

唐玉瑞, 齐月, 王鹤龄, 等. 干旱胁迫下春玉米七叶期光合特性及其响应机理[J]. 干旱气象, 2025, 43(2): 176-185, [TANG Yurui, QI Yue, WANG Heling, et al. Photosynthetic characteristics and response mechanism of spring maize at seven-leaf stage under drought stress[J]. Journal of Arid Meteorology, 2025, 43(2): 176-185], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639-2025-02-0176

## 干旱胁迫下春玉米七叶期光合特性及其响应机理

唐玉瑞<sup>1,2,3,4</sup>, 齐月<sup>1,2,3,4</sup>, 王鹤龄<sup>1,2,3,4</sup>, 杨阳<sup>1,2,3,4</sup>, 赵鸿<sup>1,2,3,4</sup>,  
张凯<sup>1,2,3,4</sup>, 魏星星<sup>1,2,3,4</sup>, 王仁奎<sup>5</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国气象局定西干旱气象与生态环境野外科学试验基地, 甘肃 定西 743000; 3. 中国气象局武威国家气候观象台, 甘肃 武威 733000; 4. 中国气象局张掖国家气候观象台, 甘肃 张掖 734000; 5. 甘肃省靖远县气象局, 甘肃 靖远 730600)

**摘要:** 干旱胁迫是限制作物生长的主要因素, 研究春玉米 (*Zea mays* L.) 苗期光合特性与生理抗旱机制, 对有效抗御干旱、促进作物产量形成等方面具有重要意义。以春玉米为研究对象, 采用盆栽试验, 设置对照处理 (简称“CK”处理)、轻度干旱 (T1)、中度干旱 (T2)、重度干旱 (T3) 4种梯度, 研究不同干旱程度下春玉米七叶期叶片的光合生理特征及其抗旱机制。结果表明: 干旱显著降低了春玉米叶片的净光合速率 ( $P_n$ ) 及最大净光合速率 ( $P_{nmax}$ ); 光响应曲线的初始斜率 ( $\alpha_0$ )、暗呼吸速率 ( $R_d$ )、表观量子效率 (Apparent Quantum Efficiency, AQE) 在中度、重度干旱处理下显著下降, 光饱和系数 ( $\gamma_0$ ) 显著增加, 叶片的光能利用率显著下降; 蒸腾速率 ( $T_r$ ) 随着干旱胁迫的加剧逐渐降低, 水分利用效率 (Water Use Efficiency, WUE) 在中度干旱处理下显著增加, 重度干旱下显著降低; 气孔导度 ( $G_s$ ) 随着干旱胁迫的加剧逐渐下降, 轻度、中度干旱处理下净光合速率下降的因素以气孔限制为主, 轻度干旱下存在气孔非均匀关闭现象, 重度干旱下胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 显著上升, 气孔限制值 ( $L_s$ ) 显著降低, 以非气孔限制为主导因素。

**关键词:** 干旱胁迫; 气体交换参数; 水分利用效率; 响应

文章编号: 1006-7639(2025)02-0176-10 DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639-2025-02-0176

中图分类号: P49

文献标志码: A

## 0 引言

光合作用是地球生态系统一切生命活动的能量来源, 也是作物产量形成的生理基础, 其对环境变化十分敏感 (卜令铎等, 2010; 李建查等, 2018)。作为植物最常见的生长逆境, 干旱是抑制玉米生长和光合作用下降的重要原因 (张仁和等, 2011), 限制着植物的光能利用率, 甚至造成叶片结构的损伤 (Mukarram et al., 2021), 最终导致植物生物量及产量的下降 (Jia et al., 2020)。叶片光合作用对光的响应曲线是研究作物光合作用对环境变化响应的重

要手段 (李义博等, 2017), 可反映植物对不同光强的利用规律, 并指示植物的生长情况及其抗逆性。通常以气孔导度、净光合速率、蒸腾速率及水分利用效率等指标来表征作物的光合特性 (于文颖等, 2015)。气孔不仅是水分和光合原料进入细胞的关键通道, 在干旱感知和信号传导过程中也发挥着不可或缺的作用 (Laxa et al., 2019)。Hetherington 和 Woodward (2003) 研究指出, 气孔面积仅占叶片面积的 5%, 但经由气孔蒸发的水分却高达 70%。由此可见, 气孔调节作为植物抵御胁迫环境的核心机制, 对于维持植物体内水分平衡、保障光合作用正常进

收稿日期: 2024-11-19; 改回日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42175192)、甘肃省科技计划项目 (24YFFA052)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J056)、甘肃省气象局青年基金项目 (ZcQn2025-D-36)、甘肃省自然科学基金项目 (23JRRJ0005)、干旱气象科学研究基金项目 (IAM202307、IAM202315)、兰州干旱气象研究所科研启动项目 (KYS2023SSKY03) 和陇原青年创新创业人才项目 (2024QNGR33) 共同资助

作者简介: 唐玉瑞 (1997—), 女, 甘肃靖远人, 研究实习员, 主要从事作物干旱致灾机理研究。E-mail: 2959869008@qq.com。

通信作者: 齐月 (1988—), 女, 山东章丘人, 副研究员, 主要从事气候变化对农业影响研究。E-mail: goodqiyue@163.com。

行意义重大。气孔导度作为衡量气孔变化特征的重要指标,其大小直接影响叶片中 $\text{CO}_2$ 的交换速率和水分的蒸腾速率(龚容和高琼,2015)。适度水分亏缺下叶片可通过改变气孔的形态和气孔导度的大小来控制叶片内部 $\text{CO}_2$ 浓度和蒸腾速率,协调碳同化和水分消耗之间的关系(Ennahli and Earl, 2005),同时影响叶片水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE),最终形成高效的抗旱策略以适应干旱环境(李民青等,2023),随着干旱条件的进一步发展,作物生产可能出现环境约束向生理生态约束的转变,植物气孔可能关闭,导致叶绿体结构的变化和对植物膜系统的损害,因而阐明光合速率下降的生理机制对于准确识别作物干旱程度和制定对策至关重要(Song et al., 2020)。

植物光合作用主要受气孔和非气孔因素影响(Jia et al., 2020),前者指干旱胁迫导致的气孔导度降低, $\text{CO}_2$ 进入叶片的通道受阻而使光合速率下降(Song et al., 2020),后者主要是叶肉细胞电子传递和光合磷酸化受阻,暗反应中相关酶活性降低,导致光合速率下降(Farquhar and Sharkey, 1982)。宋丰萍和蒙祖庆(2018)研究表明,随着干旱胁迫的逐步加剧、持续时间不断延长,气孔和非气孔因素往往会同时对植物光合作用产生影响,在这一过程中,非气孔因素最终会成为主导限制因子。基于此,麻雪艳和周广胜(2018)提出,气孔限制向非气孔限制的转折点,可作为判定玉米是否受到严重干旱胁迫的重要依据。

