

模拟水分胁迫对乌桕幼苗光响应特征的影响

李卫华¹, 王晓丽²

(1. 漯河市农业科学院, 河南 漯河 462300; 2. 舞阳县林业事务服务中心, 河南 舞阳 462400)

摘要:在光合作用中,水分是重要的原料,当供水量不能满足植物正常的生长时,就会造成水分胁迫。为探明水分胁迫条件下乌桕叶片光响应特征的变化规律,本试验以乌桕实生幼苗作为试材,采用 PEG-6000(聚乙二醇)模拟水分胁迫,来测定乌桕叶片的光响应变化趋势,绘制出光响应曲线,并采用光响应模型,通过拟合对比了不同浓度聚乙二醇(CK, 5%, 10%, 15%)处理下的光响应参数差异。结果表明:(1)四个浓度处理下,乌桕叶片的净光合速率(P_n)均在达到光饱和后,随着光合有效辐射强度(PAR)增加而下降,都表现出了光抑制现象。(2)随着胁迫浓度的增加,表观量子效率(AQE)、最大净光合速率(P_{nmax})均表现为 CK 最好,其它处理随胁迫浓度的增加逐渐降低。(3)光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)在 PEG 浓度为 10% 时, LSP 达到最大,并且高于 CK, LCP 此时处于最低值。(4)对乌桕幼苗叶片的光响应曲线拟合发现,4 种模型中以直角双曲线修正模型最好,直角双曲线模型最差。本研究筛选出模拟乌桕光合特性的最佳光响应模型,对乌桕实际的栽培及水分管理具有重要的理论价值。

关键词:水分胁迫 光合作用;蒸腾作用;光饱和点;光响应模型

中图分类号:S544 文献标识码:A 文章编号:0488-5368(2026)04-0010-08

Effects of Simulated Water Stress on Light Response Characteristics of *Sapium sebiferum* Seedlings

LI Weihua¹, WANG Xiaoli²

(1. Luohe Academy of Agricultural Sciences, Luohe, Henan 462300, China;

2. Wuyang County Forestry Affairs Service Center, Wuyang, Henan 462400, China)

Abstract: To investigate the changes in the light response characteristics of *Sapium sebiferum* leaves under water stress, *Sapium sebiferum* seedlings were used as the experimental material in this study. PEG-6000 (polyethylene glycol) was used to simulate water stress, and the light response curves of the leaves were measured. Light response models were then used to fit and compare the differences in light response parameters under different PEG concentrations (CK, 5%, 10%, and 15%). The results showed that: (1) under the four concentration treatments, the net photosynthetic rate (P_n) of *Sapium sebiferum* leaves decreased with increasing photosynthetically active radiation (PAR) after reaching light saturation, indicating photoinhibition; (2) with increasing stress concentration, the apparent quantum efficiency (AQE) and maximum net photosynthetic rate (P_{nmax}) were highest in the CK treatment, whereas those in the other treatments gradually decreased as stress concentration increased; (3) when the PEG concentration was 10%, the light saturation point (LSP) reached its maximum, whereas the light compensation point (LCP) was at its minimum; and (4) fitting analysis of the light response curves of leaves of *Sapium sebiferum* seedlings showed that, among the four models, the modified rectangular hyperbola model performed best, whereas the rectangular hyperbola model performed worst. This study identifies the optimal light response model for simulating the photosynthetic characteristics of *Sapium sebiferum*

收稿日期:2025-05-24 修回日期:2025-07-21

第一作者简介:李卫华(1987-),硕士,助理研究员,研究方向为遗传育种。

and provides important theoretical support for its cultivation and water management.

Key words: Water stress; Photosynthesis; Transpiration; Light saturation point; Light response model

光合作用是绝大部分植物生长的前提,为植物发育提供所必需的营养物质。在光合作用中,水分是重要的原料,当供水量不能满足植物正常的生长时,就会造成水分胁迫^[1]。水分胁迫(特别是干旱)是植物生长发育的一大障碍^[2]。近年来,随着全球气候变迁,水分胁迫事件正在逐年增多,水资源短缺引起的植物缺水问题将成为制约陆地生态系统健康发展的关键要素^[3]。

植物遇到水分胁迫时,最明显的变化就是光合速率的降低。李丽霞等^[4]对不同干旱处理下沙棘光合作用进行研究发现,由于水分胁迫的加重光合速率渐次下降。张仟雨等^[5]研究发现,大豆的蒸腾速率、净光合速率在水分胁迫处理下均显著下降,水分利用效率增加。王春艳^[6]等研究发现,随着水分胁迫的加重,大豆叶片在轻度的水分胁迫下净光合速率值较提高。郭春芳等^[7]研究发现,水分胁迫导致植物的光饱和点等参数均有明显的下降,光补偿点升高。胡宏远等^[8]研究发现,水分胁迫处理下,赤霞珠葡萄的蒸腾速率、光合速率均有下降趋势。

