

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.032

# 不同灌溉定额下春小麦光合光响应特征研究

马莉<sup>1</sup> 王全九<sup>2,3</sup>

(1. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**摘要:** 为了探讨荒漠绿洲区春小麦在干旱环境下的适应机制, 测定了6个灌溉处理下春小麦的光合响应过程, 采用直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型和指数模型分别对春小麦光响应曲线进行了拟合比较, 筛选出最优模型, 并利用最优模型对不同灌溉处理下春小麦的光合特征参数进行了计算。试验结果表明, 随着灌溉量的增加, 小麦叶片光合性能呈增加趋势, 且灌浆前期大于灌浆后期; 经误差分析, 不同灌溉定额下4种模型的光响应曲线拟合结果存在差异, 直角双曲线模型、非直角双曲线模型和指数模型对高灌水处理的光响应曲线模拟精度高于低灌水处理; 直角双曲线修正模型对所有处理的模拟精度均最高, 是拟合荒漠绿洲区春小麦光响应曲线的最优模型; 光合参数显示, 420 mm灌溉定额处理下春小麦的最大光合速率、表观量子效率、光饱和点均高于其他灌溉处理, 而光补偿点则显著降低。荒漠绿洲区, 适当的灌溉定额有利于扩大春小麦光的适应范围, 提高光能利用能力, 增加产量。

**关键词:** 春小麦; 荒漠绿洲区; 灌溉定额; 光合特征; 光响应模型

**中图分类号:** S274.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0271-07

## Photosynthetic and Light Response Characteristics of Spring Wheat under Different Irrigation Schedules

MA Li<sup>1</sup> WANG Quanjiu<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to explore the adaptation mechanism of spring wheat in arid oasis region habitat, the photosynthetic response of spring wheat was investigated by six irrigation treatments. The four light response models was comparative analysis, including rectangular hyperbolae model, non-rectangular hyperbolae model, exponential model and correction model of rectangular hyperbolae model. Then the optimal model was selected and the photosynthetic characteristics parameters of spring wheat were calculated by the optimal model with different irrigation schedules. The results showed that the photosynthetic performance of wheat leaves was increased by the increase of irrigation quota, and the photosynthetic performance in early stage of filling was greater than the late stage of filling. There was significant difference between the four light response models in different irrigation quotas. The simulate values of higher irrigation treatments were more accurate than those of lower irrigation treatments by rectangular hyperbolae model, non-rectangular hyperbolae model and exponential model. The correction model of rectangular hyperbolae model had the maximum simulation accuracy by error tests. So it was optimal model to fit light response curves of spring wheat in desert oasis. The photosynthetic parameters showed that maximum net photosynthesis rate ( $P_{max}$ ), apparent quantum efficiency ( $Q$ ) and light

收稿日期: 2018-02-10 修回日期: 2018-03-13

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(5167090151)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1717)和宝鸡文理学院重点项目(ZK15054)

**作者简介:** 马莉(1982—),女,讲师,博士,主要从事农业水土工程研究,E-mail: mali4166@163.com

**通信作者:** 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与溶质运移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

saturation point ( $I_s$ ) of 420 mm treatment were higher than those of others, but the light compensation point ( $I_c$ ) was decreased significantly. Therefore, the appropriate irrigation treatments can expand the light adaption ranges of spring wheat, improve light energy utilization and promote the increase of yield in desert oasis.

