

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.30406

周多多, 蒋少伟, 吴桂林, 李君. 不同水分条件下胡杨光响应曲线拟合模型比较[J]. 植物科学学报, 2017, 35(3): 406~412

Zhou DD, Jiang SW, Wu GL, Li J. Comparison of light response models of photosynthesis in *Populus euphratica* Oliv. grown under contrasting groundwater conditions[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(3): 406~412

不同水分条件下胡杨光响应曲线拟合模型比较

周多多^{1,2}, 蒋少伟^{1,2}, 吴桂林^{1,2}, 李君^{1*}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本研究通过测量不同水分条件下胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)叶片的光响应曲线, 并采用4种光响应模型对其光合特征参数拟合值与实测值进行比较, 分析了不同水分条件下光响应曲线模型对胡杨适用性的影响机制。结果表明, 当水分供应充足时, 胡杨非直角双曲线模型对暗呼吸速率(R_d)的拟合效果最优, 直角双曲线修正模型拟合光饱和点(LSP)、最大净光合速率(P_{nmax})、光补偿点(LCP)的结果与实测值较接近; 但当胡杨受到水分亏缺后, 直角双曲线修正模型对 P_{nmax} 和光饱和点(LSP)的拟合效果最优, 直角双曲线模型对 R_d 和 LCP 的拟合效果最佳。因此, 水分条件有利时胡杨应用直角双曲线修正模型、非直角双曲线模型较好; 水分亏缺条件下采用直角双曲线修正模型、直角双曲线模型更为适合。

关键词: 胡杨; 水分亏缺; 光合光响应曲线; 光响应曲线模型

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)03-0406-07

Comparison of light response models of photosynthesis in *Populus euphratica* Oliv. grown under contrasting groundwater conditions

Zhou Duo-Duo^{1,2}, Jiang Shao-Wei^{1,2}, Wu Gui-Lin^{1,2}, Li Jun^{1*}(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;
2. University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: We measured the light response curves of *Populus euphratica* grown under contrasting experimental groundwater conditions. We assessed the applicability of the light response models for *P. euphratica* under different groundwater conditions by comparing fitted photosynthetic characteristic parameters with measured values using four classic models. Results showed that the LSP , P_{nmax} , and LCP parameters under well-watered conditions were best fit by the modified rectangular hyperbola model, whereas R_d was better estimated by the non-rectangular hyperbola model. For *P. euphratica* under water deficit conditions, the rectangular hyperbola model exhibited better estimation for R_d and LCP , whereas the modified rectangular hyperbola model was more suitable for estimating P_{nmax} and LSP . Overall, our results suggest that when considering model choice for estimating the light response parameters of *P. euphratica*, the modified rectangular hyperbola model and non-rectangular

收稿日期: 2016-10-12, 退修日期: 2016-12-05。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB429903); 国家自然科学基金项目(41171037, U1403281)。

This work was supported by grants from the National 973 Project (2013CB429903) and National Natural Science Fund (41171037, U1403281).

作者简介: 周多多(1991-), 女, 江西人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态学研究(E-mail: 785294040@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: lijun@ms.xjb.ac.cn)。

hyperbola model are applicable for plants grown under benign water environments, but the modified rectangular hyperbola model and rectangular hyperbola model are preferable for those under water deficit environments. This study helps clarifying the light response processes of *P. euphratica* under different moisture conditions and provides a theoretical basis for photosynthetic characteristics.

