

祁连山中段 5 种典型植物光合光响应曲线拟合模型比较

田俊凯¹, 韩 昊^{2,①}, 赵传燕¹, 董泽华¹, 常亚鹏¹

(1. 兰州大学草地农业科技学院 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃 兰州 730020;
2. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000)

摘要: 测定祁连山中段 5 种典型植物的光响应参数,并用 4 种光响应模型进行拟合。结果表明:青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)、金露梅[*Dasiphora fruticosa* (Linn.) Rydb.]和垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)的光合光响应曲线属于饱和趋近型,蕨麻[*Argentina anserina* (Linn.) Rydb.]的光合光响应曲线属于强度抑制型。4 种模型均能较好地拟合供试 5 种植物的光合光响应曲线,但仅直角双曲线修正模型可以较好地拟合强度抑制型光合光响应曲线的光抑制阶段。直角双曲线修正模型除了对饱和趋近型光合光响应曲线光饱和点的拟合值偏高外,可以较好地拟合其他光响应参数。综上所述,直角双曲线修正模型为祁连山中段典型植物光合光响应曲线的最优拟合模型。

关键词: 祁连山; 典型植物; 光合光响应曲线; 光响应模型

中图分类号: Q945.11; Q948.15⁺6 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)04-0092-03
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.04.10

Comparison on photosynthetic light response curve fitting models of five typical plants in the middle part of Qilian Mountains TIAN Junkai¹, HAN Hao^{2,①}, ZHAO Chuanyan¹, DONG Zehua¹, CHANG Yapeng¹ (1. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining 810000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(4): 92-94

Abstract: The light response parameters of five typical plants in the middle part of Qilian Mountains were measured and fitted by using four light response models. The results show that the photosynthetic light response curves of *Picea crassifolia* Kom., *Juniperus przewalskii* Kom., *Dasiphora fruticosa* (Linn.) Rydb., and *Elymus nutans* Griseb. belong to the saturation approaching type, and that of *Argentina anserina* (Linn.) Rydb. belongs to the severe suppression type. All the four models can well fit the photosynthetic light response curves of five plants tested, but only the modified rectangular hyperbola model can well fit the photoinhibition part in the photosynthetic light response curve of severe suppression type. The modified rectangular hyperbola model can well fit the light response parameters except that the fitted value to light saturation point of photosynthetic light response curves of saturation approaching type is relatively high. Overall, the modified rectangular hyperbola model is the optimal fitting model for the photosynthetic light response curves of typical plants in the middle part of Qilian Mountains.

Key words: Qilian Mountains; typical plant; photosynthetic light response curve; light response model

祁连山的主要植被有高寒草甸、灌丛、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)林和青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)林等,由于人口的急剧膨胀和工业化的不断推进,该地区生态环境遭到严重破坏^[1]。选择合适的植物种类和植被结构是植被恢复和重建工作重点之一。研究植物的光合光响应曲线,不仅可以量化不同植物的光合固碳能力,还有助于理解植物对生态环境的适应性^[2]。不同植物的光合光响应曲线特征不同,所适用的拟合模型也不同^[3]。本研究选择祁连山中段 5 种典型植物为研究对象,探究其光合光响应曲线最优拟合模型,以

期深入理解祁连山不同植被的光合特性,为当地的植被管理工作提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

研究区位于祁连山中段的天涝池流域(东经 99°53'50"~99°57'10"、北纬 38°23'58"~38°26'56"),属高寒半湿润的高山气候,年平均降水量 435.5 mm^[4]。区域内设有青海云杉林、祁

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901130); 甘肃省自然科学基金(20JR5RA277; 20JR5RE645)

作者简介: 田俊凯(1999—),男,山西晋城人,硕士研究生,主要从事植物光合生理生态方面的研究。

①通信作者 E-mail: 84759990@qq.com

引用格式: 田俊凯, 韩 昊, 赵传燕, 等. 祁连山中段 5 种典型植物光合光响应曲线拟合模型比较[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(4): 92-94.