**Key words:** spring wheat; desert oasis; irrigation schedule; photosynthetic characteristics; light response model

## 0 引言

光合能力的强弱决定作物生产力的大小,净光合速率是反映作物光合能力的重要指标<sup>[1]</sup>,其大小受到水分、温度、CO<sub>2</sub>浓度和光照强度等因素的影响<sup>[2-5]</sup>。为定量研究光合速率对光照强度的响应,前人建立了诸多光响应曲线模型,常用模型有二次多项式模型、直角双曲线模型、直角双曲线修正模型、非直角双曲线模型、暗呼吸模型和指数模型等<sup>[6-9]</sup>,这些模型对作物的最大光合速率、表观量子效率、光饱和点及光补偿点等相关生理参数能做出简单估算,但参数计算的准确性,取决于根据研究对象特点选取模型的准确性。因此,部分学者针对不同植物类型,如玉米、大豆、水稻、棉花、碧桃、豇豆、向日葵、毛竹、咖啡等进行了光响应曲线模型的研究<sup>[10-15]</sup>,但针对荒漠绿洲区干旱气候环境下,关于灌溉定额与春小麦光响应曲线的关系及模型的适用性研究报道较少。因此,本研究从不同灌溉定额角度,来分析灌浆期前后春小麦叶片光合作用及光响应特征,并选取直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型和指数模型4种常用的光响应曲线模型对不同灌溉条件下的春小麦光响应曲线进行拟合,比较4种模型的差异性,以确定不同灌溉定额下最优的春小麦光响应模型,并对相应的光响应参数进行计算,以期对荒漠绿洲区春小麦水分的高效利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

2011—2013年试验布设于中国科学院临泽内陆河流域研究站(39°20'N,100°08'E,海拔1382m),该站位于黑河中游,河西走廊中段,为典型的沙漠绿洲。气候为干旱荒漠气候,干旱高温和多风,多年平均降水量116.8mm,主要集中在7、8月,年蒸发量2390mm。年均气温7.6℃,最高气温39.1℃,年均风速为3.2m/s。耕作层土壤为砂壤土,平均砂砾含量为57.35%、粉粒含量26.30%、粘粒含量16.35%、容重1.58g/cm<sup>3</sup>、田间持水率20.14cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>、有机质质量比11.93g/kg。供试春小麦品种为“1068”,播种量为225kg/hm<sup>2</sup>。试验设置6个不同

灌溉定额 T1(60mm)、T2(75mm)、T3(90mm)、T4(105mm)、T5(120mm)和CK(0mm,无灌溉),分别在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期4个时期进行灌溉,每次灌水量相同,总灌溉量为240、300、360、420、480、0mm。每个处理设置3个重复,共设置18个小区,每个小区进行防水处理,面积为20m<sup>2</sup>。每个处理冬灌量为90mm,施肥量相同,定期除草和除病虫害。

### 1.2 测定内容与方法

在春小麦的灌浆前期和灌浆后期,采用Li-6400型便携式光合仪进行光响应曲线测定。选择晴朗的天气,观测时间为08:00—12:00,每个处理随机选取3株长势良好、上部完全展开的小麦叶片(旗叶)进行观测,每个叶片重复观测3次,取平均值。用Li-6400型便携式光合仪自带红蓝光源测定不同光合有效辐射(PAR)梯度下的小麦叶片净光合速率。光照范围设置14个光强梯度,依次为0、20、50、80、100、200、400、600、800、1000、1200、1400、1600、2000μmol/(m<sup>2</sup>·s),自动记录数据。通过光响应曲线的测定来确定最大光合速率、光饱和点、光补偿点、暗呼吸速率和表观量子效率等指标。采用冠层分析仪测定各生育期春小麦叶面积指数(LAI)。

### 1.3 光响应曲线模型

本文采用4种光响应曲线模型<sup>[16]</sup>进行模拟计算,利用SPSS 19.0中非线性回归分析对光响应数据进行拟合。

直角双曲线模型为

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

式中  $P_n$ ——净光合速率,μmol/(m<sup>2</sup>·s)

$I$ ——光量子通量密度,μmol/(m<sup>2</sup>·s)

$\alpha$ ——表观量子效率

$P_{\max}$ ——最大光和速率,μmol/(m<sup>2</sup>·s)

$R_d$ ——暗呼吸速率,μmol/(m<sup>2</sup>·s)