干旱是农作物生长的主要制约因素之一(Lobell et al., 2014),玉米作为中国种植范围最广的谷类作物,在农业及国民经济中占据着重要地位(宋贺等,2019)。全球气候变化背景下水热格局的改变,加剧了干旱等非生物胁迫因子对作物生长和产量的限制作用(李建查等,2018)。近年来,光照、水分胁迫等环境因子对作物光合生理特征的影响得到了广泛关注(张仁和等,2011;Sharma and Zheng, 2019;姜鹏等,2023),不同强度干旱过程对玉米生长发育、光合生理的影响也有较多研究,主要集中在拔节期和抽雄期(于文颖等,2015;宋贺等,2019;杨阳等,2022)。萌发期和苗期(前期干旱)是春玉米干旱发生频率最高的阶段(任宗悦等,2020),特别是玉米营养生长阶段的七叶期(齐月等,2023),此时遭遇干旱会严重抑制春玉米的生长发育(卜令铎等,2010;Song et al., 2019)。然而,目前针对干旱胁迫下春玉米七叶期的光合响应特征及其影响机理的研究尚显不足,因此本文通过研究春玉米七叶

期光合参数变化特征及其对干旱的响应,试图明晰不同干旱程度下春玉米七叶期的叶片生理抗旱机制,以期为农业生产过程中春玉米生长前期的水分管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验在中国气象局定西干旱气象与生态环境野外科学试验基地( $104^{\circ}37'E, 35^{\circ}35'N$ )开展,位于定西市安定区,属于黄土高原半干旱区,海拔1896.7 m,年日照时数2433.0 h,年太阳总辐射量为5923.8  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,年平均气温 $6.7^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量386.0 mm,降水主要集中在6—8月,该地区降水少且变率大,为典型的雨养农业区。试验地土壤为黄绵土,肥力中等,土质疏松,易发生干旱等农业灾害。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为“峰单189号”,于2022年4月30日播种。采用盆栽试验法,盆内径29 cm、高45 cm。采集大田0~30 cm表层土,风干后过筛装盆(每盆装土14 kg),田间持水量为25.5%,每桶内播3~4粒,三叶初期定苗,保留一株。试验设计4个水分梯度,以对照处理(简称“CK”处理)为基准,整个生育期内通过充足灌水,将土壤相对湿度稳定维持在75.0%左右。在玉米七叶期之前,4个梯度水分管理方式保持一致,均采用相同的灌溉策略。自七叶期开始,各梯度开始差异化控水:轻度干旱处理(简称“T1”处理),土壤相对湿度需控制在50.0%~55.0%;中度干旱处理(简称“T2”处理),土壤相对湿度保持在40.0%~45.0%;重度干旱处理(简称“T3”处理),土壤相对湿度保持在30.0%~35.0%。每个处理10组重复,确保试验数据的可靠性。此外,所有处理田间管理措施,包括施肥、病虫害防治、除草等,均严格保持一致(齐月等,2023),从而最大程度排除其他因素对试验结果的干扰,保障试验数据的准确性与科学性。

### 1.3 测定内容与方法

#### 1.3.1 测定内容

于5月30日春玉米七叶期开始时进行控水(即播种后第30天),随后开展各项观测工作。每天定时观测土壤水分、光合生理参数及叶水势等指标,直至植株萎蔫死亡,试验结束。在整个试验时段内,每日06:00和10:00采集第一片完全展开叶,使用WP4露点水势仪测定叶水势,每个处理设置3次重复(张健等,2019)。在试验时段内,为确保测量

数据的准确性与稳定性,选定每天上午 09:00—11:00,利用 Li-6400XT 光合测量系统(LI-COR, Lincoln, USA)测定春玉米叶片的光合生理指标。选取玉米顶部第一片展开叶为测量对象,测量时指定使用人工红蓝光源,CO<sub>2</sub>浓度采用小钢瓶控制,样品室浓度设置为 400 μmol·mol<sup>-1</sup>,叶室温度设置为 25 °C,在 1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>的光强下充分诱导,待光合参数稳定后,利用自动测量程序进行测量,光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)梯度设定为 2 400、2 100、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、75、50、25、0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,每个处理 3 次重复。测定内容包括:净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间 CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )、气孔导度( $G_s$ ),并计算气孔限制值( $L_s$ )(Farquhar and Sharkey, 1982)和瞬时水分利用效率(WUE),具体公式如下:

$$L_s = 1 - \frac{C_i}{C_a} \quad (1)$$

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \quad (2)$$

式中: $C_i$ 为胞间 CO<sub>2</sub>浓度, $C_a$ 为大气中 CO<sub>2</sub>浓度,单位均为:μmol·mol<sup>-1</sup>; $P_n$ 为净光合速率,单位:μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $T_r$ 为蒸腾速率,单位:mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

### 1.3.2 光响应模型

$P_n$ 、WUE、 $G_s$ 、 $L_s$ 对光的响应模型分别为:

$$P_n = \alpha_0 \frac{1 - \beta_0 I}{1 + \gamma_0 I} I - R_d \quad (3)$$

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} = \alpha_1 \frac{1 - \beta_1 I}{1 + \gamma_1 I} I - \frac{R_d}{T_r} \quad (4)$$

$$G_s = \alpha_2 \frac{1 - \beta_2 I}{1 + \gamma_2 I} I + G_{s0} \quad (5)$$

$$L_s = \alpha_3 \frac{1 - \beta_3 I}{1 + \gamma_3 I} I + L_{s0} \quad (6)$$

式中: $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 为对应光响应曲线的初始斜率, $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 为对应曲线的光抑制系数, $\gamma_0$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 为对应曲线的光饱和系数; $I$ 为光合有效辐射,单位:μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $R_d$ 为暗呼吸速率,单位:μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $G_{s0}$ 是光强为 0 时的气孔导度,单位:mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $L_{s0}$ 是光强为 0 时的气孔限制值。

通过光响应模型计算得到表观量子效率(Apparent Quantum Efficiency, AQE)、最大净光合速率( $P_{nmax}$ )及其光饱和点( $I_{sat}$ )、最大瞬时水分利用效率(WUE<sub>max</sub>)及其光饱和点(WUE<sub>- $I_{sat}$</sub> )、最大气孔导度( $G_{smax}$ )及其光饱和点( $G_{s-I_{sat}}$ ),具体计算方法参考 Ye 等(2020);最大气孔限制值( $L_{smax}$ )及其光饱和点( $L_{s-I_{sat}}$ )的计算方法参考叶子飘等(2019)文献。使用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验各参数在不

同处理间的差异性( $P < 0.05$ ),图表中数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫下春玉米净光合速率的光响应特征

