渍胁迫下叶片的光响应过程,采用不同的光响应曲线模型进行拟合,探讨其在水淹程度和不同光照强度下的光合适应规律,分析在渍害和涝害处理下厚皮香幼苗叶片的光能利用能力。为厚皮香的栽培和推广提供一定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

挑选大小与长势基本一致的 1 年生厚皮香实生穴盘苗 90 株,于 2015 年 4 月 15 日,种植在口径为 20 cm、高为 25 cm 的塑料盆中,土壤基质为泥炭土:蛭石:河沙=2:1:1,放于浙江农林大学教学实训基地内进行相同的水肥管理。于 2015 年 7 月 12 日开始进行正常、渍害和涝害处理。

1.2 试验设计

将厚皮香幼苗分为 3 个组分别进行正常、涝害和渍害处理,每组幼苗 30 株。对照(CK):以 0 d 土壤含水量 75%左右测量值为对照;渍害处理(ZH):土壤含水量为 100%左右处于完全饱和状态,水面与土面保持水平;涝害处理(LH):土壤含水量过饱和,水面高于土面 5 cm 左右^[8]。在胁迫处理 25 d 后,每组选取具有代表性的 5 株,每株 3 次重复对幼

苗叶片进行测量。

1.3 厚皮香幼苗光响应过程测定

晴朗的天气,选取每株植株上部第 2 轮的完整良好叶片为测定对象,使用 Li-Cor-6400 便携式光合仪(Li-6400, Li-Cor Inc, USA)于 9:00—11:00 使用开放气路测定厚皮香幼苗光响应过程,CO₂ 浓度设置 380 μmol·mol⁻¹左右,流速为 500 mol·s⁻¹,叶室温度为 25℃,光合有效辐射强度(PAR)依次为 2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、100、50、20、0 μmol·m⁻²·s⁻¹,测定时每个光照强度下平衡 180~240 s,测得叶片净光合速率等光合参数,并用不同光响应曲线模型拟合植物光响应过程。

1.4 数据处理

利用 Excel2007 和 Origin(8.0)程序对试验数据进行处理与分析,并使用以下表达式进行光响应模型拟合。

1.4.1 直角双曲线模型拟合曲线的表达式^[9]

$$\text{净光合速率 } P_n(I) = \frac{\alpha I P_{\text{nmax}}}{\alpha I + P_{\text{nmax}}} - R_d \quad (1)$$

$$\text{光补偿点 } LCP = \frac{R_d \times P_{\text{nmax}}}{\alpha(P_{\text{nmax}} - R_d)} \quad (2)$$

1.4.2 非直角双曲线模型拟合曲线的表达式^[10]

$$\text{净光合速率 } P_n(I) = \frac{\alpha I + P_{\text{nmax}} - \sqrt{(\alpha I + P_{\text{nmax}})^2 - 4k\alpha I P_{\text{nmax}}}}{2k} - R_d \quad (3)$$

$$\text{光补偿点 } LCP = \frac{R_d \times P_{\text{nmax}} - k \times R_d^2}{\alpha(P_{\text{nmax}} - R_d)} \quad (4)$$

1.4.3 直角双曲线修正模型拟合曲线的表达式^[11-12]

$$\text{净光合速率 } P_n(I) = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} - R_d \quad (5)$$

$$\text{光补偿点 } LCP = \frac{-(\gamma R_d - \alpha) - \sqrt{(\gamma R_d - \alpha)^2 - 4\alpha\beta R_d}}{2\alpha\beta} \quad (6)$$

$$\text{光饱和点 } LSP = \left[\frac{\sqrt{\beta + \gamma} / \beta - 1 \right] / \gamma \quad (7)$$

$$\text{最大净光合速率 } P_{\text{nmax}} = \alpha \left(\frac{\sqrt{\beta + \gamma} - \sqrt{\beta}}{\gamma} \right)^2 - R_d \quad (8)$$

式中:α 为初始量子效率;I 为光合有效辐射即 PAR;P_{nmax} 为最大净光合速率;R_d 为暗呼吸速率;k 为非直角双曲线的曲角,0<k≤1;β 为光抑制项;γ 为光饱和项。