非直角双曲线模型为

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

式中  $\theta$ ——曲角

直角双曲线修正模型<sup>[17-18]</sup>为

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

其中

$$\gamma = \alpha / P_{\max}$$

式中  $\beta$ ——修正系数

$\gamma$ ——曲线弯曲度

如果  $\beta = 0$ , 式(3)变为直角双曲线模型。

指数模型为

$$P_n = P_{\max} (1 - C_0 e^{-\frac{\alpha I}{P_{\max}}}) \quad (4)$$

式中  $C_0$ ——度量弱光下净光合速率趋近于零的参数

分别采用决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 对模型进行精确性评价<sup>[13]</sup>, 表达式分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (5)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (7)$$

式中  $O_i$ ——观测值  $S_i$ ——模拟值

$\bar{O}_i$ ——观测值的平均值

$n$ ——样本数

其中,  $R^2$  越大, RMSE 和 MAE 越小, 则模拟值与实测值之间的误差越小, 模型的模拟结果越精确。

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据统计分析及模拟计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉定额对春小麦叶面积指数的变化特征

叶面积指数 (LAI) 是衡量作物光合有效辐射的

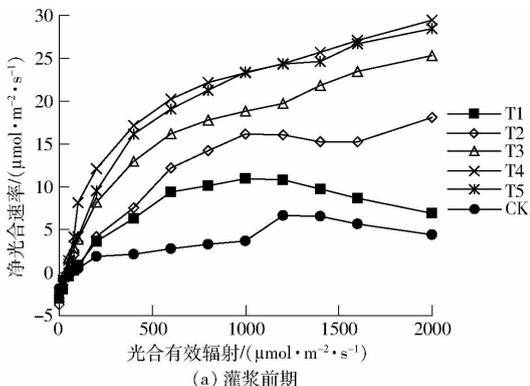


图 2 不同灌溉定额下灌浆前后期春小麦光响应曲线

Fig. 2 Light response curves in early and late stages of filling under different irrigation schedules

一个重要的空间变量<sup>[19]</sup>, 其大小变化直接影响作物的光合作用、蒸腾作用、水分利用效率及干物质累积等能力。由图 1 可知, 在不同灌溉定额下叶面积指数大小依次为 T5、T4、T3、T2、T1、CK。播种后的天数增加至灌浆前期 (85 d) 时叶面积指数达最大值, 而后呈下降趋势。对照 CK 处理下的春小麦叶片面积、植株高度、地上生物量明显小于其他灌溉处理, 且经显著性检验, T1 和 CK 与其他处理之间呈显著性差异。可见, 干旱胁迫对春小麦叶片生长具有抑制作用。

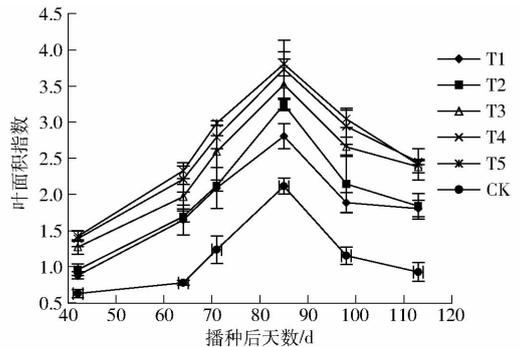
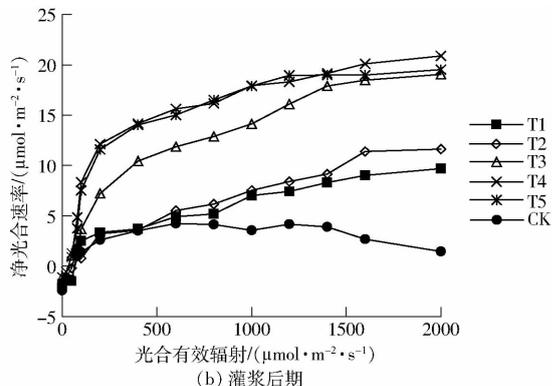


图 1 不同灌溉定额下春小麦叶面积指数变化曲线

Fig. 1 Changing curves of leaf area index of spring wheat under different irrigation schedules