连圆柏林、金露梅 [*Dasiphora fruticosa* (Linn.) Rydb.] 灌丛和牧草地长期固定观测样地,海拔均在 3 068 m 左右,其中青海云杉林位于阴坡,祁连圆柏林位于阳坡,金露梅灌丛和牧草地位于山间平地。选择样地中青海云杉、祁连圆柏、金露梅、垂穗披碱草 (*Elymus nutans* Griseb.) 和蕨麻 [*Argentina anserina* (Linn.) Rydb.] 为研究对象。

1.2 方法

供试 5 种植物各随机选 3 株,每株选 2 枚成熟叶片(青海云杉和祁连圆柏选低冠层叶片,其他 3 种植物选植株顶端叶片),于 2021 年 8 月 10 日至 20 日(晴天)上午 9:00—11:30 使用 LI-6400 便携式光合作用分析系统(美国 LI-COR 公司)测定光合光响应曲线。参照文献[5]中的方法,测量前设置红蓝光光源光合有效辐射(PAR)为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,对叶片进行光诱导,直至叶片净光合速率稳定。设置 PAR 值的梯度为 2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、20、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (测量垂穗披碱草和蕨麻时设置最大 PAR 值为 $1\ 800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),叶面积 $1\ \text{cm}^2$,控制叶室内 CO_2 浓度约 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,空气相对湿度约 60%,温度 $(27\pm 2)\ ^\circ\text{C}$,依次记录各 PAR 值下的净光合速率。

测量完成后将所测叶片带回实验室,使用 Epson Perfection V850 Pro 扫描仪(爱普生(中国)有限公司)与 WinSEEDLE 软件计算叶面积,其中,青海云杉和祁连圆柏的叶面积根据公式“叶面积=(投影面积 $\times\pi$)/2”计算。分别使用各植物叶面积进行光响应参数的重计算,得到各植物叶片光响应数据。

1.3 数据统计和分析

参考叶子飘^[6]的方法拟合光合光响应曲线和光响应参数。利用 SPSS 25.0 软件,选择直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数模型和直角双曲线修正模型对光响应参数进行非线性拟合,利用 EXCEL 2019 软件统计整理数据并计算光响应参数,利用 Origin 2022 软件作图。