光响应特征的测量与拟合是研究现代植物光合生理学的一种重要方法^[9],从中可以获得各种生理参数^[1]。这些参数(最大净光合速率、暗呼吸速率、表观量子效率、光补偿点等)对判断光合作用能力大小、光合作用机制及运转状况以及环境的改变对光合效率的影响具有重要作用^[10]。例如,最大净光合速率与净同化率都反映了植物对弱光照的利用效率。其中光饱和点是植物适应强光能力的体现^[25]。表观量子效率(AQE)可以反映植物在弱光下的光合能力^[18]。光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP),可反映出植物光合作用对强光和弱光的利用效率^[19]。因此,光响应特征是评价植物逆境生理的重要手段。

乌桕是中国热带区广泛分布的木本油料树种,属于多年生落叶乔木,兼有药用^[11]、材用、观赏的多用树种。近年来,有关乌桕的研究主要集中在栽培育种^[12]和油脂加工利用^[13]方面,对于乌桕水分胁迫下植物生理的研究较为缺乏^[14]。水分胁迫作为常见的植物胁迫状态,直接影响植物的光合作用进程^[3],因此,本试验以乌桕为研究对象,采用PEG-6000(聚乙二醇)模拟水分胁迫,探索不同水分胁迫下乌桕叶片光合作用的光响应过程,获取乌桕遭受水分胁迫影响的早期信号,筛选模拟乌桕光

合特性的最佳光响应模型,从而对乌桕栽培及水分管理提供理论价值。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验选取生长健壮,长势基本一致的乌桕一年生实生苗为供试材料。2024年4月在漯河市农业科学院试验基地将选好的苗木栽植于水培槽里面(水培槽规格为长90 cm,宽30 cm,高25 cm)。然后对所有实生苗进行正常浇水管理,对栽植的苗木在稳定的环境下进行实验室培养,温度控制在25℃左右。

在水培槽里面培养一个月,待苗木正常生长后,选择株形和大小基本一致的苗木作为试验材料。采用PEG-6000(聚乙二醇)做不同浓度处理。预实验将聚乙二醇最大浓度设置为30%,浓度依次往下递减,但出现了30%处理下,植株死亡和20%枯萎现象。所以本试验聚乙二醇浓度最大设置为15%,依次往下递减。最终PEG浓度分别设置为0%(CK),5%(T1),10%(T2),15%(T3),每个处理两个重复,进行模拟水分胁迫,持续控制2 d后开始进行光响应测定。

1.2 试验方法

(1)光合作用光响应过程测定。利用CI-340手持式光合仪(美国CID公司)对不同浓度聚乙二醇(0%,5%,10%,15%)处理下的材料,进行光响应过程测定。测定时间为上午的7:00-12:00时,选取每个水培槽中的1棵植株,再选取每个植株的枝条中部受光方向一致的3片生长健壮叶片进行测定,且测定前要先将乌桕叶片放在叶室内,调整光合有效辐射强度为 $2\ 000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,让叶片充分进行光适应,对测定过的叶片做好标记。经过预实验发现,光合有效辐射强度从高到低,测定速度要比从低往高快,所以将红蓝光源设置为 $2\ 000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $1\ 600\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $1\ 200\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $1\ 000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $800\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $600\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $400\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $300\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $200\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $160\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $120\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $80\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $40\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $0\ \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 共14个光合有效辐射强度,每次测定由光合仪自动录入数据,每个叶片的测定,重复测量3次,最终选取三次测定的平均值进行分析。

利用不同光合强度下的净光合速率,绘出乌柏叶片光合速率的光响应曲线,从曲线中估算乌柏光响应特征参数值,将获得的估算值作为光响应特征参数的实测值。采用传统弱光下(光合有效辐射强度(PAR) $\leq 200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) PAR 和 P_n 的线性回归方法,求出表观量子效率^[15],作为实测值与 4 个模型的拟合值进行对比分析。

(2) 光合作用光响应过程模拟。使用 Excel2016 进行数据的初步处理和绘图,并用 Spss 26.0 软件对乌柏光响应曲线和参数进行回归下非线性模型拟合,各模型的表达式如下。

直角双曲线的表达式^[23]:

$$P_n = \frac{\alpha I P_{nmax}}{\alpha I + P_{nmax}} - R_d \quad (1)$$

非直角双曲线的表达式^[24]:

$$P_n = \frac{\alpha I + P_{nmax} - \sqrt{(\alpha I + P_{nmax})^2 - 4I\alpha k P_{nmax}}}{2k} - R_d \quad (2)$$

直角双曲线修正模型的表达式^[25]:

$$P_n = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} I - R_d \quad (3)$$