### 2.2 不同灌溉定额下春小麦的光响应曲线变化特征

光响应曲线 (图 2) 表明, 在不同灌溉定额下春小麦净光合速率 ( $P_n$ ) 随着光合有效辐射的增大呈现迅速增大的趋势, 当光合有效辐射 PAR 值增大到一定水平后,  $P_n$  增速减缓, 最后趋于稳定。在春小麦灌浆前期和后期, 灌溉量小于 420 mm (T4) 的范围内, 随着灌溉定额和光合有效辐射的增加, 春小麦的净光合速率逐渐升高。当灌溉量达到 480 mm (T5) 时, 净光和速率反而小于 420 mm (T4) 处理。低灌溉处理和 CK 条件下, 在强光照射时, PAR 大于 1 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时就已经达到饱和, 而后出现了光抑制现象。可见, 在一定的灌溉范围内, 灌溉量的增加有利于提高春小麦叶片对光合有效辐射的响



应。随着生育期的推进,灌浆后期春小麦叶面积指数下降(图1),最大净光合速率逐渐降低,光合能力减弱。相同PAR值下,各处理的光合速率大小依次为T4、T3、T5、T2、T1、CK(图2),适当的灌溉量可以提高春小麦的叶面积指数,加快光合速率,提高春小麦生物量及产量。

### 2.3 4种模型对不同灌溉定额下春小麦光响应曲线的模拟

选取高(480 mm)、中(360 mm)、低(240 mm)3种灌溉处理,采用4种模型对春小麦灌浆前期的光响应曲线进行模拟比较,如图3所示。各模型拟合曲线在PAR小于200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,对低灌水

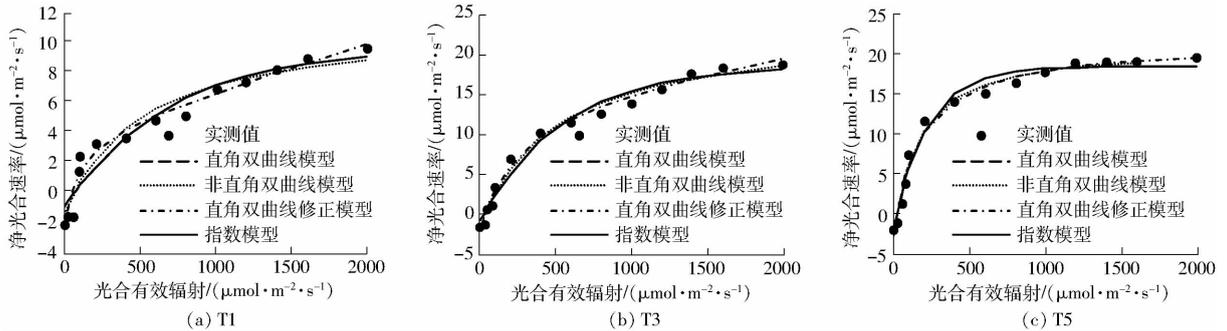


图3 4种模型对不同灌溉条件下春小麦光响应曲线的拟合比较

Fig.3 Simulation values of light response curves by four light response models

表1 4种模型对光响应曲线的模拟精度比较分析

Tab.1 Precision comparison of simulation values of light response curves by four light response models

灌溉处理	模型	RMSE/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	MAE/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$R^2$
T1	直角双曲线模型	0.91	0.79	0.94
	非直角双曲线模型	0.91	0.79	0.94
	直角双曲线修正模型	0.65	0.52	0.97
	指数模型	1.00	0.81	0.93
T3	直角双曲线模型	0.78	0.68	0.99
	非直角双曲线模型	0.77	0.68	0.99
	直角双曲线修正模型	0.65	0.58	0.99
	指数模型	0.99	0.86	0.98
T5	直角双曲线模型	0.85	0.68	0.99
	非直角双曲线模型	0.83	0.70	0.98
	直角双曲线修正模型	0.85	0.68	0.98
	指数模型	1.11	0.96	0.97