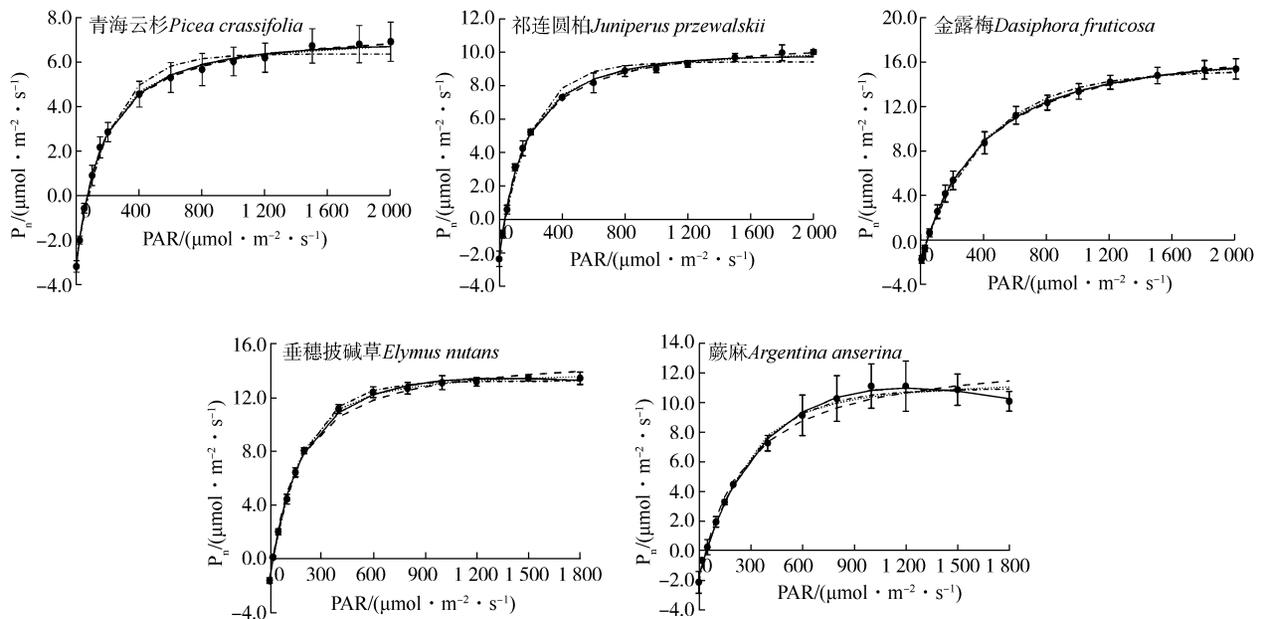
2 结果和分析

2.1 不同植物光合光响应曲线的类型及拟合程度比较

结果(图 1)显示:青海云杉、祁连圆柏、金露梅和垂穗披碱草的净光合速率(P_n)实测值均随光合有效辐射(PAR)增加而升高,并趋向饱和,这 4 种植物的光合光响应曲线属于饱和趋近型^[3]。蕨麻的 P_n 实测值随 PAR 值增加先升高后降低,光抑制现象明显,其光合光响应曲线属于强度抑制型^[3]。对于青海云杉、祁连圆柏、金露梅和垂穗披碱草,4 种模型拟合曲线的变化趋势与实测值基本一致;对于蕨麻,PAR 值小于等于 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,4 种模型的拟合曲线接近实测值,PAR 值大于 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,仅直角双曲线修正模型较好地拟合这一阶段。

2.2 不同模型对不同植物光响应参数拟合效果的比较

结果(表 1)显示:在拟合供试 5 种植物光合光响应曲线时,各模型的确定系数均大于 0.98,整体拟合效果较好。4 种模型对 5 种植物表观量子效率(AQY)和暗呼吸速率(R_d)的拟



●: 实测值 Measured value; ---: 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. P_n : 净光合速率 Net photosynthetic rate; PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation.

图 1 祁连山中段 5 种典型植物的光响应模型拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of light response models of five typical plants in the middle part of Qilian Mountains

表1 祁连山中段5种典型植物光响应参数实测值与拟合值的比较¹⁾
Table 1 Comparison on measured values and fitting values of light response parameters of five typical plants in the middle part of Qilian Mountains¹⁾

模型 Model	AQY	LSP	LCP	P _{nmax}	R _d	R ²
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>						
M	0.029 7	≈1 500	69.57	6.89	3.18	
RH	0.029 3	476.43	67.27	10.75	3.18	0.999
NRH	0.029 4	2 615.31	8.00	73.84	3.05	0.998
EM	0.027 7		76.67	9.11	2.77	0.988
MRH	0.029 1	2 550.40	68.87	6.65	3.12	0.998
祁连圆柏 <i>Juniperus przewalskii</i>						
M	0.037 8	≈800	37.70	10.05	2.36	
RH	0.037 4	422.59	33.54	13.37	2.44	0.999
NRH	0.037 6	1 836.44	6.34	66.81	2.24	0.998
EM	0.035 8		38.07	11.38	1.94	0.990
MRH	0.036 9	2 010.57	34.42	9.75	2.33	0.998
金露梅 <i>Dasiphora fruticosa</i>						
M	0.035 7	≈1 800	43.25	15.31	1.79	
RH	0.036 1	622.02	36.21	20.61	1.85	1.000
NRH	0.034 4	3 078.49	6.58	104.29	1.61	0.999
EM	0.031 5	1 097.98	34.59	16.46	1.33	0.998
MRH	0.035 3	3 316.98	36.06	14.19	1.76	1.000
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>						
M	0.047 5	≈600	20.16	13.38	1.73	
RH	0.047 8	403.14	20.24	17.25	2.02	0.996
NRH	0.048 0	685.67	11.03	31.39	1.52	0.999
EM	0.046 8	601.78	21.45	14.67	1.52	0.999
MRH	0.047 2	1 364.75	20.85	13.37	1.81	0.999
蕨麻 <i>Argentina anserina</i>						
M	0.031 7	≈1 000	43.36	11.08	2.17	
RH	0.034 2	520.41	41.96	15.57	2.23	0.987
NRH	0.031 1	806.43	27.03	23.36	1.72	0.992
EM	0.031 4	1 557.96	46.37	12.75	1.85	0.994
MRH	0.030 5	1 216.73	46.25	10.81	1.78	0.998

