

5 种丛生竹叶片光响应曲线拟合模型比较

李雪飞¹, 陈 珑¹, 饶惠玲¹, 李 键^{1,①}, 闫淑君¹, 吴承祯², 杨环玲¹

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘要: 对 5 种丛生竹叶片的光响应参数进行测定, 并利用 4 种光响应模型进行数据拟合。结果显示: 4 种模型的拟合曲线与实测曲线较为接近, R^2 值为 0.92~0.99, 表明 4 种模型的拟合程度均较高。不同模型对最大净光合速率 (P_{\max})、光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP) 和暗呼吸速率 (Rd) 的拟合结果存在差异, 其中, 采用直角双曲线修正模型, 5 种丛生竹的 P_{\max} 拟合值与实测值最接近, 而采用其他 3 个模型, 5 种丛生竹的 P_{\max} 、LSP、LCP 和 Rd 拟合值大多与实测值存在一定差距。4 种模型中, 直角双曲线修正模型的拟合效果总体较好, 可作为丛生竹的最优光响应曲线拟合模型。

关键词: 丛生竹; 光合作用; 光响应模型; 光响应参数

中图分类号: Q945.11; S795.3; S795.6 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2022)02-0088-03

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.02.11

Comparison on light response curve fitting models of five sympodial bamboo species LI Xuefei¹, CHEN Long¹, RAO Huiling¹, LI Jian^{1,①}, YAN Shujun¹, WU Chengzhen², YANG Huanling¹ (1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2022, 31(2): 88-90

Abstract: The light response parameters of leaves of five sympodial bamboo species were measured, and the data were fitted with four light response curve models. The results show that the fitting curves of four models are close to the measured curves, the R^2 values are 0.92-0.99, indicating that the fitting degrees of four models are all relatively high. There are differences in fitting results of different models on maximum net photosynthetic rate (P_{\max}), light saturation point (LSP), light compensation point (LCP) and dark respiration rate (Rd), in which, the fitting values of P_{\max} of five sympodial bamboo species are all closest to the measured values by using modified rectangular hyperbola model, while P_{\max} , LSP, LCP, and Rd of five sympodial bamboo species have certain differences between the fitting values and the measured values when using the other models. The fitting effect of modified rectangular hyperbola model is the best among four models, which can be used as the optimal light response model for sympodial bamboo.

Key words: sympodial bamboo; photosynthesis; light response model; light response parameter

竹子是广泛种植的观赏植物, 不同竹种对环境的适应能力差异明显, 其中, 丛生竹的光能利用和光合固碳能力优于散生竹和混生竹^[1]。目前, 主要采用直角双曲线修正模型、指数模型、直角双曲线模型和非直角双曲线模型^[2,3]对竹子的光响应特征进行研究, 但丛生竹的最适光响应模型仍未知。为此, 作者以中国南方常见的 5 种丛生竹^[4,5]为研究对象, 对 4 种光响应模型进行比较, 以期明确丛生竹的最适光响应拟合模型, 并对 5 种丛生竹的光合能力和光环境适应能力进行探讨, 为丛生竹的进一步开发利用提供基础研究数据。

1 材料和方法

1.1 材料

研究地位于福建省福州国家森林公园 (东经 119°17'34"、

北纬 26°10'04") 竹类观赏园内。供试竹种为麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus* Munro)、佛肚竹 (*Bambusa ventricosa* McClure)、绿竹 (*B. oldhamii* Munro)、粉单竹 (*B. chungii* McClure) 和妈竹 (*B. boniopsis* McClure), 均于 1993 年栽培, 各竹种分别群植于面积 4 m×4 m 的网格内, 生长良好, 枝叶茂盛, 无病虫害。