## 3 讨论

### 3.1 模型检验

采用RMSE、MAE和 $R^2$ 来判别模拟值和观测值之间的差异, RMSE、MAE越小、 $R^2$ 越接近于1,说明模型模拟结果精度越高,反之,则模拟精度越差。依据表1计算结果,直角双曲线模型和非直角双曲线模型、指数模型对高灌水处理下的春小麦光响应曲

处理(T1)的模拟差异性较大,在PAR大于600  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,对高灌水处理(T5)的模拟差异性较大。指数模型对T5净光合速率的拟合曲线在PAR大于1000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,曲线较实际趋于平缓。其他各模型的拟合曲线与实测曲线符合度较高,且对 $P_{\text{max}}$ 的模拟值均高于实测值。4种模型中直角双曲线修正模型对各灌溉处理下春小麦叶片光响应曲线的决定系数 $R^2$ 最大(表1),对净光合速率的拟合精度最高,公式中曲线弯曲度分别为: $\gamma_{T1}$ 为0.012,  $\gamma_{T3}$ 为0.004,  $\gamma_{T5}$ 为0.006, T5的曲线弯曲程度大于T3处理(图3),小麦的饱和光强依次为T3、T5、T1处理。

线模拟精度显著高于低灌水处理,这主要是因为直角双曲线模型、非直角双曲线模型和指数模型方程是一个单调递增的函数,所求得的 $P_n$ 随PAR增大而增大,可以方便地估算植物最大净光合速率、光补偿点和表观量子效率。但不能准确地描述强光下的光抑制和光饱和现象,而低灌溉处理下 $P_n$ 随PAR增强而减小的情况(图2),导致模型对T1(低灌水)的模拟精度较低。而直角双曲线修正模型对低灌溉处理(T1)的模拟结果精度高于其他模型。 $R^2$ 为0.97, RMSE为0.65  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , MAE为0.52  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,精度最差。直角双曲线模型和非直角双曲线模型对各灌溉处理下的春小麦光响应曲线模拟精度相当,而指数模型的模拟精度最低,直角双曲线修正模型模拟精度最优。综合各灌溉处理下春小麦叶片光响应曲线拟合精度的RMSE、MAE和 $R^2$ 的值,其中直角双曲线修正模型误差计算中 $R^2$ 最大,且RMSE和MAE值最小,模拟精度最高,其次是非直角双曲线模型和直角双曲线模型,而指数模型的 $R^2$ 最小,且RMSE和MAE最大,模拟精度最差(表1)。

### 3.2 直角双曲线修正模型对春小麦光响应曲线的拟合及特征参数计算

采用直角双曲线修正模型对6种灌溉定额下春

小麦净光合速率( $P_n$ )进行了模拟计算,并将模拟值与实测值进行比较,结果如图3所示。经误差计算分析,灌溉前期和灌溉后期模拟值与实测值之间的决定系数 $R^2$ 均为0.99,均方根误差RMSE分别为

0.63、0.72  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;平均绝对误差MAE分别为0.49、0.55  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。可见,模拟值与实测值之间的拟合度很好,直角双曲线修正模型可以用来模拟荒漠绿洲区不同灌溉定额下春小麦的净光合速率。