植物净光合速率对光的响应( $P_n$ -PAR)曲线可反映一定光照强度下植物潜在的光合能力。由图 1 可见,不同处理下其响应曲线具有显著差异。随着干旱程度的增加,叶片  $P_n$  随光强增加呈显著降低趋势,光强越强,差异越大。两条光曲线之间的闭合区域面积,反映出两者在光环境响应过程中的具体差异,在土壤水分逐渐递减的过程中,由 T1 处理向 T2 处理变化的过程中其净光合速率的减小幅度最大。CK 处理玉米叶片在 PAR 为 2 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 左右时达到饱和状态,T1 和 T2 处理分别在 1 800 和 1 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 左右时达到光饱和点,而 T3 处理下植物叶片  $P_n$  接近零,光饱和点较小,植物趋近于死亡状态(表 1)。

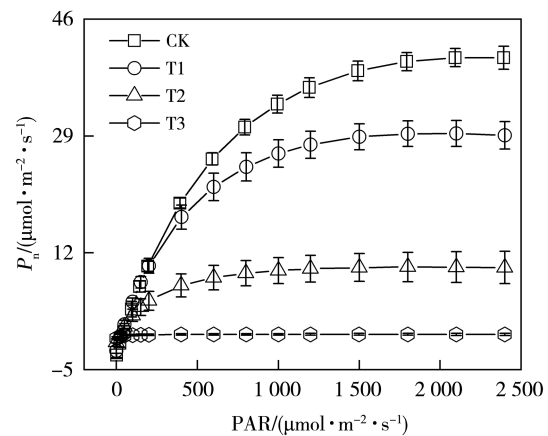


图 1 CK 处理和不同干旱胁迫下春玉米叶片净光合速率对光的响应曲线(误差棒为正负一个标准差,下同)

Fig. 1 The light-response curves of net photosynthetic rate of spring maize leaves under CK treatment and different drought stress conditions

(The error bars indicate plus or minus one standard deviation, the same as below)

采用直角双曲线修正模型拟合光响应过程参数(表 1),在不同干旱处理时各参数均存在差异。叶片  $\alpha_0$ 、 $R_d$  和 AQE 均表现为轻旱与对照无显著差异,中旱显著降低,重旱最低,中旱和重旱显著减小了表观量子效率和暗呼吸速率;光抑制系数  $\beta_0$  只在重旱下显著减小,光饱和系数  $\gamma_0$  表现为轻旱与对照无显著差异,中旱显著增加,重旱处理下最大。随

着干旱胁迫的加剧,春玉米叶片最大净光合速率与对照处理相比分别减小27.3%、75.3%、99.5%,达到 $P_{\text{max}}$ 所需的饱和光强,轻、中早下与对照处理相比显

著减小18.0%、33.1%;光补偿点在轻早和中早下分别较对照处理减小26.8%、44.8%,在重早中显著增加52.2%。

表1 直角双曲线修正模型参数

Tab. 1 Parameters of right angle hyperbolic correction model

不同处理	$\alpha_0/\times 10^{-2}$	$\beta_0/\times 10^{-4}$	$\gamma_0/\times 10^{-2}$	$R_d/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$I_{\text{sat}}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$I_c/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	AQE/ $(\times 10^{-2}\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1})$
CK	8.33±1.06 <sup>a</sup>	1.00±0.20 <sup>a</sup>	0.10±0.04 <sup>c</sup>	2.90±0.27 <sup>a</sup>	2239.10±56.22 <sup>a</sup>	36.43±2.85 <sup>b</sup>	5.56±1.56 <sup>a</sup>
T1	8.26±1.37 <sup>a</sup>	1.15±0.04 <sup>a</sup>	0.15±0.05 <sup>c</sup>	2.20±0.19 <sup>a</sup>	1836.58±62.38 <sup>b</sup>	26.66±3.26 <sup>c</sup>	5.82±0.90 <sup>a</sup>
T2	5.29±1.43 <sup>b</sup>	1.00±0.15 <sup>a</sup>	0.34±0.09 <sup>b</sup>	1.01±0.32 <sup>b</sup>	1497.99±82.96 <sup>c</sup>	20.12±2.20 <sup>d</sup>	3.05±1.05 <sup>b</sup>
T3	3.31±0.22 <sup>c</sup>	0.06±0.01 <sup>b</sup>	4.27±0.42 <sup>a</sup>	0.54±0.02 <sup>c</sup>		55.46±0.62 <sup>a</sup>	0.24±0.01 <sup>c</sup>

注:同列不同小写字母表示在0.05的显著性水平上差异显著,下同。

## 2.2 干旱胁迫下春玉米叶片水分利用特征

不同处理间叶片蒸腾速率对光的响应( $T_r$ -PAR)曲线[图2(a)]存在差异。轻早下,该曲线在 $\text{PAR}<800\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $T_r$ 高于对照处理,随后光强增强, $T_r$ 小于对照处理,随着土壤水分降低,中、重早处理下 $T_r$ 随光强增加逐渐减小,其中由轻早到中早过程中减小幅度最显著,其降低幅度大于 $P_n$ (图1)。4种水分梯度下 $T_r$ -PAR曲线均未达到光饱和点,说明随着光强的增强,蒸腾逐渐增加,这种关系并未因土壤水分变化而改变。瞬时水分利用效率对光的响应(WUE-PAR)曲线在不同水分处理下存在差异[图2(b)],中早和对照处理下水分利用效率较高,WUE在轻早处理下逐渐递减,重早下快速

趋近于零,最大瞬时水分利用效率( $\text{WUE}_{\text{max}}$ )的变化与之相同。表2列出CK处理和不同干旱胁迫下春玉米叶片瞬时水分利用效率对光的响应参数。可以看出, $\alpha_i$ 随着干旱程度的加剧整体呈减小趋势,轻早、中早间无明显差异,表明干旱会显著影响WUE-PAR曲线的初始斜率;光抑制系数 $\beta_i$ 表现为轻早、中早和对照无显著差异,但显著大于重早处理,随着光强增加,CK、T1和T2的WUE均呈现先增加后减小趋势,表明3种处理下WUE-PAR曲线存在明显光抑制现象;光饱和系数 $\gamma_i$ 表现为轻早下存在最小值,中早和对照无明显差异,重早下显著增加,表明WUE在重早下最容易达到饱和,轻早下光饱和点显著大于中早和对照处理。