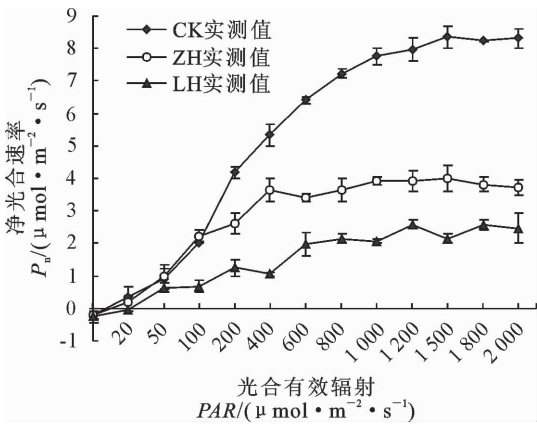
为了更好地检验 3 种模型对厚皮香幼苗光响应曲线拟合的精确性,引入实测值 y_i 与拟合值 \hat{y}_i 的相对误差 RE^[13]:

相对误差 $RE = \frac{1}{y_i} |y_i - \hat{y}_i|$ (9)

2 结果与分析

2.1 涝渍胁迫下厚皮香幼苗光合作用的光响应过程

在光合有效辐射 $PAR \leq 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,3 个组厚皮香幼苗的净光合速率都随着 PAR 的增加而迅速增加(图 1),但 LH 组的趋势明显小于 CK、ZH 组,在 $PAR > 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 CK 组与 ZH 组的净光合速率差异也逐渐拉开,CK 组在 ($PAR \approx 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、ZH 组在 ($PAR \approx 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 时,增减趋势开始变得平缓。3 组厚皮香幼苗叶片的净光合速率大小一直都保持 CK 组 $>$ ZH 组 $>$ LH 组。与 CK 组的净光合速率相比,ZH 组减少了 52.14%,LH 组减少了 69.38%。LH 组下降趋势更为明显。



注:图内实测数据为平均值±标准误。下同

图 1 涝渍胁迫下厚皮香幼苗叶片的光响应曲线

Fig. 1 Light-response curves of *T. gymnanthera* seedlings under different water logging stresses

2.2 涝渍胁迫下厚皮香幼苗叶片净光合速率 P_n 光响应曲线模型拟合

使用不同的光响应曲线模型拟合的净光合速率具有一定的差异性(图 2~图 4),为精确判断涝渍胁迫下 3 种模型净光合速率拟合值偏离实测值程度的大小,对厚皮香幼苗叶片净光合速率的拟合值与实测值的相对误差(RE)采用公式(9)进行求解,相对误差越小,则模型拟合值的精确度越高。不同光合有效辐射下,CK 组直角双曲线、非直角双曲线和直角双曲线修正 3 种模型净光合速率拟合值与实测值的平均相对误差分别为 0.144、0.086、0.071;ZH 组的平均相对误差分别为 0.315、0.200、0.257;LH 组的平均相对误差分别为 0.354、0.353、0.299。CK 组与 LH 组拟合的净光合速率精确度都表现为直角双

曲线修正模型 $>$ 非直角双曲线模型 $>$ 直角双曲线模型,而 ZH 组拟合的净光合速率精确度表现为非直角双曲线模型 $>$ 直角双曲线修正模型 $>$ 直角双曲线模型。CK 组通过 3 种模型拟合的净光合速率精确度均高于 ZH 组和 LH 组。

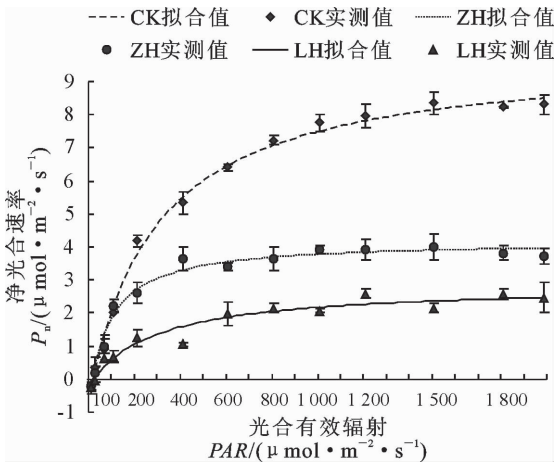


图 2 直角双曲线模型对涝渍胁迫下厚皮香幼苗叶片光响应曲线的模拟

Fig. 2 Simulation of light-response curves of *T. gymnanthera* by rectangular hyperbola model under water logging stress