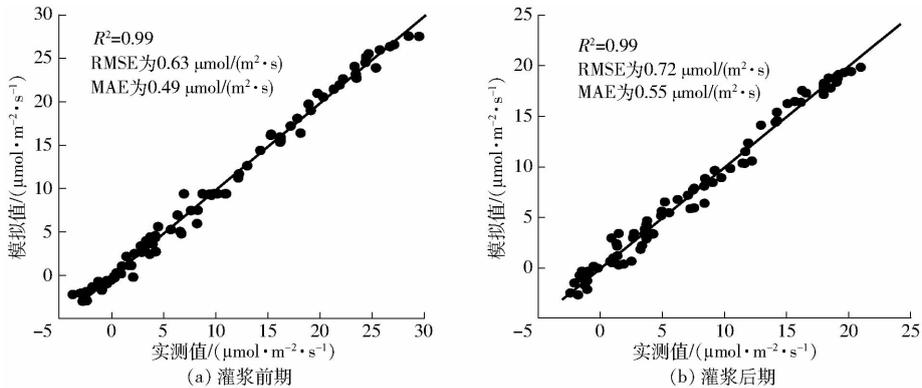


图4 直角双曲线修正模型对不同灌水定额下春小麦净光合速率的模拟值与实测值

Fig.4 Observed and simulated values of  $P_n$  by correction model of rectangular hyperbolae model under different irrigation schedules

光响应曲线数学模型用来计算最大光合速率 $P_{\text{max}}$ 、光补偿点 $I_c$ 、光饱和点 $I_s$ 、暗呼吸速率 $R_d$ 等反映作物生理意义的参数,被广泛地应用于作物生长及农业生产的研究中<sup>[20-21]</sup>。为了定量准确地对比分析不同灌溉定额对春小麦光合作用的影响,依据直角双曲线修正模型的模拟结果,计算了各处理下春小麦的 $P_{\text{max}}$ 、 $I_c$ 、 $I_s$ 、 $R_d$ 等光合特征参数(表2)。在不同的灌溉定额下, $P_{\text{max}}$ 、 $I_c$ 、 $I_s$ 和 $R_d$ 具有显著性差异。其中, $P_{\text{max}}$ 变化范围为4.2~32.0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。灌浆前期,T4处理下的 $P_{\text{max}}$ 最大,比CK提高了79%,比T1、T2、T3、T5分别提高了56%、46%、23%和6%。灌浆后期,T4处理下的 $P_{\text{max}}$ 最大,为23.4  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,比T1、T2、T3、T5和CK分别提高了82%、56%、47%、26%和0.4%,T4和T5处理

下的光饱和点达到了最大值,在一定程度上反映了在干旱区,灌溉量高的情况下春小麦对强光适应性较强。由于灌浆前期春小麦叶面积指数达到最大值,光合速率加强,导致最大光合速率( $P_{\text{max}}$ )、暗呼吸速率( $R_d$ )、光饱和点、光补偿点呈现灌浆前期大于灌浆后期,到灌浆后期,随着叶片的凋萎,光合速率减小,但春小麦叶片对光能的利用效率增大。 $I_s$ 是作物生长的重要生理指标之一,当PAR超过 $I_s$ 时,作物产生光抑制,导致作物产量下降。各处理中T4的光补偿点( $I_c$ )最小为6.90  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光饱和点达到了2390  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光适应范围增大,而表观量子效率 $\alpha$ 灌浆前后均最大,分别为0.150、0.152。由此说明,T4灌溉处理下,春小麦对光的适应能力和有效辐射利用率均大于其他处理。

表2 不同灌溉定额下春小麦光响应曲线参数

Tab.2 Light response parameters of spring wheat under different irrigation schedules

处理	表观量子效率 $\alpha$	最大光合速率 $P_{\text{max}}/$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	光补偿点 $I_c/$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	光饱和点 $I_s/$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	暗呼吸速率 $R_d/$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	决定系数 $R^2$	
灌浆前期	T1	0.039	13.9	27.60	1575	2.66	0.996
	T2	0.047	17.4	22.60	1692	2.73	0.983
	T3	0.092	24.8	11.30	2122	2.42	0.988
	T4	0.150	32.0	6.90	2390	3.38	0.996
	T5	0.098	30.0	10.52	2270	3.02	0.995
	CK	0.016	6.7	73.52	1121	0.59	0.926
灌浆后期	T1	0.051	10.2	21.74	1242	1.50	0.971
	T2	0.062	12.4	17.54	1304	1.86	0.986
	T3	0.069	17.3	15.38	1483	1.75	0.992
	T4	0.152	23.4	6.87	1607	2.38	0.981
	T5	0.140	23.3	7.46	1881	2.77	0.988
	CK	0.021	4.2	62.50	972	0.42	0.963