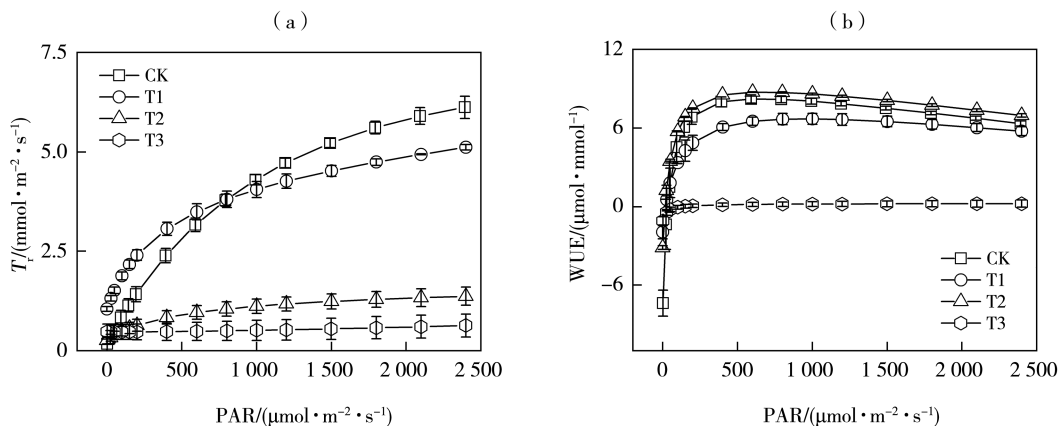


图2 CK处理和不同干旱胁迫下春玉米叶片蒸腾速率(a)和瞬时水分利用效率(b)对光的响应曲线

Fig. 2 The light-response curves of transpiration rate (a) and instantaneous water use efficiency (b) of spring maize leaves under CK treatment and different drought stress conditions

## 2.3 干旱胁迫下春玉米叶水势变化特征

图3为春玉米叶水势不同时间不同水分处理下的变化特征。可以看出,06:00轻、中早与对照处理无显著差异,重早下叶水势显著降低[图3(a)];

10:00轻早与对照处理下叶水势无明显差异,中早叶水势减小,重早下叶水势最低[图3(b)]。同一水分处理不同时间段的叶水势也不尽相同,中早处理下叶水势的变化较明显。

表2 CK处理和不同干旱胁迫下春玉米叶片瞬时水分利用效率对光的响应参数

Tab. 2 The light-response parameters of the instantaneous water use efficiency of spring maize leaves under CK treatment and different drought stress conditions

不同处理	$\alpha_1$	$\beta_1/\times 10^{-4}$	$\gamma_1/\times 10^{-2}$	$WUE_{max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$	$WUE_{-Isat}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
CK	0.44±0.05 <sup>a</sup>	0.86±0.15 <sup>a</sup>	2.52±0.24 <sup>b</sup>	8.23±0.30 <sup>a</sup>	648.83±33.62 <sup>b</sup>
T1	0.15±0.08 <sup>b</sup>	1.06±0.50 <sup>a</sup>	1.25±0.72 <sup>c</sup>	6.79±0.75 <sup>b</sup>	997.15±45.19 <sup>a</sup>
T2	0.26±0.08 <sup>b</sup>	1.07±0.14 <sup>a</sup>	1.84±0.38 <sup>bc</sup>	8.75±0.73 <sup>a</sup>	667.45±11.18 <sup>b</sup>
T3	0.05±0.01 <sup>c</sup>	0.00±0.55 <sup>b</sup>	4.03±0.51 <sup>a</sup>	0.14±0.19 <sup>c</sup>	

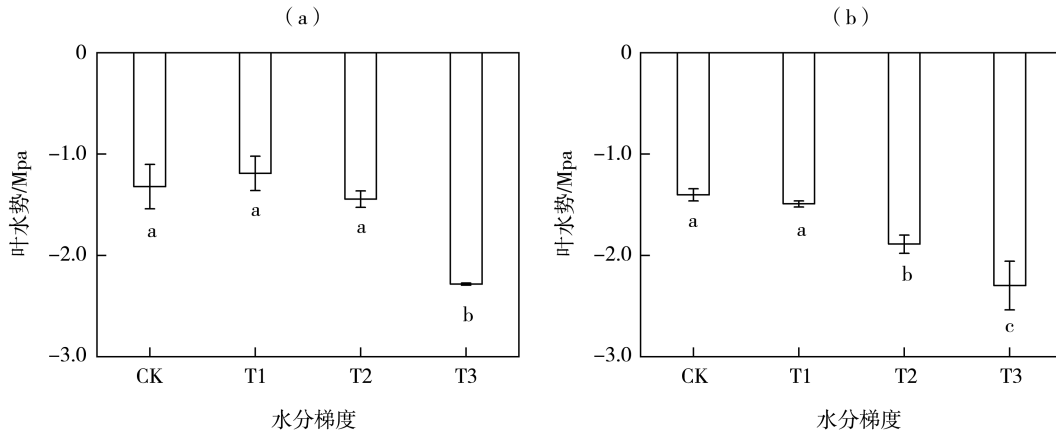


图3 06:00(a)、10:00(b)CK处理和不同干旱胁迫下春玉米叶水势变化特征

Fig. 3 The variation characteristics of leaf water potential of spring maize under CK treatment and different drought stress conditions at 06:00 (a) and 10:00 (b)

## 2.4 干旱胁迫下春玉米气孔导度的响应特征

图4为干旱胁迫下春玉米叶片气孔导度对光的响应( $G_s$ -PAR)曲线。可以看出,轻旱下该曲线在 $PAR < 600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $G_s$ 高于对照处理,随着光强增加, $G_s$ 显著小于对照处理,随着土壤水分降低,中、重旱处理下 $G_s$ 逐渐减小,其变化特征与 $T_r$ [图2(a)]

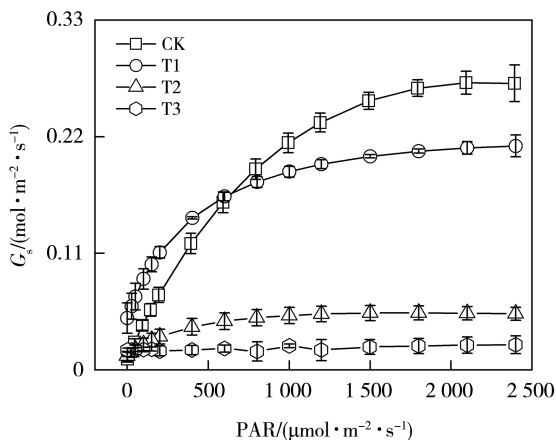


图4 CK处理和不同干旱胁迫下春玉米叶片气孔导度对光的响应曲线

Fig. 4 The light-response curves of stomatal conductance of spring maize leaves under CK treatment and different drought stress conditions