Key words: *Populus euphratica* Oliv.; Water deficit; Light response curve; Fitted model

影响植物叶片净光合速率的主要因素之一是光合有效辐射 (photosynthetic photo flue density, PPDF)。分析光响应曲线可定量研究 PPDF 与净光合速率 (net photosynthesis rate, P_n) 的关系, 可获得最大净光合速率 (maximum photosynthesis rate, $P_{n\max}$)、光饱和点 (light saturation point, LSP)、光补偿点 (light compensation point, LCP) 及暗呼吸速率 (dark respiration rate, R_d) 等指标, 有助于判断植物在逆境 (如干旱胁迫) 中叶片是否能正常进行光合作用^[1]。为更好的了解光合作用的光反应过程^[2], 前人已建立了多种光响应曲线模型。常用模型有二项式回归模型、直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数模型和直角双曲线修正模型等^[3-6]。它们各具优缺点, 如二项式回归模型不能计算表观量子效率 (apparent quantum yield, AQY) 和解释 PPDF 超过 LSP 后, 及预测的光合速率快速下降等问题^[3]。直角双曲线模型、非直角双曲线模型及指数模型不能准确计算 LSP、 $P_{n\max}$, 无法拟合光抑制现象^[7]。直角双曲线修正模型能准确地计算这些参数及响应光抑制现象^[8], 已应用于水稻 (*Oryza sativa* L.)、小麦 (*Triticum aestivum* Linn.) 等农作物^[6], 而针对乔木是否适用还需进一步验证。近年来, 有关光响应曲线模型的研究开展较多, 如陈卫英等^[8]比较了 5 种模型对高粱 (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)、苋 (*Amaranthus tricolor* L.)、大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 及半夏 (*Pinellia ternata* (Thunb.) Breit) 的适用性, 发现直角双曲线修正模型相比于其它模型具有更高的精确度。王秀伟等^[9]对比了 7 种模型对白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、兴安落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) 的光合参数有效性, 认为不同模型对同种植物光响应曲线的拟合效果不同。然而, 针对同一物种在不同生境下模型的适用性还需进一步研究。

胡杨 (*Populus euphratica* Oliv.) 是塔里木河流

域荒漠河岸林的优势种^[10]。早先定居的胡杨种群因河道迁移, 导致生境水分条件发生了由湿到干的变化^[11]。研究表明, 在形态上, 胡杨通过增加叶厚度、叶面积, 减少比叶面积及改变叶片形态等方式来提高其光合作用面积和叶片保水能力, 减少体内水分散失以适应水分不利的条件^[12]。在生理上, 胡杨通过增加脯氨酸, 减少水势及气体交换参数 (如净光合速率、气孔导度及蒸腾速率等) 以适应水分亏缺状况; 当灌溉后, 其水势和气体交换参数显著升高^[13-17]。这些研究主要针于胡杨的形态变异、水分生理及光合生理方面, 但对不同水分条件下胡杨光响应曲线模型的适用性还缺乏相关研究。因此, 本文以 3 年生胡杨为实验材料, 测定不同水分条件下胡杨叶片的光合作用光响应曲线, 对比 4 种模型的拟合结果, 以期选出胡杨最优光响应曲线模型, 并为进一步了解胡杨光响应过程及有关光合特性研究工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院阿克苏水平衡实验站 (40°27'N, 80°45'E), 为暖温, 干旱气候, 年均气温 10.5°C ~ 11.4°C, 年均降水量为 45.7 mm, 年均潜在蒸发量为 2000 ~ 3000 mm, 无霜期 207 d, 全年日照时数达 2940 h。实验站原生植被为荒漠河岸植被, 以杨柳科 (Salicaceae)、柽柳科 (Tamaricaceae)、豆科 (Leguminosae)、夹竹桃科 (Apocynaceae)、禾本科 (Gramineae) 为主, 优势种为胡杨、柽柳 (*Tamarix ramosissima* Lour.), 其它常见物种主要有芦苇 (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud)、疏叶骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia* (B. Keller et Shap.) Shap) 等^[18]。