指数模型表达式^[26]:

$$P_n = P_{nmax} (1 - e^{-\alpha I / P_{nmax}}) - R_d \quad (4)$$

表达式中: P_n 为净光合速率; α 为初始量子效率; P_{nmax} 为最大光合速率; R_d 为暗呼吸速率; I 为光合有效辐射强度(PAR); k 为曲角,反应光合曲线弯曲程度的凸度; β, γ 均为独立于 I 的系数。

(3) 光响应模拟评价。用相对误差(RE)对模型拟合值与实测值之间的符合度进行对比,RE 值愈小,则该模型的实测值与拟合值的偏差愈小,模拟效果越佳^[27]。

$$RE = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

式中, y_i 为光响应曲线参数实测值; \hat{y}_i 为光响应曲线参数拟合值; n 为样本容量。

2 结果分析

2.1 不同水分胁迫条件下乌柏幼苗叶片光响应特征

2.1.1 净光合速率的光响应特征 从图 1 整体来看,不同水分胁迫下乌柏幼苗叶片净光合速率的光响应过程,可以看出不同处理下乌柏幼苗叶片光合速率(P_n)的光响应曲线表现为先升后降的变化规律。从图中看出当 $PAR \leq 800 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 时,不同处理乌柏净光合速率的光响应变化规律基本一致, P_n 随 PAR 的增大而迅速升高,但当达到一定的光照强度后, P_n 随着 PAR 的增加呈下降的趋势,说明在强光作用下遭受了光抑制效应,抑制乌柏叶片光合速率的升高。

从曲线的变化来看,在水分胁迫处理下的乌柏幼苗叶片与 CK 存在着明显差别。具体表现为,在光强较低区域,CK 中的乌柏叶片 P_n 增长速度最快,幅度最大;T1、T2、T3 中的乌柏叶片 P_n 接近 CK,但是曲线总体上还是低于 CK。从乌柏叶片的最大净光合速率(P_{nmax})来看,对照组 CK, P_n 最高值为 $17.89 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 左右,当水分胁迫为 T1 时,乌柏 P_n 峰值大约为 $12.15 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 左右,当水分胁迫为 T2 时,乌柏 P_n 最高值为 $8.42 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 左右,当水分胁迫为 T3 时,乌柏 P_n 峰值大约为 $6.71 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 左右,可以看出水分胁迫 T1 到 T3,梯度变化明显, P_n 随胁迫加重而降低。

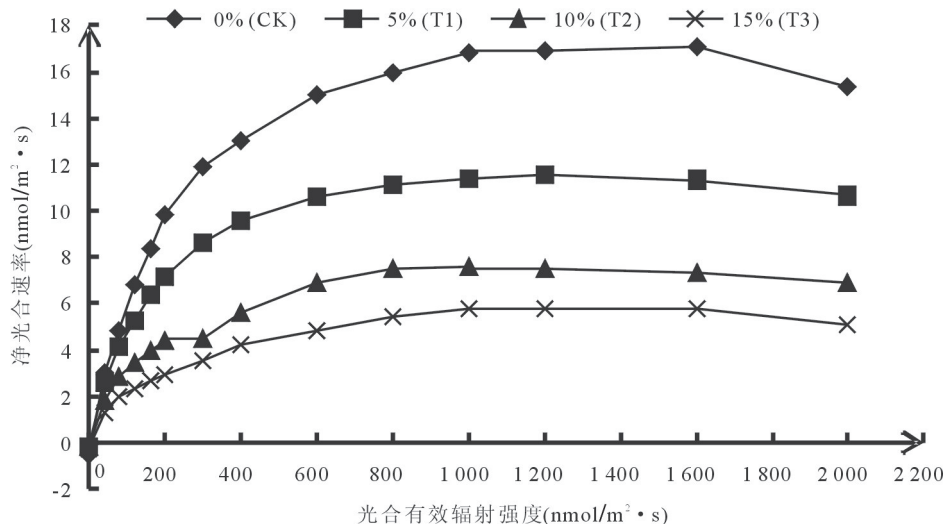


图 1 不同水分胁迫下乌柏幼苗光合速率的光响应曲线

2.1.2 光饱和点和光补偿点的光响应特征 一般来说,当植物处于光补偿点(LCP)时,植物不能积累营养物质,因此光补偿点的大小可作为判断植物在低光强下稳定生长的指标。图2表示乌桕叶片的LSP和LCP对水分胁迫处理下的光响应曲线对水分胁迫处理下的响应特征。从图2中可以看出,随着水分胁迫的加剧,乌桕叶片的LSP呈现先降后升再降低的趋势,LCP则是先降低后升高则呈先降低后升高的变化趋势。在水分胁迫梯度

为T3时,水分胁迫过于强烈,LSP数值降低,LCP会增大,并且高于对照组(CK),此时,LCP也处于最低值,这表明乌桕幼苗叶片在T2处理下,可以提高对光能的利用效率能力,促进光合作用进行。而在T3处理下,LSP最低而LCP较高,这表明乌桕幼苗叶片在强逆境环境中则削弱利用光的能力降低对高光强的利用,提升对弱光的利用效率,从而适应水分胁迫。