## 4 结论

(1)不同灌溉处理下,春小麦叶面积指数在灌浆前期达到最大值,而后叶片开始衰退,叶面积指数减小,导致其光合速率也是灌浆前期大于后期;春小麦叶面积指数由大到小依次为 T5、T4、T3、T2、T1、CK,光合速率由大到小依次为 T4、T3、T5、T2、T1、CK。

(2)经过对直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型和指数模型4种常用模型模拟与比较,结果表明,直角双曲线模型和非直角双曲线模型、指数模型对高灌水处理下的春小麦光响

应曲线模拟精度显著高于低灌水处理。直角双曲线修正模型拟合得出的光响应曲线精度更高,更接近于春小麦实际的光合特征,是适合荒漠绿洲区春小麦生长的最优光响应模型。

(3)在干旱的荒漠绿洲区,灌溉定额的增加,可以减缓光抑制现象的发生,增强小麦对强光的适应性。其中,T4处理下春小麦的光补偿点最低,而其光饱和点在灌浆前期最高,灌浆后期由于叶片衰退,其光饱和点仅低于T5处理,光适应范围最强。因此,适当的灌溉量可增加春小麦对光的适应能力和有效辐射利用率,提高作物的光物质积累量,实现小麦增产。

## 参 考 文 献

- 1 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002:20-23.
- 2 CAO Y H, ZHOU B Z, WANG X M, et al. The photosynthetic characteristics of Moso Bamboo for different canopy leaves[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 726-731:4274-4279.
- 3 WATARU Y, KOUKI H, DANIELLE A. Way temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation [J]. *Photosynth Research*,2014,119:101-117.
- 4 于颖颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. *生态学报*,2015,35(9):2902-2909.  
YU W Y, JI R P, FENG R, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2015,35(9):2902-2909. (in Chinese)
- 5 QING Q W, YANG L, SHENG Z F, et al. Photosynthetic response of poplar leaves at different developmental phases to environmental factors[J]. *Journal Forest Reseache*,2017,28(5):909-915.
- 6 封焕英,范少辉,苏文会. 不同经营方式下毛竹光合特性分异研究[J]. *生态学报*,2017,37(7):1-8.  
FENG H Y, FAN S H, SU W H. Photosynthetic characteristics of *Phyllostachys edulis* under different management modes[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2017,37(7):1-8. (in Chinese)
- 7 韩刚,赵忠. 不同土壤水分下4种沙生灌木的光合光响应特性[J]. *生态学报*,2010,30(15):4019-4026.  
HAN G, ZHAO Z. Light response characteristics of photosynthesis of four xerophilous shrubs under different soil moistures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,30(15):4019-4026. (in Chinese)
- 8 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 X W, MAO Z J. Practicability of 7 light responsive curve models to different plant species[J]. *Bulletin of Botanical Research*,2009,29(1):43-48. (in Chinese)
- 9 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.  
WANG S, HAN X R, ZHAN X M, et al. The comparative study on fitting light response curve model of photosynthesis of maize under different nitrogen fertilizer levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,2014,20(6):1403-1412. (in Chinese)
- 10 闫小红,尹建华,段世华. 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 X H, YIN J H, DUAN S H. Photosynthesis light response curves of four rice varieties and model fitting[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2013,32(3):604-610. (in Chinese)
- 11 张玲玲. 5种植物光响应曲线最适拟合模型筛选[J]. *西南林业大学学报*,2017,37(1):20-25.  
ZHANG L L. light response curves of five plants and screening the optimal model[J]. *Journal of Southeast Forestry University*, 2017,37(1):20-25. (in Chinese)
- 12 刘强,李凤日. 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.  
LIU Q, LI F R. Optimal model of photosynthesis-light response curve in canopy of planted *Larix olgensis* tree[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2016, 27(8):2420-2428. (in Chinese)
- 13 李发永,劳东青,孙三民,等. 滴灌对间作枣棉光合特性与水分利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(12):119-129. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161216&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161216&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.016.  
LI F Y, LAO D Q, SUN S M, et al. Effects of drip irrigation on photosynthetic characteristics and water use efficiency of iujube-cotton intercropping system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(12):119-129. (in Chinese)