1.2 方法

各竹种选 3 株, 在冠层中部东南方向选择生长较为一致的当年生叶片 3 枚, 参照相关文献^[6,7]中的方法测定光响应参数。于 2020 年 9 月 15 日至 25 日晴天上午采用 LCPPro-SD 全自动便携式光合仪 (英国 ADC BioScientific 公司) 进行测定。设置叶室温度 30 °C, CO₂ 浓度 400 μmol·mol⁻¹; 先以光强 1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 适应 30 min, 再从 0 μmol·m⁻²·s⁻¹ 开始测定, 每 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 为一个梯度, 共 10 个梯度, 依

收稿日期: 2021-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32071578); 福建省交通运输科技市场主导性重点科技项目 (201823)

作者简介: 李雪飞 (1999—), 女, 山东肥城人, 硕士研究生, 主要从事森林资源经营管理方面的研究。

①通信作者 E-mail: jianli@fafu.edu.cn

引用格式: 李雪飞, 陈 珑, 饶惠玲, 等. 5 种丛生竹叶片光响应曲线拟合模型比较 [J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(2): 88-90.

次记录各光响应参数,每枚叶片重复记录 3 次。

1.3 数据分析和处理

采用光合计算 4.1.1 软件,利用直角双曲线修正模型、指数模型、直角双曲线模型和非直角双曲线模型^[8-11]对 5 种丛生竹的光响应曲线进行拟合并计算各光响应参数。按公式“ $RE = |y_m - y_f| / y_m$ ”计算各光响应参数的相对误差 (RE),其中 y_m 和 y_f 分别为光响应参数的实测值和拟合值。采用 EXCEL 2019 软件对数据进行统计和整理,并绘制图表。

2 结果和分析

2.1 丛生竹叶片光响应模型比较

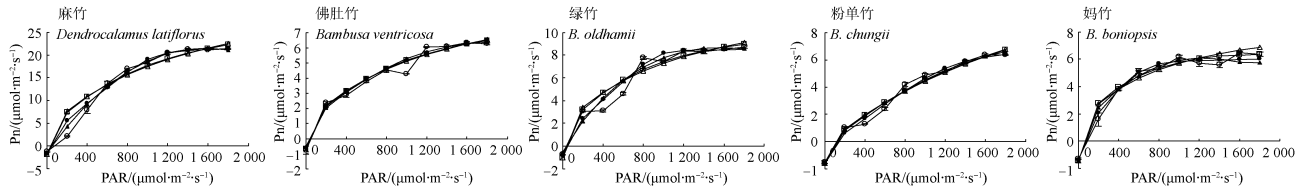
结果(图 1)显示:4 种模型的拟合曲线与实测曲线较为接近,但光响应模型曲线均较实测曲线平滑。4 种模型中,只有直角双曲线修正模型的拟合曲线表现出光抑制现象,符合植

物的光响应过程,拟合效果较好。

2.2 丛生竹叶片光响应模型曲线的拟合效果评价

采用不同光响应曲线模型计算 5 种丛生竹各项光响应参数,并用决定系数 (R^2) 和相对误差 (RE) 评价拟合结果(表 1)。结果表明:5 种丛生竹叶片 4 个模型的 R^2 值为 0.92~0.99,表明 4 种模型的拟合程度均较高。麻竹、佛肚竹、粉单竹和妈竹的直角双曲线修正模型的 R^2 值均高于其他 3 种模型,说明此模型的拟合程度最高。

不同模型对最大净光合速率 (P_{max})、光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP) 和暗呼吸速率 (Rd) 的拟合结果存在差异。其中,采用直角双曲线修正模型时 5 种丛生竹 P_{max} 拟合值均与实测值最接近;麻竹、绿竹和妈竹的 LSP 拟合值、绿竹和麻竹的 LCP 拟合值以及粉单竹和妈竹的 Rd 拟合值也最接近实测值。而采用其他 3 种模型的 5 种丛生竹 P_{max} 、LSP、LCP 和 Rd 拟合值大多与实测值存在一定差距。



—△—: 直角双曲线模型 Rectangular hyperbola model; —●—: 非直角双曲线模型 Non-rectangular hyperbola model; —□—: 指数模型 Exponential model; —▲—: 直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model; —○—: 实测曲线 Measured curve. Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation.