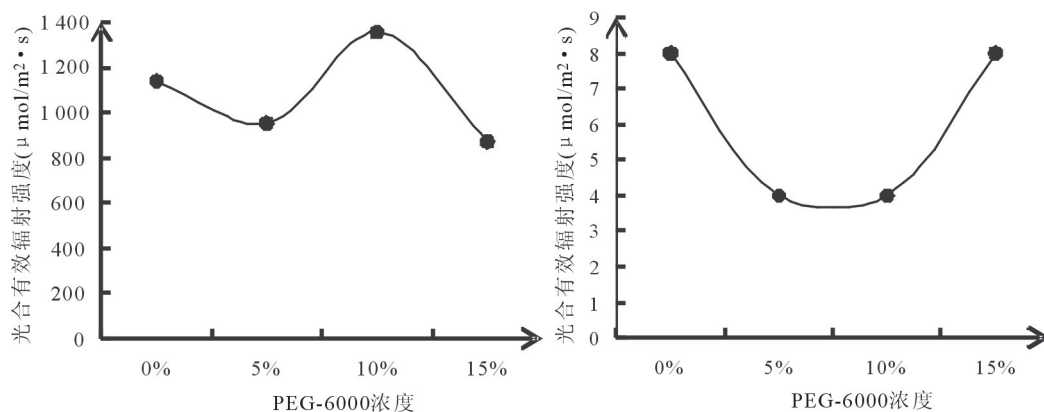


图2 乌桕幼苗光饱和点和光补偿点对水分胁迫的响应

2.1.3 蒸腾速率的光响应特征 从图3可以看出,乌桕叶片各水分胁迫处理下蒸腾速率(T_r)随着PAR的增加表现出和 P_n 相似的变化规律,四种处理均在 $PAR < 1600 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 的光强范围内,随着PAR的升高, T_r 上升速度较快;在 $PAR > 1600 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 之后, T_r 上升较慢。这说明随

着PAR的增加, T_r 先较快的上升,到达一定光强后, T_r 开始缓慢上升。其次不同水分胁迫乌桕 T_r 之间差异明显,随着水分胁迫的加剧,对照组CK的 T_r 最高,T3时的 T_r 最低,但二者均在光强达到饱和后呈现缓慢上升趋势,这表明过高或过低的水分胁迫程度都会导致乌桕 T_r 呈现上升趋势。

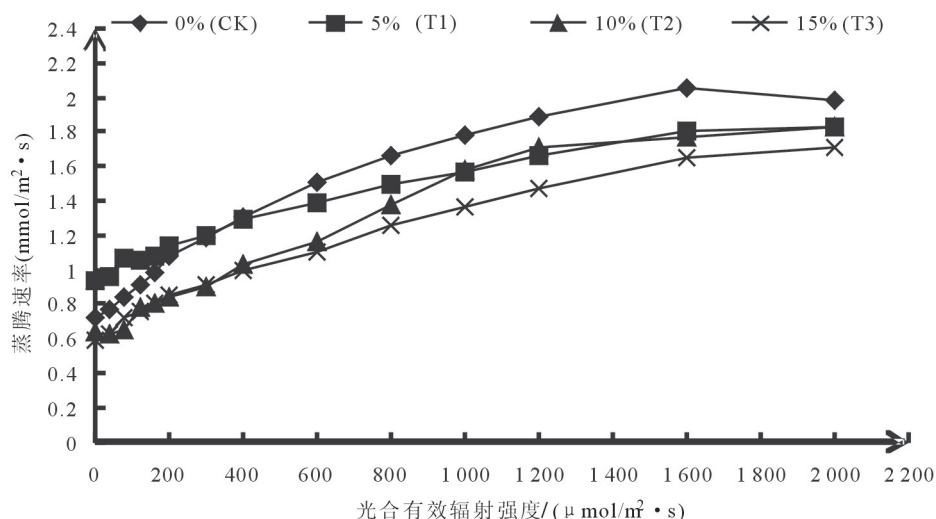


图3 不同水分胁迫条件下乌桕幼苗蒸腾速率的光响应曲线

2.1.4 水分利用效率的光响应特征 水分利用效率(WUE)是通过 P_n 和 T_r 之比求出,可以明确地了解植物生长需要的最佳水分利用效率^[16]。由图

4可以看出,WUE与水分胁迫程度和光合有效辐射强度关系密切。在不同水分胁迫条件下,WUE均表现出先升高后降低的变化趋势。各处理组

WUE 在 PAR 约为 $400 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 左右时达到最深, WUE 表现为 $T3 < T2 < T1 < \text{CK}$ 。大值, 之后出现下降趋势; 此外, 随胁迫程度的加