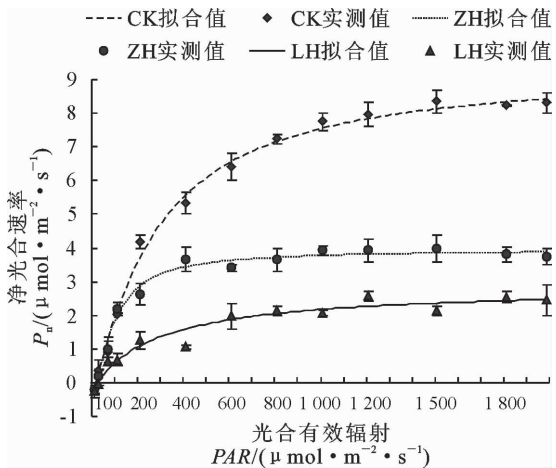


图 3 非直角双曲线模型对涝渍胁迫下厚皮香幼苗叶片光响应曲线的模拟

Fig. 3 Simulation of light-response curves of *T. gymnanthera* by non-rectangular hyperbola model under water logging stress

2.3 涝渍胁迫下厚皮香幼苗 3 种光响应曲线模型拟合参数比较

与 CK 组相比,ZH 组和 LH 组厚皮香幼苗叶片的初始量子效率 α 分别下降了 37.44% 和 66.21%,最大净光合速率 P_{nmax} 分别下降了 52.14% 和 69.38%。暗呼吸速率 R_d 分别增加了 5.82% 和 21.01%(表 1)。CK 组通过直角双曲线、非直角双曲线与直角双曲线修正 3 种模型获得的光合参数值的决定系数 R^2 分别为 0.936 1、0.978 3、0.987 1;ZH 组决定系数 R^2 分别为 0.931 9、0.976 3、

0.982 9;LH 组决定系数 R^2 分别 0.931 9、0.936 1、0.981 3(R^2 越接近 1,说明拟合值的精确度越高)。由此可得出,CK 组与 ZH、LH 2 组相比,光合参数拟合值最准确,并且 3 种模型中直角双曲线修正模型拟合值精确度最高。

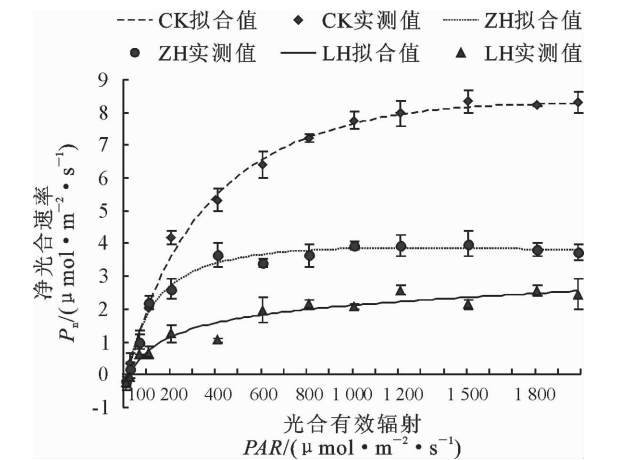


图 4 直角双曲线修正模型对涝渍胁迫下厚皮香幼苗叶片光响应曲线的模拟

Fig. 4 Simulation of light-response curves of *T. gymnanthera* by modified rectangular hyperbola model under water logging stress

为了更加精确地判断涝渍胁迫下 3 种模型光合参数拟合值偏离实测值程度的大小,对厚皮香幼苗叶片光合参数拟合值与实测值的相对误差(RE)采

用公式(9)进行求解, RE 值相对误差越小,则模型拟合值的精确度越高(表 2)。CK 组各模型拟合的暗呼吸速率 R_d 、光饱和点 LSP 、光补偿点 LCP ,ZH 组各模型拟合的光饱和点 LSP 、光补偿点 LCP ,LH 组各模型拟合的初始量子效率 α 、暗呼吸速率 R_d 、光补偿点 LCP 、光饱和点 LSP 的精确度均表现为直角双曲线修正模型最精确,非直角双曲线模型其次,直角双曲线模型最末;ZH 组各模型拟合的初始量子效率 α 和 LH 组各模型拟合的最大净光合速率 P_{nmax} 的精确度均表现为直角双曲线修正模型最精确,直角双曲线模型其次,非直角双曲线模型最末;ZH 组各模型拟合的最大净光合速率 P_{nmax} 和 CK 组各模型拟合的初始量子效率 α 的精确度均表现为直角双曲线模型最精确,非直角双曲线模型其次,直角双曲线修正模型最末;ZH 组各模型拟合的暗呼吸速率 R_d 和 CK 组各模型拟合的最大净光合速率 P_{nmax} 的精确度均表现为非直角双曲线模型最精确,直角双曲线修正模型其次,直角双曲线模型最末。3 个模型对厚皮香幼苗叶片 3 个组的光响应拟合参数精确度均表现为直角双曲线修正模型最精确,非直角双曲线模型其次,直角双曲线模型最末。CK 组通过 3 种模型拟合的各光合参数精确度均高于 ZH 组和 LH 组。

