

# 补灌量对夏玉米光合和叶绿素荧光特性的影响

王策, 王志强, 张志伟, 林同保\*

(河南农业大学农学院/河南省粮食作物生理生态与遗传改良重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘要:**以夏玉米品种郑单958、中科11、浚单20和浚单22为材料,采用池栽试验,设置不同程度水分亏缺处理,研究了补灌量对四个品种叶片光合特性、叶绿素荧光参数和产量的影响。结果表明,随补灌量减少,玉米生长受抑制,叶面积指数(LAI)降低,叶片净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )、SPAD值和光化学淬灭系数( $qP$ )均降低,而叶片水分利用效率(LWUE)呈升高趋势,正常灌水与中度亏缺无显著差异,与重度亏缺差异显著;初始荧光( $F_o$ )、PSII最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和非光化学淬灭系数(NPQ)变化不明显。亏缺补灌下叶片光合能力和光能转化效率的降低是玉米减产的主要因素。品种间变化幅度不同,降幅小的品种受干旱影响小,抗旱性较强,四个品种抗旱性表现为:中科11>郑单958、浚单20>浚单22。由于受区域气候的影响,季节性干旱条件下适量中水补灌可起到节水稳产的作用。

**关键词:**玉米;补灌;光合作用;叶绿素荧光;产量

**中图分类号:** S274.1; S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)06-0099-08

黄淮海地区是中国重要的玉米生产基地。近年来水资源不断减少和降雨量的时空分布不均,导致该地区玉米生产受到干旱的极大制约。干旱可以引起气孔关闭、水分平衡失调<sup>[1]</sup>、Rubisco降解和Calvin循环中酶活性下降,从而抑制光合作用,降低玉米产量。研究表明,干旱对植物光合的影响分为气孔因子和非气孔因子<sup>[2-4]</sup>,轻度或中度胁迫时气孔因子占主导作用,严重胁迫时非气孔因子占主导作用<sup>[5]</sup>。逆境胁迫下,植物通过光合电子过程中的能量耗散减少过剩电子的产生,耐性品种具有较高的耗散过多光能的能力,即有较高的非光化学淬灭系数(NPQ),以抵御不良环境<sup>[6]</sup>;颜建明等<sup>[7]</sup>对不同耐低温性辣椒的研究表明,耐性强的具有较低的NPQ, Jung等<sup>[8]</sup>对不同耐冷性番茄的研究也得到同样的结果。其实逆境下植物除热耗散外,还可以通过减少光能捕获、光呼吸、叶黄素循环反应等途径,耗散过剩光能以适应逆境环境<sup>[9-10]</sup>。目前有关干旱对玉米光合性能影响的研究大多是在可控的环境下分析某一时期对于干旱胁迫的响应,而在完全自然条件下研究补灌量对玉米光合作用的影响较少。特别是黄淮海地区,夏玉米全生育期降雨总量虽能满足其一生的总需水量,但降雨量呈极度的不均匀分布,夏玉米生育中期多、前期后期少,阶段性干旱、供需错位严重影响作物的高产稳产和水分高效利用。根据作物对水分的敏感时期和具体的气象条件对夏玉米适

时、适量的补充灌溉技术,可能成为解决湿润补灌区供需错位矛盾和节水高产的关键技术。本研究选取黄淮海区4个主推玉米品种进行补灌控水试验,通过对其光合性能和叶绿素荧光参数变化的研究,探讨补灌量影响玉米生长发育的光合作用机制,为黄淮海区玉米节水栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2010年6月—2011年10月在河南农业大学科教园区有底测坑中(113°38'39"E, 34°47'51"N)进行,测坑上口面积6.6 m<sup>2</sup>(3 m×2.2 m),深2 m,用13.5 cm厚的砖墙隔离以防止侧渗。坑内土壤为壤土,有机质含量为17.8 g/kg、全氮0.99 g/kg、碱解氮57.9 mg/kg、速效磷44.4 mg/kg、速效钾204.8 mg/kg, pH7.5,测坑中土壤最大持水量为23.4%。

### 1.2 试验设计

供试夏玉米品种为黄淮海区主推品种:浚单20、中科11、郑单958和浚单22。采用裂区设计,灌水为主区,设三个处理:正常灌水(CK)、中度亏缺(T1)、重度亏缺(T0);品种为副区。共12个处理,随机区组排列,重复3次。品种适宜密度种植(郑单958为6.75万株/hm<sup>2</sup>,其余品种均为6万株/hm<sup>2</sup>),行距均为60 cm。肥料采用三元缓释肥(N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O比例为20:25:5)(“金豆豆”牌),按15 kg纯氮/