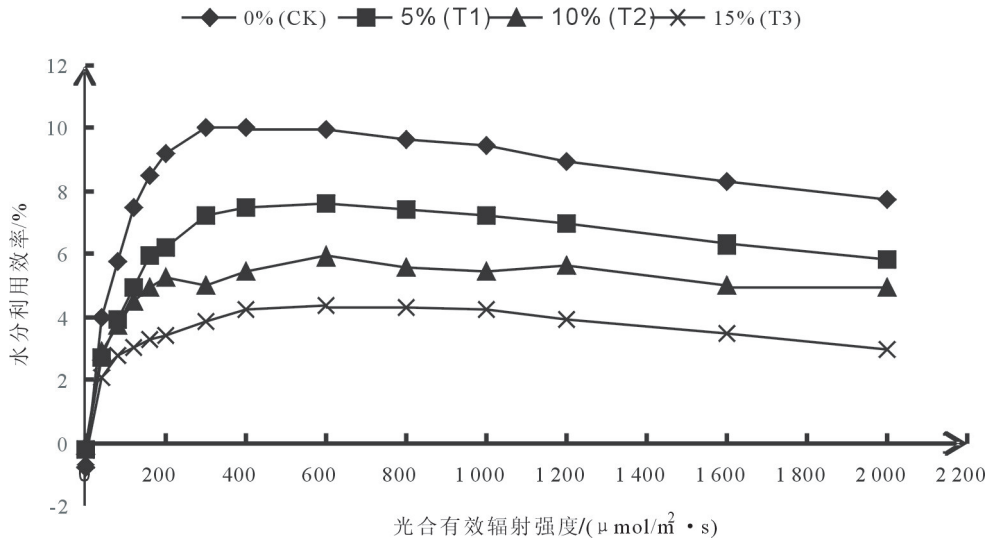


图 4 不同水分胁迫下乌桕幼苗水分利用效率的光响应曲线

2.2 不同水分胁迫条件下乌桕幼苗光响应模型的拟合

图 5 为不同水分胁迫下乌桕叶片使用光响应模型拟合的结果图, 从中看出 4 种模型均可以拟合出不同水分胁迫处理下乌桕叶片的光响应过程, 但是在 $\text{PAR} > 1200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 后, P_n 呈下降趋势,

说明在高光强时会出现光抑制现象, 对此现象, 在四种光响应模型中(图 5), 只有双曲线修正模型在较高光强下, 可以很好的拟合 P_n 下降趋势, 其它模型在 PAR 高时, 拟合点都比实测点要高, 不能够很好的拟合光饱和后 P_n 的变化趋势。