1.2 实验材料与设计

1.2.1 实验设计与观测

本实验在中国科学院阿克苏水平衡站实验测坑

里进行。每个测坑(长×宽×高=2.8 m×1.8 m×1.5 m)底部铺有20 cm厚的粗砂层,上面填充来自塔里木河河岸的滩沙土,沙粒:粉粒:粘粒比例为25:70:5。2014年4月初,选取28株3年生胡杨,株高为(40±2) cm,均匀种植于6个测坑中。为了让胡杨健康生长,4~6月份以4 d为周期进行漫灌浇水。7月初随机选取3个测坑停止灌水,为无地下水条件;其余测坑以2 d为周期漫灌,为浅地下水条件。

8月初和9月中旬选择晴朗天气时,采用LI-6400光合作用测定系统(LI-COR,美国)测量不同处理后胡杨的光响应曲线;采用植物压力室PMS(美国)测量胡杨枝条凌晨的水势(predawn water potential, Ψ_{Predawn})和正午水势(midday water potential, Ψ_{Midday})。光响应曲线PPDF梯度分别设置为2500、3000、2500、1800、1500、1200、1000、800、600、400、200、150、100、50、20和0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2.2 模型及参数拟定

本研究采用非直角双曲线模型、直角双曲线模型、指数模型、直角双曲线修正模型拟合胡杨叶片光响应曲线,公式如下:

$$P_n(I) = \frac{\alpha I + P_{n\max} - \sqrt{(\alpha I + P_{n\max})^2 - 4\theta\alpha I P_{n\max}}}{2\theta\alpha I} - R_d \quad (1)$$

$$P_n(I) = \frac{\alpha I P_{n\max}}{\alpha I + P_{n\max}} - R_d \quad (2)$$

$$P_n(I) = P_{n\max} \times \left[1 - e^{-\frac{\alpha I}{P_{n\max}}} \right] - R_d \quad (3)$$

$$P_n(I) = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} - R_d \quad (4)$$

式中 P_n 为一定 CO_2 浓度下最大净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); I 为光合有效辐射强度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); $P_{n\max}$ 为最大净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); R_d 为暗呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); α 为光响应曲线初始斜率即初始量子效率 (mol/mol); θ 为曲角,反映了光合曲线弯曲程度的凸度; β ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) 和 γ ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) 是独立于 I 的系数。

1.2.3 数据处理

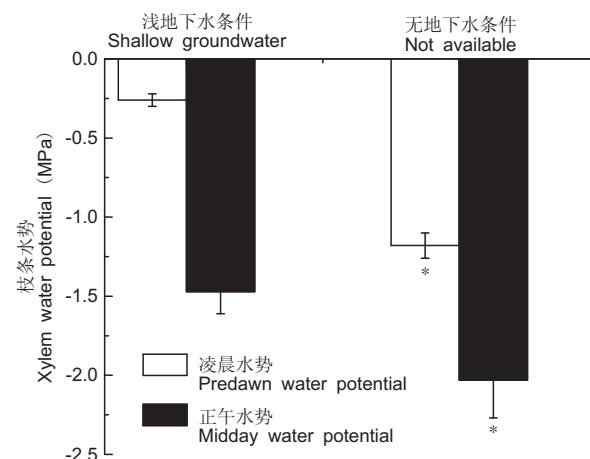
利用SPSS 16.0软件中的非线性回归模块对数据进行拟合,得出 $P_{n\max}$ 、 R_d 、 LSP 及 LCP 等指标。相对误差(Relative error, RE)=|拟合值-

实测值|/实测值, RE 越小表示越接近实测值。对浅或无地下水条件下胡杨枝条水势的采用SPSS 16.0软件进行one-way ANOVA分析, $P < 0.05$ 时表示差异显著。

2 结果分析

2.1 植物水势

研究表明,浅地下水条件下,胡杨凌晨水势和正午水势分别为-0.26 MPa和-1.47 MPa;无地下水条件下则分别为-1.18 MPa和-2.03 MPa(图1)。浅地下水条件下的胡杨凌晨水势和正午水势显著高于无地下水条件($P < 0.05$)。



* 表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

* indicates significant differences at the 0.05 level.