图 1 供试 5 种丛生竹叶片的响应模型拟合曲线和实测曲线
Fig. 1 The fitting curves of light response models and measured curves of leaves of five test sympodial bamboo species

表 1 供试 5 种丛生竹叶片光合参数的光响应模型拟合值与实测值的比较¹⁾

Table 1 Comparison on fitting values of light response models and measured values of light response parameters of leaves of five test sympodial bamboo species¹⁾

模型 Model	P_{max}	RE_1	A	LSP	RE_2	LCP	RE_3	Rd	RE_4	R^2
麻竹 <i>Dendrocalamus latiflorus</i>										
RHM	39.88	0.87	0.035 6	886.28	0.45	52.23	0.28	1.78	0.47	0.95
NRHM	23.43	0.10	0.021 3	679.57	0.58	80.74	0.11	1.72	0.42	0.98
EM	25.84	0.21	0.030 3	2 422.14	0.51	36.18	0.50	1.07	0.12	0.96
MRHM	21.48	0.01	0.031 7	1 589.48	0.01	50.07	0.31	1.56	0.29	0.99
M	21.37			≈ 1 600		72.73		1.21		
佛肚竹 <i>Bambusa ventricosa</i>										
RHM	11.56	0.82	0.011 4	820.31	0.49	69.64	0.43	0.74	0.04	0.96
NRHM	9.83	0.55	0.009 5	748.87	0.53	70.95	0.45	0.65	0.16	0.96
EM	7.50	0.18	0.009 0	2 167.90	0.35	130.10	1.67	1.09	0.42	0.97
MRHM	6.60	0.04	0.008 9	1 874.06	0.17	210.99	3.33	1.78	1.31	0.99
M	6.34			≈ 1 600		48.77		0.77		
绿竹 <i>Bambusa oldhamii</i>										
RHM	14.97	0.72	0.017 9	726.58	0.55	61.09	0.61	1.02	0.40	0.93
NRHM	9.39	0.08	0.009 5	639.96	0.60	89.81	1.36	0.85	0.16	0.96
EM	9.86	0.13	0.014 2	1 850.31	0.16	83.29	1.19	1.11	0.52	0.92
MRHM	8.67	0.00	0.015 2	1 578.94	0.01	36.76	0.03	0.55	0.25	0.94
M	8.71			≈ 1 600		38.02		0.73		

续表1 Table 1 (Continued)

模型 Model	P_{\max}	RE_1	A	LSP	RE_2	LCP	RE_3	Rd	RE_4	R^2
粉单竹 <i>Bambusa chungii</i>										
RHM	11.16	0.75	0.019 3	601.68	0.62	88.21	0.27	1.48	0.14	0.96
NRHM	8.51	0.33	0.006 4	917.75	0.43	249.01	1.07	1.58	0.22	0.97
EM	10.55	0.65	0.007 0	1 692.96	0.06	173.69	0.44	1.15	0.12	0.97
MRHM	6.38	0.00	0.008 4	1 864.16	0.17	172.95	0.44	1.38	0.06	0.98
M	6.38			≈1 600		120.37		1.30		
妈竹 <i>Bambusa boniopsis</i>										
RHM	19.79	2.06	0.008 4	1 645.88	0.18	209.29	0.74	1.61	0.07	0.96
NRHM	7.44	0.15	0.010 1	519.01	0.63	137.60	0.14	1.38	0.09	0.95
EM	6.67	0.03	0.014 0	1 187.41	0.15	96.31	0.20	1.22	0.19	0.96
MRHM	6.30	0.03	0.015 1	1 485.27	0.06	101.31	0.16	1.41	0.07	0.97
M	6.46			≈1 400		120.25		1.51		

¹⁾ RHM: 直角双曲线模型 Rectangular hyperbola model; NRHM: 非直角双曲线模型 Non-rectangular hyperbola model; EM: 指数模型 Exponential model; MRHM: 直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model; M: 实测值 Measured value. P_{\max} : 最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); A: 初始量子效率 Initial quantum yield ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$); LSP: 光饱和点 Light saturation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); LCP: 光补偿点 Light compensation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Rd: 暗呼吸速率 Dark respiration rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). $RE_1 - RE_4$: 分别为 P_{\max} 、LSP、LCP 和 Rd 拟合值的相对误差 Relative errors of fitting values of P_{\max} , LSP, LCP and Rd, respectively; R^2 : 决定系数 Determination coefficient.