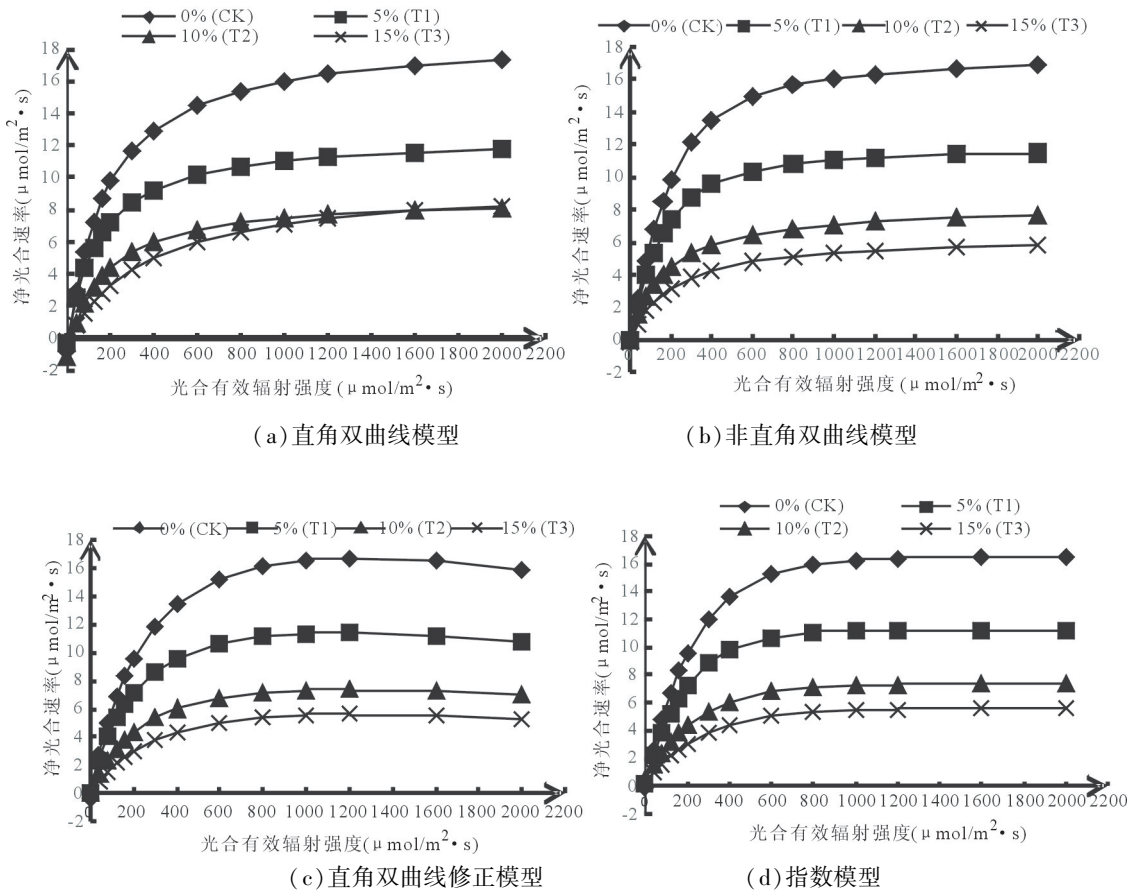


图 5 不同水分胁迫条件下乌桕光合速率光响应模拟

从4个模型拟合得到的表观量子效率值(AQE)(Φ)与实测值的接近程度来看,CK和T1处理下的双曲线修正模型拟合的AQE Φ 值与实测值最为接近。当水分胁迫为T2时,直角双曲线模型拟合的AQE Φ 值与实测值最为接近。当水分胁迫为T3时,非直角双曲线模型拟合的AQE Φ 值最接近实测值。在不同水分胁迫下,四种模型均可以拟合出AQE、 P_{nmax} 、LCP、 R_d ,双曲线修正模型可以拟合出LSP。

决定系数 R^2 可以用来评价模型的好坏,当 R^2 较为接近1时,说明模型具有较高的可用价值,在不同水分胁迫下双曲线修正模型拟合的相关系数要优于其它模型, R^2 均在0.98以上,且在相同处理下双曲线修正模型的 R^2 都高于其它三个模型,而在相同处理下直角双曲线模型的 R^2 都低于其它三个模型。

根据不同模型的拟合值与实测值之间的平均相对误差来看,在CK处理下直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型、指数模型的RE依次为0.47、0.38、0.24、0.36;在T1处理下光响应模型的RE依次为0.31、0.26、0.10、0.22;在T2处理下光响应模型的RE依次为0.48、0.32、0.27、0.34;在T3处理下光响应模型的RE依次为0.98、0.24、0.20、0.25。对比得出,4个模型拟合值与实测值在相同处理下相对误差均表现为直角双曲线修正模型偏差最小,而直角双曲线模型偏差最大。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 不同水分胁迫下对乌桕叶片光响应的影响

光合作用是绿色植物和藻类物质生产的基础,测定光响应曲线是研究光合能力的手段之一。王海珍等^[17]在干旱胁迫条件下研究胡杨的光响应时发现, P_n 在光饱和后有下降趋势,反观本试验通过对乌桕的光响应曲线的测定,4个水分胁迫处理下, P_n 均随着PAR增加而上升,达到一定光照强度后, P_n 有下降的趋势呈下降的趋势,这与说明在强光条件会导致植物光合速率的下降,这可能是遭受光抑制效应的影响。表观量子效率(AQE)可以反映植物在弱光下的光合能力,本试验中乌桕的AQE值随着水分胁迫的加剧逐渐减小(表1),AQE在0.089~0.045 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间,随着水分胁迫程

度的加剧,4个处理下乌桕的AQE明显降低,由此说明乌桕在水分胁迫下光合潜力明显受到抑制,这与吴丽君等^[18]的研究结果一致。利用光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP),可反映出植物光合作用对强光和弱光的利用效率。迟琳琳等^[19]在研究元宝枫、桃叶卫矛、糖槭时发现,三种乔木的LSP均表现为随着干旱胁迫加剧而降低。而在本试验中,在T2处理下表现出高LSP和低LCP的高光效利用特性的LSP,高于对照组CK的LSP,这可能是因为乌桕在适应逆境中的光合生理策略。暗呼吸速率(R_d)主要表征植物在缺乏光照条件下的呼吸速率,是植物对逆境胁迫的重要评价指标^[27]。在本研究中,不同处理 R_d 值随胁迫程度加深,先升高后降低,这表明乌桕幼苗叶片对于干旱胁迫具有一定的抗逆能力。