较一致。 $G_{smax}$ 在4组之间差异显著,随着干旱程度加剧显著下降,与对照处理相比,轻旱、中旱和重旱处理下分别减小21.4%、82.1%和92.9%,中旱、重旱处理下 $G_{smax}$ 急速降低。表3列出CK处理和不同干旱胁迫下春玉米叶片气孔导度对光的响应参数。可以看出, $\alpha_2$ 表现为轻旱与对照无显著差异,显著大于中旱和重旱,中、重旱显著降低了 $G_s$ -PAR曲线的初始斜率;光抑制系数 $\beta_2$ 在不同处理下无显著差异,与对照相比光饱和系数 $\gamma_2$ 在轻、中旱处理下显著增加,重旱处理下存在最大值;轻旱处理的光饱和点显著升高,中旱处理的光饱和点降低,重旱处理由于气孔几乎关闭,光饱和点最小。

## 2.5 干旱胁迫下春玉米胞间 $\text{CO}_2$ 浓度和气孔限制值的响应特征

由CK处理和不同干旱胁迫下春玉米胞间 $\text{CO}_2$ 浓度对光的响应( $C_i$ -PAR)曲线[图5(a)]可以看出,随着干旱胁迫加剧, $C_i$ 在中旱和对照处理下,无显著差异,显著小于轻旱,重旱处理下最大,重旱处理的增加趋势最显著。叶片气孔限制值对光的响应( $L_s$ -PAR)曲线在中旱处理下高于轻旱处理,对照处理处于二者之间,重旱下气孔限制值最小[图5(b)], $L_{smax}$ 在轻、中旱及对照之间无显著差异,重旱下显著

减小。表4列出CK处理和不同干旱胁迫下春玉米气孔限制值对光的响应参数。可以看出,  $\alpha_3$ 系数在对照处理下显著大于其他处理,轻旱与中旱处理无显著差异,重旱下最小,干旱显著降低  $L_s$ -PAR 曲线的初始斜率,重旱的减小幅度最大;光抑制系数  $\beta_3$  表现为轻、中旱与对照无显著差异,重旱处理下显

著减小,同时随着光强增加,CK、T1和T2的  $L_s$ 均呈先增加后减小趋势,分别在PAR为1 000、1 100、1 350  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右时达到光饱和点,存在明显光抑制现象;光饱和系数  $\gamma_3$ 在轻旱下具有最小值,中旱与对照无显著差异,重旱下存在最大值,春玉米  $L_s$ 在重旱下更容易达到光饱和状态。

表3 CK处理和不同干旱胁迫下春玉米叶片气孔导度对光的响应参数

Tab. 3 The light-response parameters of stomatal conductance of spring maize leaves under CK treatment and different drought stress conditions

不同处理	$\alpha_2/\times 10^{-4}$	$\beta_2/\times 10^{-4}$	$\gamma_2/\times 10^{-2}$	$G_{s-\max}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_{s-\text{sat}}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
CK	3.97±0.70 <sup>a</sup>	1.60±0.26 <sup>a</sup>	0.04±0.02 <sup>c</sup>	0.28±0.02 <sup>a</sup>	2 186.67±87.62 <sup>b</sup>
T1	4.59±1.67 <sup>a</sup>	0.71±0.54 <sup>a</sup>	0.22±0.12 <sup>b</sup>	0.22±0.01 <sup>b</sup>	2 710.00±145.45 <sup>a</sup>
T2	1.38±0.54 <sup>b</sup>	1.01±0.50 <sup>a</sup>	0.22±0.09 <sup>b</sup>	0.05±0.01 <sup>c</sup>	1 859.99±98.49 <sup>c</sup>
T3	0.07±0.06 <sup>c</sup>	-0.76±1.12 <sup>a</sup>	2.79±2.51 <sup>a</sup>	0.02±0.01 <sup>d</sup>	

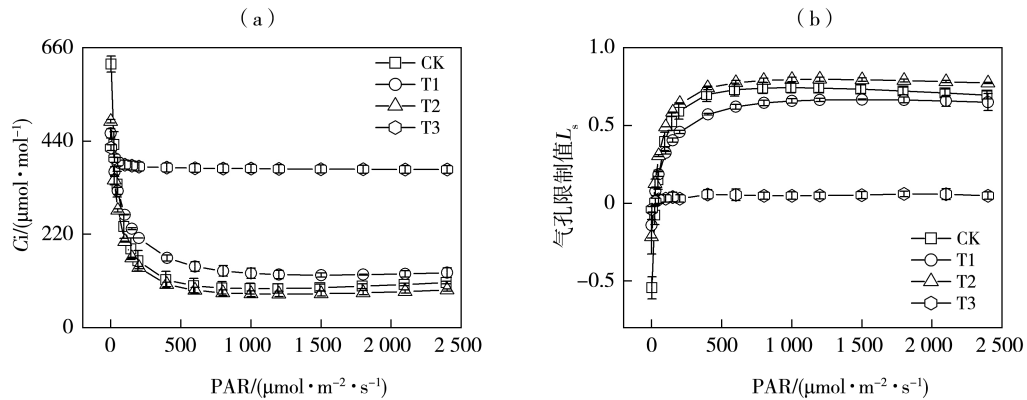


图5 CK处理和不同干旱胁迫下春玉米胞间CO<sub>2</sub>浓度(a)和气孔限制值(b)对光的响应曲线

Fig. 5 The light-response curves of intercellular CO<sub>2</sub> concentration (a) and stomatal limit value (b) of spring maize leaves under CK treatment and different drought stress conditions

表4 CK处理和不同干旱胁迫下春玉米气孔限制值对光的响应参数

Tab. 4 The light-response parameters of stomatal limit value of spring maize leaves under CK treatment and different drought stress conditions

不同处理	$\alpha_3/\times 10^{-2}$	$\beta_3/\times 10^{-4}$	$\gamma_3/\times 10^{-2}$	$L_{s-\max}$	$L_{s-\text{sat}}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
CK	3.36±0.35 <sup>a</sup>	0.41±0.15 <sup>a</sup>	2.40±0.23 <sup>b</sup>	0.75±0.04 <sup>a</sup>	1 018.20±52.73 <sup>b</sup>
T1	1.29±0.34 <sup>b</sup>	0.50±0.20 <sup>a</sup>	1.30±0.22 <sup>c</sup>	0.69±0.09 <sup>a</sup>	1 099.13±64.80 <sup>b</sup>
T2	2.01±0.70 <sup>b</sup>	0.39±0.31 <sup>a</sup>	1.78±0.43 <sup>b</sup>	0.80±0.09 <sup>a</sup>	1 351.33±25.57 <sup>a</sup>
T3	0.51±0.16 <sup>c</sup>	-0.22±0.20 <sup>b</sup>	4.07±0.61 <sup>a</sup>	0.09±0.01 <sup>b</sup>	

### 3 讨论

#### 3.1 干旱胁迫下春玉米光合参数的响应

供水不足是限制旱地作物光合作用的主要因素,干旱胁迫主要从两个方面影响光合作用,一是抑制作物生长,减少光合面积,二是直接导致光合速率降低(薛青武和上官周平,1990)。光响应曲线及其参数结果显示,春玉米叶片的净光合速率随着