2.3 丛生竹光适应能力的比较

以不同丛生竹各项光合参数的最佳模拟结果作为其光合能力的评价指标,结果表明:麻竹的 P_{\max} 值最大,初始量子效率(A)最高。并且,麻竹的适宜光照区间范围(LSP 和 LCP 的差值)最大($2\ 385.96 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。妈竹的 Rd 值最大。综合各项参数,麻竹的光合能力最强、光能利用效率最高、光适应能力最好,利于有机物的积累。

3 讨论和结论

从模型公式来看,直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数模型的函数式无极值,净光合速率的拟合值可能大于实测值;而直角双曲线修正模型具有收敛性,可直接求出饱和和光强,对植物光抑制现象拟合效果较好^[12,13],本文的结果也证实了这一结论。从决定系数(R^2)与拟合效果看,直角双曲线修正模型对5种丛生竹的拟合效果总体优于其他3种模型,但各项光合参数的最佳拟合模型均不同,其中,直角双曲线修正模型对最大净光合速率(P_{\max})和光饱和点(LSP)的拟合效果最好,而光补偿点(LCP)、暗呼吸速率(Rd)和初始量子效率(A)的最佳拟合模型皆不同。然而,叶子飘等^[13]和闫小红等^[14]认为,直角双曲线修正模型是植物最优的光响应模型。因此,对丛生竹光响应模型的适用性还需进一步研究。从各项光合参数的拟合值和实测值看,麻竹的光合能力最佳、光合产物积累能力最强、光适应能力最好,适于大量种植。

参考文献:

- [1] 吴志庄,杜旭华,熊德礼,等. 不同类型竹种光合特性的比较研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1523-1527.
 [2] 张洋洋,凡莉莉,荣俊冬,等. 沿海沙地淡竹和四季竹光合-光响应

特性及其最适模型研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 60-67.

- [3] 杜 澜,夏 捷,李海花,等. 逐步失水过程中绿竹光响应进程及其拟合[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2011-2020.
 [4] 周本智,傅懋毅,杨校生,等. 我国能源竹类植物资源及其开发潜力[J]. 世界林业研究, 2006, 19(6): 49-52.
 [5] 梁天干,黄克福,郑清芳,等. 福建竹类[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1987: 34-36.
 [6] 陈根云,俞冠路,陈 悦,等. 光合作用对光和二氧化碳响应的观测方法探讨[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(6): 691-696.
 [7] 许大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(6): 1163-1167.
 [8] 叶子飘,于 强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(6): 771-775.
 [9] PRADO C H B A, DE MORAES J A P V. Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of Cerrado vegetation under field conditions [J]. Photosynthetica, 1997, 33(1): 103-112.
 [10] BALY E C C. The kinetics of photosynthesis[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1935, 117(804): 218-239.
 [11] Thornley J H M. Mathematical Models in Plant Physiology [M]. London: Academic Press, 1976: 86-110.
 [12] 王荣荣,夏江宝,杨吉华,等. 贝壳砂生境干旱胁迫下杠柳叶片光合光响应模型比较[J]. 植物生态学报, 2013, 37(2): 111-121.
 [13] 叶子飘,于 强. 光合作用光响应模型比较[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1356-1361.
 [14] 闫小红,尹建华,段世华,等. 四种水稻品种的光合光响应曲线及其模型拟合[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 604-610.

(责任编辑: 吴芯夷)