表 1 厚皮香幼苗叶片光合作用光合参数实测值与模型拟合值							
Table 1 Measured values of light-response parameters of <i>T. gymnanthera</i> and the results fitted by three models							
模型	处理	α	P_{nmax}	R_d	LCP	LSP	R^2
实测值	CK	0.021 9	8.347 8	0.188 9	8.678 4	1 500.000 0	—
	ZH	0.013 7	3.995 3	0.199 9	9.974 3	1 500.000 0	—
	LH	0.007 4	2.555 8	0.228 6	22.982 8	1 200.000 0	—
直角双曲线模型	CK	0.020 4	8.510 3	0.328 2	16.702 1	416.427 0	0.936 1
	ZH	0.015 1	3.975 0	0.317 3	22.782 8	262.658 0	0.929 0
	LH	0.006 0	2.468 5	0.106 1	18.536 2	412.882 5	0.931 9
非直角双曲线模型	CK	0.019 6	8.430 2	0.220 1	11.530 3	430.021 0	0.978 3
	ZH	0.015 4	3.887 2	0.221 2	15.194 4	251.806 4	0.976 3
	LH	0.006 0	2.468 4	0.106 1	18.547 9	412.798 5	0.936 1
直角双曲线修正模型	CK	0.019 1	8.260 8	0.200 3	9.754 5	1 439.394 0	0.987 1
	ZH	0.015 0	3.874 1	0.266 6	9.745 3	1 272.727 0	0.982 9
	LH	0.006 7	2.545 2	0.191 5	25.096 5	1 979.798 0	0.981 3

表 2 厚皮香幼苗叶片光合作用光合参数模型拟合值与实测值的相对误差							
Table 2 Relative errors of measured and fitted values of light-response parameters of <i>T. gymnanthera</i>							
模型	处理	α	P_{nmax}	R_d	LCP	LSP	平均值
直角双曲线模型	CK	0.066 8	0.019 5	0.737 3	0.924 6	0.722 4	0.494 1
	ZH	0.104 7	0.005 1	0.587 1	1.284 2	0.824 9	0.561 2
	LH	0.192 1	0.034 2	0.536 0	0.193 5	0.655 9	0.322 3
非直角双曲线模型	CK	0.104 8	0.009 9	0.165 4	0.328 6	0.713 3	0.264 4
	ZH	0.126 8	0.027 1	0.106 6	0.523 4	0.832 1	0.323 2
	LH	0.191 9	0.034 2	0.535 7	0.193 0	0.650 5	0.321 1
直角双曲线修正模型	CK	0.128 4	0.010 4	0.060 3	0.124 0	0.040 4	0.072 7
	ZH	0.096 7	0.030 3	0.333 8	0.023 0	0.151 5	0.127 0
	LH	0.089 0	0.004 1	0.162 5	0.092 0	0.649 8	0.199 5

3 结论与讨论

光照强度与植物的生长发育联系十分密切,植物在不同时期和不同环境条件下,对光照强度的需求是不同的^[14],初始量子效率 α 、最大净光合速率 P_{max} 、暗呼吸速率 R_d 、光补偿点 LCP 和光饱和点 LSP 都是衡量植物光合能力强弱的重要指标^[15]。研究表明:随着涝渍胁迫程度的增加,厚皮香幼苗叶片的初始量子效率 α 和最大净光合速率 P_{max} 都显著降低,说明植物光能转化效率和光合潜在能力降低,光合作用受到抑制。暗呼吸速率 R_d 增加,说明植物光合产物的运输受阻^[16],植物在进行自身调节。具有高光饱和点和低光补偿点的植物环境适应能力较强,研究中,3组植物光补偿点 LCP 的高低顺序为CK组>ZH组>LH组,光饱和点 LSP 的高低顺序为CK组 \approx ZH组>LH组。说明涝渍胁迫对厚皮香幼苗的环境适应能力具有一定程度的不良影响。

目前,直角双曲线、非直角双曲线和直角双曲线修正3种数学模型,在拟合植物光响应曲线中应用十分普遍。但不同模型在不同的环境条件下对植物光响应曲线的拟合精确程度是不相同的^[17]。研究表明:从整体看,厚皮香幼苗叶片通过直角双曲线修正模型拟合的光响应过程优于直角双曲线与非直角双曲线2种模型。但从获得的相关光合参数看,直角双曲线模型对正常处理下厚皮香幼苗叶片初始量子效率 α 和渍害处理最大净光合速率 P_{max} 拟合值优于直角双曲线修正与非直角双曲线2种模型,非直角双曲线模型对正常处理下厚皮香幼苗叶片最大净光合速率 P_{max} 和渍害处理下暗呼吸速率 R_d 拟合值优于直角双曲线修正与直角双曲线2种模型。所以,我们在应用不同模型对植物光合参数进行求解时,应进行比对分析以选取最合适求解模型。