干旱程度的增加逐步下降,由轻旱到中旱下降幅度最为明显,由此表明,干旱在短时间内可通过直接降低净光合速率来限制光合作用。表观量子效率(AQE)可表征叶片对弱光的转化能力,其值越大表示光能传递能力越强。本研究结果表明轻旱与对照处理的AQE无显著差异,中旱、重旱处理分别下降了45.1%、95.7%; $\alpha_0$ 是光响应曲线的初始斜率,表示植物光合作用对光的利用效率,与AQE的变化趋

势基本一致,因而中旱以上的水分胁迫才会显著限制春玉米对弱光的利用能力,体现了玉米对干旱具有较强的适应性,这与李义博等(2017)的研究一致。叶子飘和康华靖(2012)的研究发现直角双曲线修正模型中 $\beta_0$ 和 $\gamma_0$ 具有明确生物学意义,分别反映叶片受到光抑制和达到光饱和的难易程度,其值越大说明越容易受到限制。本研究前3种处理下的 $\beta_0$ 值显著大于重旱,表明对照、轻旱及中旱下 $P_n$ 均会受到光抑制,重旱下无光抑制现象,这可能是由于干旱达到一定程度时,细胞水分严重缺失,叶片结构的完整性遭到破坏(宋贺等,2019), $P_n$ 无法有效响应光强变化所导致的。重旱下 $\gamma_0$ 值最大,其次为中旱,说明中、重旱下 $P_n$ 更容易达到光饱和,避免了干旱下强光对叶片的叠加伤害。

$P_{nmax}$ 代表了叶片潜在最大光合能力,其值越大说明强光对植物光合的限制越小(李义博等,2017),本研究中随着干旱强度的增加 $P_{nmax}$ 明显降低,表明干旱显著限制了春玉米叶片的光合作用,降低了叶片对强光的利用能力,这可能是作物以消耗光能为代价保护光化学反应中心免遭逆境损伤的逃避策略(Ghannoum,2009)。暗呼吸速率( $R_d$ )能够反映叶片的活性,本研究中 $R_d$ 在轻旱下与对照无差异,中、重旱处理下显著降低,叶片通过减小呼吸作用消耗应对中旱及以上水分胁迫,以此来维持植物自身的代谢平衡。叶片光补偿点( $I_c$ )和光饱和点( $I_{sat}$ )是反映植物需光特性的主要指标,分别代表叶片对弱光和强光的利用能力,光补偿点越低、光饱和点越高则植物对光的适应能力越强(雷俊等,2017),且 $I_c$ 至 $I_{sat}$ 的范围可在一定程度上代表净光合作用的有效时长(李义博等,2017)。本研究中轻旱和中旱处理下 $I_{sat}$ 和 $I_c$ 均显著减小,重旱处理下 $I_{sat}$ 最小, $I_c$ 显著增加,随着干旱的加剧叶片抵御强光的能力下降,同时二者之间的光强范围显著减小,光能利用范围变窄,净光合作用有效时间显著减小,这可能是叶片面临水分胁迫时为达到叶片光合机构损伤最小化所采取的生存策略。

### 3.2 干旱胁迫下春玉米叶片水分利用变化特征

水分利用效率(WUE)是植物基本的生理生态特征,高效的WUE有利于维持植物的碳水平衡和适应干旱环境(李民青等,2023)。叶片尺度的WUE由光合作用与蒸腾作用共同决定,因而影响作物这两个生理过程的因素均会引起叶片WUE的变化(姜寒冰等,2019)。本研究中,随着干旱胁迫的增加,玉米叶片的 $P_n$ 和 $T_s$ 均逐步降低,WUE最终表现为中旱与对照无显著差异,轻旱和重旱显著降低,10:00测

量的叶水势,在轻旱与对照下无显著差异,中、重旱下显著降低。叶水势能够直接反映作物的水分亏缺情况,叶水势对WUE的影响是通过影响气孔行为实现的,当干旱胁迫刚开始时叶片可通过气孔的部分关闭来减少水分丧失,从而使叶水势在一定范围内保持恒定(张文丽等,2006),因而叶水势在轻旱处理下与对照处理无明显差异。但叶水势发生轻微下降都将提高植物激素脱落酸(Abscisic Acid, ABA)浓度,引起叶片气孔的轻微关闭以防止蒸腾性水分流失(Laxa et al.,2019),即气孔导度降低在叶片水势还没有明显变化之前就已经发生,这种生存策略会减少叶片 $CO_2$ 的吸收量,最终导致净光合速率下降,从而轻旱处理下WUE小于对照处理。当植物遭受较强的干旱胁迫后,会优先考虑生存而非生产力,而角质层损失的水量决定其存活能力(Mukarram et al.,2021),气孔的关闭不仅为了防止植物失水过度,同时可以使叶片水分利用效率最大化(战吉宸等,2005)。叶水势在中旱下显著减小,气孔进一步关闭,以水分损失最小化为主要目的使蒸腾速率急剧降低(赵福年等,2019),此时蒸腾对干旱的响应比光合反应更强烈,因此蒸腾速率下降幅度要快于光合速率,也正是光合作用和蒸腾速率间的耦合关系促使中旱胁迫下水分利用效率最高,即气孔导度对叶片在碳同化和水分耗散的调节中符合最优控制的原则,这是植物抗旱策略的重要组成部分。重旱胁迫会导致叶绿素功能障碍并破坏光合器官(Cai et al.,2020),气孔对叶水势失去调节能力,因而重旱下叶水势降到极低,WUE显著减小,这与蔡福等(2017)的研究一致。

### 3.3 干旱胁迫下春玉米光合作用的影响因素

植物受到干旱胁迫时光合作用被限制,碳同化能力下降(Neto et al.,2017),光合速率的下降由气孔和非气孔因素共同决定(Jia et al.,2020)。叶子飘等(2019)研究表明,当所有气孔开闭行为保持一致时,判断叶片光合速率下降是否由气孔因素主导,需依据胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )和气孔限制值的变化趋势来判定,而非单纯关注 $C_i$ 的下降幅度。根据Farquhar和Sharkey(1982)的观点,在 $P_n$ 减小的情况下, $C_i$ 下降且 $L_s$ 升高时,气孔限制占主导作用,当 $C_i$ 升高且 $L_s$ 下降时,非气孔因素占主导作用。本研究中,随着光照增强,轻旱胁迫下玉米 $G_s$ 相较于对照处理显著下降,叶片 $C_i$ 增加, $L_s$ 减小,根据 $C_i$ 的变化方向判断此时以非气孔限制为主导因素使净光合速率降低。但许大全(2013)指出叶片气孔的不均关闭现象会使 $C_i$ 恒定不变,水分胁迫条件下容易造成非气孔限