¹⁾ M: 实测值 Measured value; RH: 直角双曲线模型 Rectangular hyperbola model; NRH: 非直角双曲线模型 Non-rectangular hyperbola model; EM: 指数模型 Exponential model; MRH: 直角双曲线修正模型 Modified rectangular hyperbola model. AQY: 表观量子效率 Apparent 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 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); P_{nmax}: 最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); R_d: 暗呼吸速率 Dark respiration rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); R²: 决定系数 Determination coefficient.

合值均接近其实测值。与光饱和点(LSP)的实测值相比,直角双曲线模型(RH)对各植物LSP的拟合值均偏低;非直角双曲线模型(NRH)对青海云杉、祁连圆柏和金露梅LSP的拟合值明显偏高,对垂穗披碱草和蕨麻LSP的拟合值较接近其实测值;指数模型(EM)未能拟合出青海云杉和祁连圆柏的LSP值,对金露梅LSP的拟合值偏低,对垂穗披碱草LSP的拟合值接近其实测值,对蕨麻LSP的拟合值偏高;直角双曲线修正模型(MRH)除了对蕨麻LSP的拟合值较接近其实测值外,对其

他植物LSP的拟合值均明显偏高。除NRH对各植物光补偿点(LCP)的拟合值偏低外,其他模型均能较好地拟合各植物的LCP值。EM和MRH对各植物最大净光合速率(P_{nmax})的拟合值总体接近实测值,而RH和NRH对其拟合值偏高。

3 讨论和结论

祁连山中段5种典型植物叶片的光合光响应曲线表现出饱和趋近型和强度抑制型2种形式,4种模型对5种植物光合光响应曲线拟合程度均较高,但仅直角双曲线修正模型可以较好地拟合强度抑制型光合光响应曲线的光抑制阶段,这与已有研究结果^[7-8]一致。在拟合光响应参数时,直角双曲线模型、非直角双曲线模型和指数模型均会出现偏高或偏低的情况,而直角双曲线修正模型可以较好地拟合光响应参数^[9-10]。与实测值相比,直角双曲线模型和非直角双曲线模型对5种植物光饱和点和最大净光合速率的拟合值基本上偏高或偏低;指数模型对金露梅和蕨麻光饱和点的拟合值偏离实测值,且在拟合青海云杉和祁连圆柏光饱和点时发生错误;直角双曲线修正模型除了无法较好地拟合饱和趋近型光合光响应曲线的光饱和点外,对其他参数的拟合值均接近实测值。因此,直角双曲线修正模型为供试5种植物光合光响应曲线最优拟合模型,但各植物光饱和点的确定仍需寻求其他方法。

参考文献:

- [1] 赵传燕, 别强, 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 113-121.
- [2] 陈晓英, 李翠, 郭晓云, 等. 3种紫萁属植物叶片光合特性研究[J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(1): 1-7.
- [3] 段爱国, 张建国. 光合作用光响应曲线模型选择及低光强属性界定[J]. 林业科学研究, 2009, 22(6): 765-771.
- [4] 刘俊杰. 围封对祁连山高寒草甸优势物种和植物群落光合特性的影响及生产力模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 21.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王帅, 韩晓日, 战秀梅, 等. 不同氮肥水平下玉米光响应曲线模型的比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1403-1412.
- [8] 刘强, 李凤日, 谢龙飞. 人工长白落叶松冠层光合作用-光响应曲线最优模型[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2420-2428.
- [9] 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.
- [10] 叶子飘, 李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 38-44.

(责任编辑: 张明霞)