图1 不同水分条件下胡杨凌晨水势和正午水势
Fig. 1 Predawn and midday xylem water potential for *Populus euphratica* under contrasting groundwater conditions

2.2 净光合速率的光响应变化

研究发现,不同地下水条件下胡杨 P_n 值均随PPDF值的增强呈上升的趋势(图2)。当PPDF值低于400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,胡杨 P_n 值在不同水分条件下的表现一致;但当PPDF值高于400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,浅地下水条件下胡杨 P_n 值显著高于无地下水条件($P < 0.05$)。无地下水条件下PPDF值高于2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,胡杨明显受到光抑制。

2.3 不同水分条件下光响应模型拟合

本研究中,直角双曲线模型和非直角双线模型拟合的浅、无地下水条件下,胡杨 $P_{n\max}$ 值分别高于28.8、13.59 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, LSP 值分别小于2500、2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;指数模型拟合的

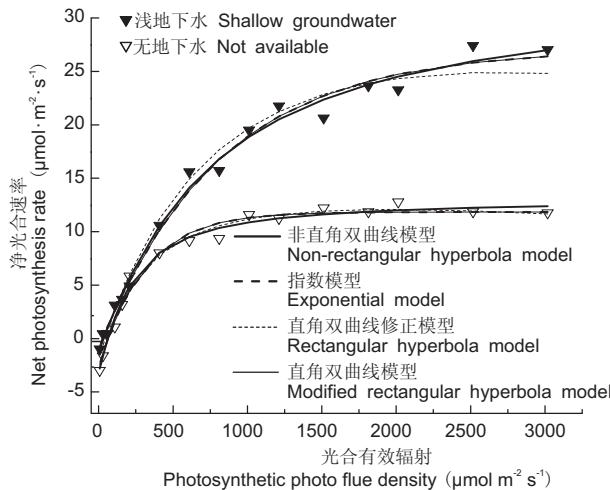


图 2 不同水分条件下胡杨的光响应曲线

Fig. 2 Light response curve of *Populus euphratica* under contrasting groundwater conditions

P_{nmax} 值最接近实测值, 拟合的 LSP 远小于实测值; 直角双曲线修正模型拟合的 LSP 值最接近实测值(表 1)。4 种模型拟合的决定系数(R^2)均较高($R^2 > 0.980$)。

指数模型、非直角双曲线模型、直角双曲线模型及直角双曲线修正模型, 拟合胡杨所有光响应参数相对误差(RE)的总和分别为 2.634、2.421、2.883 和 1.067(表 2)。其中指数模型(0.093)和直角双曲线修正模型(0.103)对胡杨 P_{nmax} 值拟合的 RE 较小; 其次是非直角双曲线模型(0.454)和直角双曲线模型(0.601)。非直角双曲线模型(0.082)

对胡杨 R_d 值拟合的 RE 最小, 其次是直角双曲线模型(0.302)、直角双曲线修正模型(0.467)及指数模型(0.681)。直角双曲线修正模型对胡杨 LSP 值拟合的 RE (0.097)最小, 其远小于其它模型。指数模型对胡杨 LC 拟合 RE 值略小于直角双曲线修正模型。以上结果表明, 4 种模型对胡杨叶片光响应过程的整体拟合效果排序为: 直角双曲线修正模型 > 非直角双曲线模型 > 指数模型 > 直角双曲线模型。

浅地下水条件下, 4 种模型拟合胡杨参数 RE 值的总和分别为 1.346、1.149、1.687、0.770; 无地下水条件下, 其拟合 RE 值的总和分别为 1.288、1.272、1.196、0.297(表 2)。其中不同水分条件下, 直角双曲线修正模型对 P_{nmax} 和 LSP 值的拟合效果与实测值最接近。无地下水条件下, 直角双曲线模型对 R_d (0.037)和 LCP(0.110)值的拟合效果最优。浅地下水条件下, 非直角双曲线模型对 R_d (0.015)值的拟合效果最佳; 指数模型对 P_{nmax} (0.002)和 LCP(0.200)值的拟合效果最好。以上结果表明, 浅地下水条件下, 4 种模型对胡杨叶片光响应过程的拟合效果排序为: 直角双曲线修正模型 > 非直角双曲线模型 > 指数模型 > 直角双曲线模型; 无地下水条件下, 4 种模型对其拟合效果排序为: 直角双曲线修正模型 > 直角双曲线模型 > 非直角双曲线模型 > 指数模型。