植物蒸腾速率(T_r)受各种外部环境因素和植物内部因素的共同影响,其中水分状况直接影响植物的 T_r ^[20],阎腾飞等^[21]在研究不同水分胁迫条件下信阳五月仙桃时发现,四个处理 T_r 均呈现急剧上升之后下降的趋势,在本试验中,四个处理 T_r 均呈现上升的趋势,这可能是因为在水分胁迫下,PAR增加,导致 T_r 也上升。相同处理下,WUE高的植物适应水分胁迫能力更强,生长潜力更高。董斌等^[22]研究油茶时发现,4个油茶品种在不同干旱胁迫下均表现出随着PAR的增加,呈下降趋势。本试验四个处理中,各处理组对照组CK的WUE达到的最大值,T3时WUE最低,两者的PAR均低于200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 强度左右时,随着PAR增加,WUE上升;在PAR约为400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 左右时,WUE达到最大值,之后开始出现下降趋势,并且随着胁迫程度的加深,水分利用效率明显下降,表明水分胁迫显著降低了乌桕幼苗的水分利用效率,这与郑岩^[26]等研究结果一致。

3.1.2 不同水分胁迫下乌桕光响应模型的拟合优度

本试验利用4种不同的光响应模型,对乌桕的光响应曲线进行了拟合。4种不同模型都能拟合出低光强下的表观量子效率(AQE),但当达到光饱和后,可能由于受到光抑制现象的影响,只有双曲线修正模型可以描述出在光饱和后, P_n 随着PAR的增加而下降的趋势。

本试验利用决定系数(R^2)和相对误差(RE)来评价乌桕光响应曲线与光响应模型的拟合效果,

四个处理下,双曲线修正模型拟合的 R^2 要优于其它模型, R^2 均在 0.98 以上,且在相同处理下双曲线修正模型的 R^2 也都高于其它三个模型,而在相同处理下直角双曲线模型的 R^2 低于其它三个模型。根据不同模型拟合值与实测值的 RE 来看,相同处理下 RE 均表现为直角双曲线修正模型偏差

最小,而直角双曲线模型偏差最大。直角双曲线修正模型自改进以来,就被广泛应用,张赞齐等^[23]研究无患子时,发现直角双曲线修正模型可以更好的拟合无患子的光响应曲线,还有刘子凡等^[24]对木薯研究时,也认为直角双曲线修正模型是最适合木薯的最优模型。

表 1 乌桕光合作用光响应参数实测值与拟合值

处理	光响应模型	表观量子效率 (mol/mo)	最大净光合速率 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	光饱和点 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	光补偿点 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	暗呼吸速率 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	决定系数
	实测值	0.089	17.89899	1140.00	8.00	-0.54	
CK	直角双曲线模型	0.1139	19.7417		7.58772	0.83	0.9856
	非直角双曲线模型	0.0701	17.8042		2.46572	0.17	0.9906
	直角双曲线修正模型	0.0844	16.7327	1226.9109	3.65496	0.304	0.9974
	指数模型	0.0723	16.48767		14.3513	1.01	0.993
	实测值	0.077	12.11054	952.00	4.00	-0.15	
T1	直角双曲线模型	0.0912	12.9149		3.3814	0.30	0.9875
	非直角双曲线模型	0.0578	11.9347		0.00	0.00	0.9919
	直角双曲线修正模型	0.0689	11.403965	1170.0876	-0.14375	-0.01095	0.999
	指数模型	0.0571	11.1942		17.97696	0.98799	0.9948
	实测值	0.069	10.53279	1356.00	4.00	-0.20	
T2	直角双曲线模型	0.0619	10		20.1328	1.12079	0.9511
	非直角双曲线模型	0.0502	8.34389		1.227	0.0611	0.9699
	直角双曲线修正模型	0.0386	7.41058	1242.71	-7.18768	-0.26574	0.98
	指数模型	0.0304	7.3501		33.07674	0.9408	0.9697
	实测值	0.045	6.71091	872.00	8.00	-0.27	
T3	直角双曲线模型	0.0269	10		7.4413	0.20196	0.7693
	非直角双曲线模型	0.0325	6.51076		2.75475	0.09881	0.9724
	直角双曲线修正模型	0.0237	5.65469	1251.5987	-8.4446	-0.1862	0.9834
	指数模型	0.0206	5.6034		51.0516	0.96576	0.9755

3.2 结论

(1)通过测定乌桕叶片在不同水分胁迫下的光响应变化趋势发现,乌桕叶片的净光合速率,在不同处理下 P_n 随着 PAR 的增加而急剧上升,当达到一定的光照强度, P_n 随 PAR 的增加呈现下降的趋势,这表明在强光条件下会抑制乌桕叶片光合速率的升高,主要是遭受光抑制效应的影响。随着胁迫程度的增加, LSP 和 LCP 在 T2 时, LSP 达到最

大,并且高于 CK, LCP 也处于最低值,对强光和弱光的利用能力较高;而在 T3 时,水分胁迫过于强烈, LSP 数值降低, LCP 会增大,此时对强光和弱光的利用能力下降。随着胁迫的加重,表观量子效率、最大净光合速率均表现为 CK 最好, T1-T3 渐次降低。这可能是因为乌桕在逆境中受到了一定的影响,乌桕叶片的光合机构受到了一定伤害,但自身可以通过生理调节来对付不良环境的变化,如