收稿日期:2012-06-05

基金项目:农业部公益性行业科研专项(200903007)

作者简介:王策(1988—),男,河南固始人,硕士,主要从事作物抗旱生理与节水技术研究。E-mail:hwangce@126.com。

\*通信作者:林同保(1962—),男,教授,主要从事作物节水理论与技术研究。E-mail:linlab@163.com。

666.7m<sup>2</sup>(约合 70 kg 缓释肥),按基肥:追肥 = 1:2 施入,灌足蒙头水。2010 年试验夏玉米于 6 月 15 日播种,9 月 30 日收获。2011 年试验夏玉米于 6 月 13 日播种,10 月 6 日收获。当玉米需要灌水时进行补灌,2010 年试验于 6 叶展补灌(CK:50 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>, T1:35 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>, T0:15 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>),抽雄期补灌(CK:65 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>, T1:45 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>, T0:25 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>);2011 年试验于 6 叶展末拔节前补灌(CK:50 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>, T1:35 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>, T0:15 m<sup>3</sup>/666.7m<sup>2</sup>)。田间除草和植保措施等按超高产管理要求进行。

### 1.3 测定指标

1.3.1 土壤含水量 采用 TDR 水分测定仪进行测定,测至 1.2 m,每隔 15 d 测定 1 次,灌水前后加测。

1.3.2 叶面积指数 分别在 7 叶展、9 叶展、吐丝期、灌浆中期(吐丝后 25d)、成熟期测定,计算叶面积[ $LA = \text{长} \times \text{宽} \times 0.75$ ],并计算平均值,作为各处理的单株叶面积。叶面积指数  $LAI = LA/GA$ ( $LA$  为该土地面积的总叶面积, $GA$  为土地面积)。

1.3.3 SPAD 值 采用叶绿素计(SPAD-502,日本美能达公司生产)测定 SPAD 值,多次测定后求平均值。测定时间同上,7 叶展和 9 叶展分别测定第 7 和第 9 片完全展开叶,其余时期测定穗位叶。

1.3.4 叶光合参数 采用便携式光合仪(Li-6400 型,美国产)直接测定,在 10:00-11:30 设定 PAR 为 1500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,作为测定光强,每小区选取有代表性的叶片 3 片进行测量。测定部位为穗位叶,测定时期为吐丝期。

1.3.5 叶绿素荧光参数 采用脉冲调制式荧光仪

(FMS-2,英国 Hansatech 公司生产),测定经暗适应 15 min 的最大荧光( $F_m$ )、初始荧光( $F_o$ )、光照条件下最大荧光( $F'_m$ ),选择晴朗天气上午 9:00 到 11:30 测定。选取有代表性的 3 株玉米进行测定,取平均值。计算 PS II 最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )、光化学猝灭系数( $qP$ )、非光化学猝灭系数( $NPQ$ )。分别按下列公式计算: $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ ,  $qP = (F_m - F_s)/(F_m - F_o)$ ,  $NPQ = (F_m - F'_m)/F'_m$ 。测定部位和时期同光合测定。

1.3.6 产量性状 每个测坑选取连续的 20 株玉米收获,并晾晒至玉米安全贮藏含水量 13%,调查穗粒数、百粒重,折算产量。

1.3.7 数据分析 试验数据采用 Excel 和 DPS 软件进行统计分析,用 LSD 检验法分析各处理之间的差异显著性( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 夏玉米全生育期降雨量

由图 1 可知,降雨主要分布在玉米全生育期的中期,前后期降雨较少。2010 年夏玉米全生育期降雨量为 491 mm,其中 6 月、7 月、8 月和 9 月分别占全生育期的 1%、40%、44% 和 15%。从夏玉米各生育阶段来看,降雨主要分布在 9 叶展时期(32%)和灌浆中期(40%),吐丝前达 41%。2011 年夏玉米全生育期降雨量为 473 mm,6 月、7 月、8 月和 9 月分别占全生育期的 2%、11%、42% 和 45%,其中 8 月份连阴雨现象达到 20 d。从夏玉米各生育阶段来看,降雨主要集中在吐丝期至灌浆末期(87%),吐丝前仅占 13%。