表 1 胡杨叶片光响应参数实测值与模型拟合值

Table 1 Measured values of the net photosynthetic rate-light response parameters of *Populus euphratica* leaves and fitting of results by four models

光响应模型 Light response model	地下水 Groundwater conditions	光响应参数 Light response parameter				决定系数 R^2
		R_d ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	P_{nmax} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	
实测值 Measured value	A	0.733	13.929	28.80	2500	-
非直角双曲线模型 Non-rectangular hyperbola model	B	2.840	39.944	13.59	2000	-
直角双曲线模型 Rectangular hyperbola model	A	0.722	18.333	35.386	1028.029	0.991
指数模型 Exponential model	B	2.649	48.556	16.645	471.575	0.988
直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model	A	0.927	21.279	37.732	1039.758	0.991
	B	2.947	44.354	17.556	483.122	0.987
	A	0.395	11.143	28.858	792.119	0.990
	B	2.216	48.844	14.823	412.848	0.985
	A	1.000	17.213	26.013	2316.625	0.984
	B	2.547	46.481	13.505	2047.143	0.989

注: A, 浅地下水条件; B, 无地下水条件; R_d , 暗呼吸速率; LCP, 光补偿点; P_{nmax} , 最大净光合速率; LSP, 光饱和点。下同。

Notes: A, shallow groundwater; B, not available; R_d , dark respiration rate; LCP, light compensation point; P_{nmax} , maximum net photosynthetic rate; LSP, light saturation point. Same below.

表2 胡杨叶片光响应参数的模型拟合值与实测值的相对误差
Table 2 Relative errors of measured and fitted values of photosynthetic rate-light response parameters of *Populus euphratica* leaves

光响应模型 Light response model	地下水 Groundwater conditions	光响应参数 Light response parameter				相对误差之和 Sum of the relative error
		R_d	LCP	P_{nmax}	LSP	
非直角双曲线模型 Non-rectangular hyperbola model	A	0.015	0.316	0.229	0.589	1.149
直角双曲线模型 Rectangular hyperbola model	B	0.067	0.216	0.225	0.764	1.272
指数模型 Exponential model	A	0.265	0.528	0.310	0.584	1.687
直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model	B	0.037	0.110	0.291	0.758	1.196
直角双曲线模型 Rectangular hyperbola model	A	0.461	0.200	0.002	0.683	1.346
直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model	B	0.220	0.183	0.091	0.794	1.288
直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model	A	0.364	0.236	0.097	0.073	0.770
直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model	B	0.103	0.164	0.006	0.024	0.297