制的假象,当作物突然遭受水分胁迫,植物为维持正常的叶水势,通过关闭部分气孔的方式减少水分蒸腾(Sharma and Zheng, 2019),计算的 $C_i$ 会高于或者等于实际值,进而造成非气孔限制的假象。Medrano等(2002)提出,可由光饱和的气孔导度作为干旱条件下光合作用的气孔和非气孔限制之间的拐点指标,最大气孔导度值在 $0.05 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右时即为拐点值,因而轻旱下主要是气孔限制影响了叶片碳同化能力,导致光合速率下降。中旱处理下玉米叶片 $C_i$ 减小, $L_s$ 增加, $G_s$ 和 $P_n$ 均显著下降,结合最大气孔导度拐点值,此时叶片净光合速率下降的因素以气孔限制为主导,非气孔限制逐渐增强。中旱处理下植物气孔的开放程度进一步降低,气孔阻力增加,限制了光合作用原料的供应,导致 $C_i$ 降低(Song et al., 2020),最终使作物光合作用速率降低,叶片通过气孔调节的方式降低水分蒸腾,避免干旱对叶片结构的损伤,这可能是本文中旱处理下气孔限制始终占主导因素的原因,体现了植物适应胁迫环境的气孔调节机制,表明玉米属较耐旱的作物,在受到干旱胁迫后作物光合系统的自身调节能力较强,可忍耐一定程度的水分亏缺(陈图强等, 2023)。发生轻微干旱时,植物的抗氧化防御机制一般可以及时清除活性氧自由基以避免膜损伤(Jia et al., 2020),但重旱下土壤水分胁迫超出了植物可应对的阈值,叶片不能得到生存所需的最低水分,植物收支平衡被打破,叶肉细胞光合活性降低,抗氧化防御机理极其脆弱,活性氧的积累会破坏光系统(Sharma and Zheng, 2019),植物无法维持正常生理活动。重旱下玉米叶片 $C_i$ 显著增加, $L_s$ 明显减小,非气孔因素限制作物的光合作用,因而净光合速率等光合参数趋近于零。

本研究选取了2022年春玉米七叶期试验数据进行研究,在未来研究中,还将开展多年的连续性观测试验,探究春玉米在不同发育阶段的干旱响应阈值,以期能够更全面地研究春玉米对干旱的响应机理。

## 4 结 论

本研究利用七叶期春玉米的光合数据,对比分析了不同干旱程度下春玉米叶片的光合生理特征,并探究其生理抗旱机制,主要得到以下结论。

1)随着干旱程度的加剧,春玉米叶片的 $P_n$ 和 $P_{nmax}$ 逐渐降低,轻旱—中旱过程中下降幅度最明显,中、重旱处理下叶片 $P_n$ 更容易达到光饱和状态,导致叶片对强光的利用效率显著下降。

2)随着干旱胁迫加剧, $T_i$ 显著降低,其变化趋势与 $G_s$ 一致。WUE在中旱下最高,轻旱和对照次之,重旱最小。

3)轻、中旱胁迫下叶片以气孔限制为主导因素限制了光合作用,重旱下以非气孔限制为主导因素使光合速率迅速降低,春玉米叶片气孔向非气孔限制的转折点出现在中旱—重旱的过程中。当春玉米在七叶期处于轻度干旱时,叶片 $P_n$ 下降幅度较小,作物可通过关闭气孔的方式调节碳水平衡,表明春玉米此时具有一定的抗旱性;当春玉米处于中度及以上程度干旱时,应采取相应灌溉措施补充土壤水分,防止叶片光合机构受到不可逆的损伤,影响作物产量形成。

### 参考文献:

- 卜令铎,张仁和,常宇,等,2010.苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应[J].生态学报,30(5):1184-1191.
- 蔡福,米娜,纪瑞鹏,等,2017.关键发育期干旱及复水过程对春玉米主要生理参数的影响[J].应用生态学报,28(11):3643-3652.
- 陈图强,徐贵青,陈家祯,等,2023.不同灌水量对核桃树生理、生长和果实品质的影响[J].生态学杂志,42(11):2578-2587.
- 龚容,高琼,2015.叶片结构的水力学特性对植物生理功能影响的研究进展[J].植物生态学报,39(3):300-308.
- 姜寒冰,张玉翠,任晓东,等,2019.作物水分利用效率研究方法及其尺度传递研究进展[J].中国生态农业学报:中英文,27(1):50-59.
- 姜鹏,秦美欧,蔡福,等,2023.干旱-复水联动对东北春玉米光合生理与产量的影响[J].干旱气象,41(2):207-214.
- 雷俊,张凯,姚玉璧,等,2017.半干旱区黑膜覆盖对马铃薯光合特性及产量的影响[J].干旱气象,35(6):1036-1041.
- 李建查,孙毅,赵广,等,2018.干热河谷不同土壤水分下甜玉米灌浆期光合作用光响应特征[J].热带作物学报,39(11):2169-2175.
- 李民青,周乐,王喜勇,等,2023.7种荒漠木本植物枝干与叶片光合特征及其影响因素[J].应用生态学报,34(10):2637-2643.
- 李义博,宋贺,周莉,等,2017. $C_4$ 植物玉米的光合-光响应曲线模拟研究[J].植物生态学报,41(12):1289-1300.
- 麻雪艳,周广胜,2018.夏玉米叶片气体交换参数对干旱过程的响应[J].生态学报,38(7):2372-2383.
- 齐月,张强,胡淑娟,等,2023.干旱胁迫下春玉米叶片光合参数对叶温的响应[J].干旱气象,41(2):215-222.
- 任宗悦,刘晓静,刘家福,等,2020.近60年东北地区春玉