T3 处理下的乌桕依旧是可以正常生长,一定程度上可以说明乌桕具有一定的耐旱能力。

(2)本试验四个模型中,只有直角双曲线修正模型,可以模拟出乌桕在受到光抑制下的光响应过程。且4个模型的决定系数和相对误差表现为,直角双曲线修正模型的决定系数模型最大,相对误差最小;而直角双曲线模型的决定系数最低,误差最大。由此可得,在该试验中,直角双曲线修正模型拟合效果最佳,直角双曲线模型最差。

参 考 文 献:

- [1] 刘明,武建军,吕爱锋,等.黄淮海平原典型区冬小麦水分胁迫规律与灌溉策略[J].农业工程学报,2010,26(5):40-44.
- [2] HU J C, CAO W X, ZHANG J B, *et al.* Quantifying Responses of Winter Wheat Physiological Processes to Soil Water Stress for Use in Growth Simulation Modeling [J]. *Pedosphere*, 2004(4):509-518.
- [3] 申露婷.不同水分胁迫对大豆光合和叶绿素荧光的影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2021.
- [4] 李丽霞,梁宗锁,韩蕊莲.土壤干旱对沙棘苗木生长及水分利用的影响[J].西北植物学报,2002(2):88-94.
- [5] 张仟雨,李萍,宗毓铮,等.干旱对大豆生理及产量影响的研究[J].华北农学报,2016,3(5):140-145.
- [6] 王春艳,庞艳梅,李茂松,等.干旱胁迫对大豆气孔特征和光合参数的影响[J].中国农业科技导报,2013,15(1):109-115.
- [7] 郭春芳,孙云,张木清.土壤水分胁迫对茶树光合作用-光响应特性的影响[J].中国生态农业学报,2008(6):1413-1418.
- [8] 胡宏远,王振平.水分胁迫对赤霞珠葡萄光合特性的影响[J].节水灌溉,2016(2):6.
- [9] 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(6):771-775.
- [10] 叶子飘,王建林.植物光合-光响应模型比较分析[J].井冈山大学学报(自然科学版),2009,30(2):9-13.
- [11] 李冬林,黄栋,王瑾,等.乌桕研究综述[J].江苏林业科技,2009.
- [12] 魏永进.乌桕的繁育与栽培[J].湖南林业,2007(11):22.
- [13] 刘光斌,刘苑秋,黄长干,等.5种野生木本植物油性质及其制备生物柴油的研究[J].江西农业大学学报,2010,32(2):339-344.
- [14] 陈景震,李培旺,张良波,等.乌桕幼苗耐旱性研究[J].湖南林业科技,2013,40(3):3.
- [15] 李强,马龙,陈新明,等.泾惠渠灌区灌溉畦长对夏玉米生长发育和产量的影响[J].中国农村水利水电,2017(2):19-25.
- [16] 高玉.土壤水分胁迫对玫瑰木槿苗木光合作用特征的影响[D].泰安:山东农业大学,2021.
- [17] 王海珍,韩路,徐雅丽,等.干旱胁迫下胡杨光合光响应过程模拟与模型比较[J].生态学报,2017,37(7):2315-2324.
- [18] 吴丽君,李志辉,杨模华,等.干旱胁迫对赤皮青冈幼苗光合光响应特性的影响[J].湖北农业科学,2020,59(15):86-89.
- [19] 迟琳琳.干旱胁迫对科尔沁沙地3种乔木光响应特性的影响[J].防护林科技,2017(7):8-10.
- [20] 葛欢欢.不同灌溉量对老龄林胡杨光合生理特性的影响[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2019.
- [21] 阎腾飞,赵师成,张广波,等.不同土壤水分条件下信阳五月鲜桃光响应过程及其模拟[J].节水灌溉,2020(2):51-56.
- [22] 董斌,韦雪芬,蓝来娇,等.干旱胁迫对4个油茶品种光合特性的影响[J].经济林研究,2018,36(4):9-15.
- [23] 张赞齐,高世轮,卫星杓,等.光合模型对无患子叶片光合响应参数计算结果的影响[J].北京林业大学学报,2019,41(4):32-40.
- [24] 刘子凡,魏云霞,黄洁.木薯光合-光响应曲线的模型拟合比较[J].云南农业大学学报(自然科学),2018,33(4):611-616.
- [25] 周小玲,田大伦,许忠坤,等.中亚热带四川桉木与台湾桉木幼林的光合生态特性[J].中南林业科技大学学报,2007(1):40-49.
- [26] 郑岩,刘传林,赵红霞,等.山桃叶片光合生理参数对土壤水分的响应特征[J].山东林业科技,2023,268(5):29-35.
- [27] 林兵.塔里木河中游胡杨根孽幼苗和种萌幼苗的生理生态特性对比研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2011.