3 讨论

本研究表明, 4种模型对胡杨整体拟合效果顺序应为: 直角双曲线修正模型 > 非直角双曲线模型 > 指数模型 > 直角双曲线模型。李菊艳等^[19]的研究采用非直角双曲线模型, 计算出胡杨的 LSP 值小于 $1100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, P_{nmax} 值远大于实测值, 研究结果与本文应用此模型的拟合结果相似。因为该模型是没有极点的渐近线, 故拟合的光合速率随光合有效辐射呈现出不断上升的趋势, 需通过非线性最小二乘法计算 P_{nmax} 和 LSP 值, 因此用此法计算的结果与实测值相差较大^[7,8], 这与水稻^[7]、杠柳(*Periploca sepium* Bunge)^[20]等农作物和灌木中得出的结论类似。本文的研究结果表明, 非直角双曲线模型拟合效果优于直角双曲线模型, 与该模型对 R_d 和 P_{nmax} 值拟合效果较优有关。非直角双曲线模型考虑到光响应曲线的弯曲程度, 使其拟合的光合速率逐渐趋于平缓, 进而 R_d 和 P_{nmax} 值与实测值更接近^[6,7]。钱文莲等^[21]使用指数模型计算巨尾桉(*Eucalyptus grandiose urophylla*) LSP 的结果与实测值相吻合, 但本文利用该模型计算 LSP 值的结果与实测值相差较大。原因可能是指数模型采用 P_{nmax} 来估算 LSP 时, 选取的比例为 99%, 具有较强的人为性, 不具有生物学意义^[22]。直角双曲线修正模型可准确计算 P_{nmax} 和 LSP 值, 与该模型存在极值有关, 这在水稻、小麦等农作物中应用广泛^[6], 本研究表明此模型对胡杨也同样适用。

浅地下水条件下, 直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型拟合效果更佳; 无地下水条件下, 直角双曲线修正模型和直角双曲线模型拟合效果更优, 表明在选取光响应模型估计相关光合参数时应考虑植物水分状态。植物水分恢复状况可用凌晨水势表示, 凌晨水势能判断植物水分亏缺程度^[23]。无地下水条件下, 胡杨凌晨水势(-1.18 MPa)明显小于浅地下水条件下的凌晨水势(-0.26 MPa), 表明此时胡杨夜间水势恢复已受到环境水分条件的限制。根据 Hukin 等^[24]对水力枝条脆弱性曲线的研究, 表明胡杨水势为 -0.7 MPa 时, 其木质部损失已达 50%, 处于水分亏缺的状态。本文研究中, 无地下水条件下胡杨凌晨水势明显低于 -0.7 MPa, 表明已受到较严重的水分亏缺。但直角双曲线模型和指数模型不适合水分亏缺条件下的分析, 则与王荣荣等^[20]的研究结果不同, 原因可能与该模型对 LCP 和 R_d 值的拟合效果较差有关。非直角双曲线模型适合水分供应充足条件, 与模型对 R_d 值的拟合效果较好有关。直角双曲线修正模型适合各种水分条件, 尤其是水分亏缺状况, 可能与模型添加了光抑制项 β 和光饱和项 γ 有关^[7,8,25]。水分条件有利时, β 和 γ 值均较小, 植物叶片不易受到光抑制和光饱和的影响; 干旱胁迫时, β 和 γ 值均较大, 易出现光饱和点和光抑制点^[21]。文中浅地下水条件下 β ($6.00 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) 和 γ ($2.00 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) 小于无地下水条件下 β ($6.45 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) 和 γ ($3.00 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$) 值, 表明无地下水条件下胡杨受到光抑制, 故直角双曲线修正模型在水分亏缺条件下对胡杨拟合效果更优。前人在不同水分条件下计算

浅地下水条件下, 直角双曲线修正模型和非直

胡杨光响应特征参数均采用非直角双曲线模型^[15,22], 未考虑在水分亏缺下胡杨可能受到光抑制, 因而不能准确的反映胡杨光响应过程和计算光响应参数值。故胡杨在水分亏缺条件下采用直角双曲线修正模型拟合其光合参数更佳。

参考文献:

- [1] Thornley JHM. Dynamic model of leaf photosynthesis with acclimation to light and nitrogen [J]. *Ann Bot*, 1998, 81(3): 421–430.
- [2] Prado CH, Moraes JAPVD. Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of *Cerrado* vegetation under field conditions [J]. *Photosynthetica*, 1997, 33(1): 103–112.
- [3] 刘宇锋, 萧浪涛, 童建华, 李晓波. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 76–79.
- Liu YF, Xiao LT, Tong JH, Li XB. Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(8): 76–79.
- [4] DiasFilho BM. Photosynthetic light response of the C₄ grasses *Brachiaria brizantha* and *B. humidicola* under shade [J]. *Sci Agr*, 2002, 59(1): 65–68.
- [5] Kubiske ME, Pregitzer KS. Effects of elevated CO₂ and light availability on the photosynthetic light response of trees of contrasting shade tolerance [J]. *Tree Physiol*, 1996, 16(3): 351–8.
- [6] Ye ZP. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(4): 637–640.
- [7] 叶子飘. 光合作用对光和CO₂响应模型的研究进展 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727–740.
- Ye ZP. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂ [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 727–740.
- [8] 陈卫英, 陈真勇, 罗辅燕, 彭正松, 余懋群. 光响应曲线的指数改进模型与常用模型比较 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1277–1285.
- Chen WY, Chen ZY, Luo FY, Peng ZS, Yu MQ. Comparison between modified exponential model and common models of light-response curve [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(12): 1277–1285.
- [9] 王秀伟, 毛子军. 7个光响应曲线模型对不同植物种的实用性 [J]. 植物研究, 2009, 29(1): 43–48.
- Wang XW, Mao ZJ. Practicability of 7 light responsive curve models to different plant species [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2009, 29(1): 43–48.
- [10] Zhang YM, Chen YN, Pan BR. Distribution and floristics of desert plant communities in the lower reaches of Tarim River [J]. *J Arid Environ*, 2005, 63(4): 772–784.
- [11] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 张宏峰, 陈亚鹏. 塔里木河下游地下水位对植被的影响 [J]. 地理学报, 2003, 58(4): 542–549.
- Chen YN, Li WH, Xu HL, Zhang HF, Chen YP. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 542–549.
- [12] Xu X, Xiao L, Feng J, Chen N, Chen Y, et al. Cuticle lipids on heteromorphic leaves of *Populus euphratica* Oliv. growing in riparian habitats differing in available soil moisture [J]. *Physiol Plantarum*, 2016.
- [13] Chen YP, Chen YN, Li WH, Xu CC. Characterization of photosynthesis of *Populus euphratica*, grown in the arid region [J]. *Photosynthetica*, 2006, 44(4): 622–626.
- [14] Zhu GF, Xin L, Su YH, Lu L, Huang CL. Seasonal fluctuations and temperature dependence in photosynthetic parameters and stomatal conductance at the leaf scale of *Populus euphratica* Oliv. [J]. *Tree Physiol*, 2011, 31(2): 178–195.
- [15] 陈亚鹏, 陈亚宁, 徐长春, 李卫红, 付爱红. 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(2): 344–353.
- Chen YP, Chen YN, Xu CC, Li WH, Fu AH. Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 2(7736): 1259.
- [16] Yu B, Zhao CY, Li J, Li JY, Peng G. Morphological, physiological, and biochemical responses of *Populus euphratica*, to soil flooding [J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(1): 110–117.
- [17] Watanabe S, Kojima KY, Sasaki S. Effects of saline and osmotic stress on proline and sugar accumulation in *Populus euphratica* in vitro [J]. *Plant Cell Tiss Org*, 2000, 63(3): 199–206.
- [18] Wu GL, Jiang SW, Liu WY, Zhao CY, Li J. Competition between *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* seedlings under simulated high groundwater availability [J]. *J Arid Land*, 2016, 8(2): 293–303.
- [19] 李菊艳, 赵成义, 闫映宇, 盛钰, 于波, 彭刚. 不同盐分梯度下胡杨幼苗的光合—光响应特征 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 728–733.
- Li JY, Zhao CY, Yan YY, Cheng Y, Yu B, Peng G. Response of *Populus euphratica* seedlings to photosynthesis-light under salt stress [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(4): 728–733.
- [20] 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 赵艳云, 刘京涛, 孙景宽. 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.
- Wang RR, Xia JB, Yang JH, Zhao YY, Liu JT, Sun JK. Comparison of light response models of photosynthesis in leaves of *Periploca sepium* under drought stress in sand habitat formed from seashells [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(2): 111–121.
- [21] 钱莲文, 张新时, 杨智杰, 韩志刚. 几种光合作用光响应典型模型的比较研究 [J]. 植物科学学报, 2009, 27(2): 197–203.
- Qian LW, Zhang YS, Yang ZJ, Han ZG. Comparison of different light response models of for photosynthesis [J]. *Plant Science Journal*, 2009, 27(2): 197–203.
- [22] 闫小红, 尹建华, 段世华, 周兵, 胡文海, 刘帅. 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.
- Yan XH, Yin JH, Duan SH, Zhou B, Hu WH, Liu S. Photo-
- tosynthesis light response curves of four rice varieties and model fitting [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 604–610.
- [23] Choné X, Leeuwen CV, Dubourdieu D, Gaudillière JP. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status [J]. *Ann Bot*, 2001, 87(4): 477–483.
- [24] Hukin D, Cochard H, Dreyer E, Le TD, Boqeat-Triboulot MB. Cavitation vulnerability in roots and shoots: does *Populus euphratica* Oliv. a poplar from arid areas of Central Asia, differ from other poplar species? [J]. *J Exp Bot*, 2005, 56(418): 2003–2010.
- [25] Lang Y, Wang M, Zhang GC, Zhao QK. Experimental and simulated light responses of photosynthesis in leaves of three tree species under different soil water conditions [J]. *Photosynthetica*, 2013, 51(3): 370–378.