- 米旱涝趋势演变研究[J]. 中国生态农业学报:中英文, 28(2): 179-190.
- 宋丰萍, 蒙祖庆, 2018. 干旱胁迫下作物光合参数研究进展[J]. 高原农业, 2(2): 138-144.
- 宋贺, 蒋延玲, 许振柱, 等, 2019. 玉米光合生理参数对全生育期干旱与拔节后干旱过程的响应[J]. 生态学报, 39(7): 2 405-2 415.
- 许大全, 2013. 光合作用学[M]. 北京: 科学出版社: 225.
- 薛青武, 上官周平, 1990. 旱地作物的光合作用与产量[J]. 山西农业科学, 18(11): 27-30.
- 杨阳, 齐月, 赵鸿, 等, 2022. 水分胁迫对干旱半干旱区玉米关键生育期生长发育及产量的影响及评价[J]. 干旱气象, 40(6): 1 059-1 067.
- 叶子飘, 康华靖, 2012. 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, 33(2): 51-57.
- 叶子飘, 郑卓, 康华靖, 等, 2019. 自然条件下中熟籼稻初期剑叶光合的气孔和非气孔限制特征[J]. 生态学杂志, 38(4): 1 004-1 012.
- 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等, 2015. 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, 35(9): 2 902-2 909.
- 战吉成, 黄卫东, 王秀芹, 等, 2005. 弱光下生长的葡萄叶片蒸腾速率和气孔结构的变化[J]. 植物生态学报, 29(1): 26-31.
- 张健, 张明, 侯云鹏, 等, 2019. 干旱胁迫对甘肃中部春小麦生理性状及灌水利用效率的影响[J]. 干旱气象, 37(1): 139-145.
- 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等, 2011. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报, 31(5): 1 303-1 311.
- 张文丽, 张彤, 吴冬秀, 等, 2006. 土壤逐渐干旱下玉米幼苗光合速率与蒸腾速率变化的研究[J]. 中国生态农业学报, 14(2): 72-75.
- 赵福年, 杨红燕, 王润元, 等, 2019. 作物内禀水分利用效率变化[J]. 核农学报, 33(9): 1 873-1 881.
- CAI F, ZHANG Y S, MI N, et al, 2020. Maize (*Zea mays* L.) physiological responses to drought and rewatering, and the associations with water stress degree[J]. Agricultural Water Management, 241(12): 106379. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106379.
- ENNAHLI S, EARL H J, 2005. Physiological limitations to photosynthetic carbon assimilation in cotton under water stress[J]. Crop Science, 45(6): 2 374-2 382.
- FARQUHAR G D, SHARKEY T D, 1982. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 33: 317-345.
- GHANNOUM O, 2009. C<sub>4</sub> photosynthesis and water stress [J]. Annals of Botany, 103(4): 635-644.
- HETHERINGTON A M, WOODWARD F I, 2003. The role of stomata in sensing and driving environmental change [J]. Nature, 424(6951): 901-908.
- JIA Y Y, XIAO W X, YE Y S, et al, 2020. Response of photosynthetic performance to drought duration and re-watering in maize [J]. Agronomy, 10(4): 533. DOI: 10.3390/agronomy10040533.
- LAXA M, LIEBTHAL M, TELMAN W, et al, 2019. The role of the plant antioxidant system in drought tolerance [J]. Antioxidants, 8(4): 94. DOI: 10.3390/antiox8040094.
- LOBELL D B, ROBERTS M J, SCHLENKER W, et al, 2014. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the U.S. Midwest [J]. Science, 344(6183): 516-519.
- MEDRANO H, ESCALONA J M, BOTA J, et al, 2002. Regulation of photosynthesis of C<sub>3</sub> plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter [J]. Annals of Botany, 89(7): 895-905.
- MUKARRAM M, CHOUDHARY S, KURJAK D, et al, 2021. Drought: Sensing, signalling, effects and tolerance in higher plants [J]. Physiologia Plantarum, 172(2): 1 291-1 300.
- NETO M C L, CERQUEIRA J V A, DA CUNHA J R, et al, 2017. Cyclic electron flow, NPQ and photorespiration are crucial for the establishment of young plants of *Ricinus communis* and *Jatropha curcas* exposed to drought [J]. Plant Biology, 19(4): 650-659.
- SHARMA A, ZHENG B S, 2019. Melatonin mediated regulation of drought stress: Physiological and molecular aspects [J]. Plants, 8(7): 190. DOI: 10.3390/plants8070190.
- SONG L B, JIN J M, HE J Q, 2019. Effects of severe water stress on maize growth processes in the field [J]. Sustainability, 11(18): 5 086. DOI: 10.3390/su11185086.
- SONG X Y, ZHOU G S, HE Q J, et al, 2020. Stomatal limitations to photosynthesis and their critical water conditions in different growth stages of maize under water stress [J]. Agricultural Water Management, 241: 106330. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106330.
- YE Z P, LING Y, YU Q, et al, 2020. Quantifying light response of leaf-scale water use efficiency and its interrelationships with photosynthesis and stomatal conductance in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> species [J]. Frontiers in Plant Science, 11: 374. DOI: 10.3389/fpls.2020.00374.

## Photosynthetic characteristics and response mechanism of spring maize at seven-leaf stage under drought stress

TANG Yurui<sup>1,2,3,4</sup>, QI Yue<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Heling<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Yang<sup>1,2,3,4</sup>, ZHAO Hong<sup>1,2,3,4</sup>,  
ZHANG Kai<sup>1,2,3,4</sup>, WEI Xingxing<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Renkui<sup>5</sup>

1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China;
2. Dingxi Drought Meteorology and Ecological Environment Field Scientific Experimental Station of CMA, Dingxi 743000, Gansu, China;
3. Wuwei National Climate Observatory of China Meteorological Administration, Wuwei 733000, Gansu, China;
4. Zhangye National Climate Observatory of China Meteorological Administration, Zhangye 734000, Gansu, China;
5. Jingyuan Meteorological Bureau of Gansu Province, Jingyuan 730600, Gansu, China)

**Abstract:** Drought stress is a major limiting factor for crop growth. Investigating the photosynthetic characteristics and physiological drought resistance mechanisms of spring maize (*Zea mays* L.) at the seedling stage is crucial for enhancing drought resilience and promoting crop yield. In this study, taking spring maize as the research object and using pot experiments, four gradients of control treatment (referred to as “CK” treatment), mild drought (T1), moderate drought (T2), and severe drought (T3) were set up to study the photosynthetic physiological characteristics and drought resistance mechanism at the seven-leaf stage of spring maize under different drought degrees. The results show that drought stress significantly reduced both the net photosynthetic rate ( $P_n$ ) and the maximum net photosynthetic rate ( $P_{nmax}$ ) of spring maize leaves. Under moderate and severe drought conditions, the initial slope ( $\alpha_0$ ), the dark respiration rate ( $R_d$ ), and the apparent quantum efficiency (AQE) of the light response curve decreased significantly, while the light saturation coefficient ( $\gamma_0$ ) increased markedly, indicating the light energy utilization rate of the leaves decreased significantly. The transpiration rate ( $T_r$ ) gradually decreased with increasing of drought intensity, the water use efficiency (WUE) significantly enhanced under moderate drought but sharply reduced under severe drought. Stomatal conductance ( $G_s$ ) progressively declined with drought stress intensification. Stomatal limitation was identified as the primary factor reducing photosynthetic rate under mild and moderate drought conditions, with non-uniform stomatal closure phenomenon under mild drought. Under severe drought condition, intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ) significantly increased, and the stomatal limitation value ( $L_s$ ) decreased dramatically, demonstrating the dominance of non-stomatal limitation.

**Key words:** drought stress; gas exchange parameters; water use efficiency; response

(责任编辑:黄小燕;校对:王涓力)