- 14 ADUGNA D B, ZEWDNEH Z, FIKRE L, et al. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation level and rate of nitrogen supply II. Uptake and distribution of nitrogen, leaf photosynthesis and first bean yields [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 92:107–114.
  - 15 倪霞,曹永慧,周本智,等. 干旱处理对毛竹光响应的影响:基于4种模型比较分析[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3):465–471.  
NI X, CAO Y H, ZHOU B Z, et al. Light response of phyllostachys edulis under drought stress: based on 4 models [J]. *Forest Research*, 2017, 30(3):465–471. (in Chinese)
  - 16 王全九,付秋萍,马莉,等. 旱区小麦生长与水肥调控[M]. 北京:科学出版社, 2017:58–112.
  - 17 YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(4):637–640.
  - 18 YE Z P, YU Q. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat [J]. *Photosynthetica*, 2008, 46(4):637–640.
  - 19 王希群,马履一,贾忠奎,等. 叶面积指数研究和应用进展[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(5):534–541.  
WANG X Q, MA L Y, JIA Z K, et al. Research and application advances in leaf area index(LAI) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5):534–541. (in Chinese)
  - 20 叶子飘. 光合作用对光和 CO<sub>2</sub> 响应模型的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6):727–740.  
YE Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO<sub>2</sub> [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6):727–740. (in Chinese)
  - 21 叶子飘,康华靖. 植物光响应修正模型中系数的生物学意义研究[J]. *扬州大学学报:农业与生命科学版*, 2012, 32(2):51–57.  
YE Z P, KANG H J. Study on biological significance of coefficients in modified model of photosynthesis irradiance [J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2012, 32(2):51–57. (in Chinese)
- 

(上接第 253 页)

- 16 JAIMES A, KOTA S, GOMEZ J. An approach to surveillance an area using swarm of fixed wing and quad-rotor unmanned aerial vehicles UAV(s) [C] // *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, 2008:1–6.
- 17 MATIC G, JANKOVEC M, JURMAN D, et al. Feasibility study of attitude determination for all-rotating unmanned aerial vehicles in steady flight [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, 80(2):341–360.
- 18 SCHLIPF D, GRAU P, RAACH S, et al. Comparison of linear and nonlinear model predictive control of wind turbines using LIDAR [C] // *American Control Conference, IEEE*, 2012:3050–3055.
- 19 LARRABEE T, CHAO H, RHUDY M, et al. Wind field estimation in UAV formation flight [C] // *American Control Conference, IEEE*, 2014:5408–5413.
- 20 SHAO P, WU C, MA S, et al. Research on key problems in assigned-point recovery of UAV using parachute [C] // *Tencon 2013—2013 IEEE Region 10 Conference, IEEE*, 2014:1–4.
- 21 NO H, CHO A, KEE C. Attitude estimation method for small UAV under accelerative environment [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3):343–355.
- 22 ZHANG X, XIAN B, ZHAO B, et al. Autonomous flight control of a Nano quadrotor helicopter in a GPS-Denied environment using on-board vision [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(10):6392–6403.
- 23 STOLLE S, RYSDYK R. Flight path following guidance for unmanned air vehicles with pan-tilt camera for target observation [C] // *IEEE Digital Avionics Systems Conference, Dasc'03*, 2003, 2:8. B. 3–81–12.
- 24 PAN C J, GUO Y Q. Design and simulation of ex-range gliding wing of high altitude air-launched autonomous underwater vehicles based on Simulink [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(2):319–325.