(责任编辑: 周媛)

欢迎订阅 2018 年《植物科学学报》

双月刊 大 16 开 国内定价 50 元 全年 300 元

邮发代号 38-103(国内) BM872(国外)

刊号 CN 42-1817/Q ISSN 2095-0837

《植物科学学报》是中国科学院主管、中科院武汉植物园主办、科学出版社出版、国内外公开发行的植物学综合性学术期刊, 主要刊载植物学及各分支学科的原始研究论文。

栏目设置: 特邀综述、系统与进化、生态与生物地理、遗传与育种、生理与发育、资源与植物化学、技术与方法、研究快报、学术讨论、重要书刊评介和学术动态等。

读者对象: 科研院所和高等院校从事植物科学的研究人员、教师和研究生, 以及相关学科、交叉学科的科技工作者。

《植物科学学报》为中国自然科学核心期刊, 已被中国科学引文数据库核心库、《中文核心期刊要目总览》、中国科技论文与引文数据库、中国生物学文献数据库、中国核心期刊(遴选)数据库、中国知识资源总库《中国科技期刊精品数据库》、中国期刊全文数据库、《中国药学文摘》、美国《化学文摘》、美国《生物学文摘》、美国《剑桥科学文摘: 自然科学》、俄罗斯《文摘杂志》、日本《科学技术文献速报》、英国《国际农业与生物科学研究中心文摘》、波兰《哥白尼索引》、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)等二十多种国内外检索期刊、数据库作为核心期刊或统计源期刊收录。本刊曾相继获全国优秀科技期刊奖、中国科学院优秀期刊奖、湖北省优秀期刊奖。

本刊已开通了网站和远程稿件管理系统(<http://www.plantscience.cn>), 目前本刊所有过刊及现刊已全部上网, 欢迎广大新老作者和读者在线投稿、查询下载使用过刊, 继续关注和支持本刊。

订阅方式: ① 全国各地邮局均可订阅(邮发代号: 38-103); ② 直接与本刊编辑部联系订阅(免收邮挂费)。

通讯地址: 武汉市武昌磨山 中科院武汉植物园内《植物科学学报》编辑部

邮编: 430074 电话: 027-87510755, 027-87510579

E-mail: editor@wbgcas.cn; zwkxbjb@wbgcas.cn

<http://www.plantscience.cn>

欢迎赐稿, 欢迎订阅, 欢迎刊登广告