参考文献:

[1] 刘国锋,何俊,杨轶中,等.藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响[J].环境科学,2015,36(8):2887-2894.
LIU G F, HE J, YANG Y Z, *et al.* Ecological effects of algae blooms cluster: the impact on chlorophyll and photosynthesis of the water hyacinth[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2887-2894. (in Chinese)

[2] 王会提,曾凡江,张波,等.不同种植方式下怪柳光合生理参数光响应特性研究[J].干旱区地理,2015,38(4):753-762.

[3] 王欢利,曹福亮,刘新亮,等.高温胁迫下不同叶色银杏嫁接苗光响应曲线的拟合[J].南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(2):14-20.

[4] 李雅善,李华,王华,等.赤霞珠葡萄光合-光响应曲线拟合模型的分析[J].西北林学院学报,2013,28(2):20-25.

LI Y S, LI H, WANG H, *et al.* Comparison and analysis of fitting models of photosynthesis and light response curve of cabernet sauvignon[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(2): 20-25. (in Chinese)

[5] 吴玲利,熊利,柯候峰,等.3个木通品种光合特性的比较[J].经济林研究,2015,33(2):46-50.

[6] 钱长江,姜金仲,李从瑞,等.石阡县的野生木本观赏植物资源[J].贵州农业科学,2014,42(8):185-190.

[7] 林建阳.厚皮香容器扦插育苗技术试验[J].防护林科技,2014(5):27-29.

[8] 吴静,王小德,叶建锋,等.涝渍胁迫对鸡爪槭幼苗光合生理特性的影响[J].西北林学院学报,2014,30(5):26-30.
WU J, WANG X D, YE J F, *et al.* Effects of waterlogging stress on the photosynthetic physiological characteristics of *Acer palmatum* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 30(5): 26-30. (in Chinese)

[9] LEWIS J D, OLAZYK D, TINGEY D T. Seasonal patterns of photosynthetic light response in Douglas-fir seedlings subjected to elevated atmospheric CO₂ and temperature[J]. Tree Physiology, 1999, 19(4/5): 243-252.

[10] THORNLEY J H M. Mathematical models in plant physiology[J]. London: Academic Press, 1976: 86-110.

[11] YE Z P. A new model for relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. Photosynthetica, 2007, 45(4): 637-640.

[12] 高成杰,刘方炎,杨文云,等.不同海拔下滇重楼叶片与花萼光合特性[J].生态学报,2015,34(1):70-78.

[13] 冷寒冰,秦俊,叶康,等.不同光照环境下荷花叶片光合光响应模型比较[J].应用生态学报,2014,25(10):2855-2860.
LENG H B, QIN J, YE K, *et al.* Comparison of light response models of photosynthesis in *Nelumbo nucifera* leaves under different light conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2855-2860. (in Chinese)

[14] 郭自春,曾凡江,刘波,等.疏叶骆驼刺和多枝怪柳不同时期光合特性日变化及其与环境因子的关系[J].西北植物学报,2015,35(1):189-198.

[15] 鲁肃,张宇清,吴斌,等.水分胁迫下油蒿光合光响应过程及其模拟[J].北京林业大学学报,2014,36(1):55-61.
LU S, ZHANG Y Q, WU B, *et al.* Measurement and simulation of photosynthesis-light response process in *Artemisia ordosica* under water stress[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(1): 55-61. (in Chinese)

[16] 武辉,戴海芳,张巨松,等.棉花幼苗叶片光合特性对低温胁迫及恢复处理的响应[J].植物生态学报,2014,38(10):1124-1134.
WU H, DAI H F, ZHANG J S, *et al.* Responses of photosynthetic characteristics to low temperature stress and recovery treatment in cotton seedling leaves[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(10): 1124-1134. (in Chinese)

[17] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,等.不同淹水时间下中华蚊母树光响应特征及其模型比较[J].应用生态学报,2015,26(4):1083-1090.

LIU Z B, CHENG R M, XIAO W F, *et al.* Light response characteristics of photosynthesis and model comparison of *Distylium chinense* in different flooding durations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 1083-1090. (in Chinese)