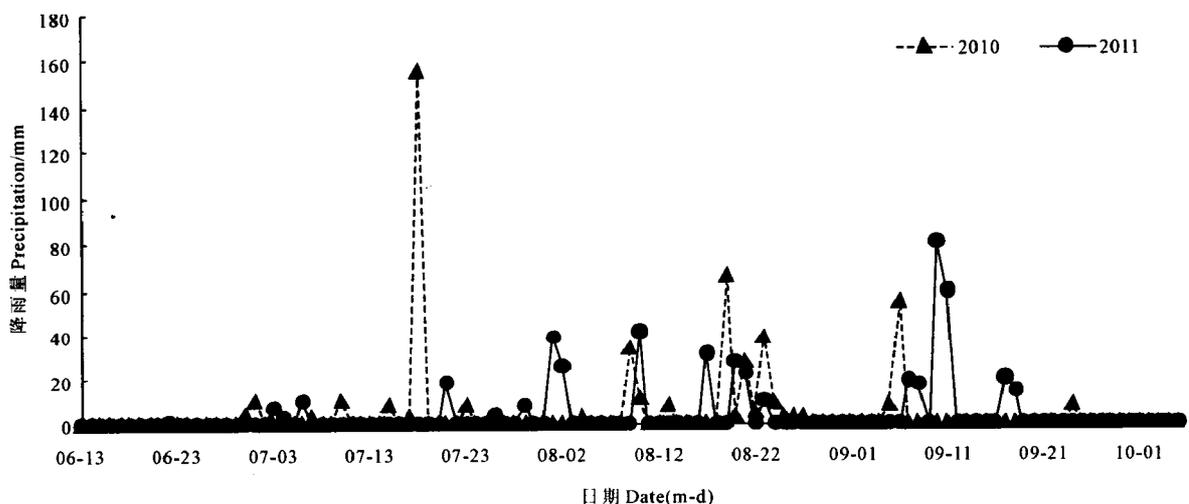


图 1 2010 和 2011 年夏玉米生育期降雨量

Fig.1 Precipitation in maize growth stage at 2010 and 2011

2.2 不同灌水处理下土壤水分变化

灌水处理后,土壤含水量在 0~60 cm 土层变化活跃,60~120 cm 土层内变化不明显(表 1)。拔节期各处理土壤含水量变化一致,均为 20~40 cm 土层含水量较大,且各处理间达到显著水平,40 cm 以下土层处理间差异不显著。吐丝期各处理土层含水量呈递减趋势,表层土壤含水量处理间差异不显著,

深层土壤 CK、T1 与 T0 达到显著水平。与拔节期相比,吐丝期 0~20 cm 土层含水量有所增加,其余土层均低于拔节期水平,因为表层土受外界环境影响变化较大,与降雨周期一致,而深层土壤受外界变化影响较小,以作物消耗为主,灌水量不同仍能使深层土壤产生水分梯度,影响玉米的水分代谢。

表 1 不同处理不同时期土壤含水量变化

Table 1 Soil water content changes of maize different growth stage under different irrigation treatments

时期 Stage	品种 Cultivar	处理 Treatment	土壤含水量 Soil water content/%					
			0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	100~120 cm
拔节期 Jointing	郑单 958 Zhengdan 958	CK	18.5a	20.6a	16.2a	15.5a	15.6a	16.3a
		T1	16.0a	17.6b	15.9a	15.2a	14.5a	16.0a
		T0	13.2b	14.1c	14.6a	14.7a	15.3a	16.1a
	中科 11 Zhongke 11	CK	18.8a	20.4a	15.2a	14.8a	14.1a	16.8a
		T1	16.7a	17.9b	15.0ab	14.5a	14.8a	15.8a
		T0	14.0b	14.6c	14.0b	14.8a	15.1a	16.3a
	浚单 20 Xundan 20	CK	19.8a	21.0a	15.4a	17.1a	15.9a	15.6b
		T1	16.6b	17.4b	16.4a	15.8b	16.6a	16.0ab
		T0	13.7c	14.3c	15.9a	15.6b	16.2a	16.8a
	浚单 22 Xundan 22	CK	18.3a	19.4a	15.3a	16.2a	16.3a	16.4a
		T1	16.3ab	17.1b	16.3a	15.7a	15.3a	15.5b
		T0	14.1b	14.4c	16.1a	15.2a	15.9a	16.1ab
吐丝期 Silking	郑单 958 Zhengdan 958	CK	20.1a	18.3a	16.2a	15.3a	15.3a	16.1a
		T1	19.2a	16.9ab	15.4ab	14.7a	14.5ab	15.7a
		T0	18.1a	15.1b	13.5b	14.1a	14.2b	15.1b
	中科 11 Zhongke 11	CK	20.3a	19.0a	16.0a	14.9a	14.2a	16.6a
		T1	19.3a	17.3a	15.4a	14.1a	14.5a	15.7b
		T0	18.6a	15.2b	14.1b	14.1a	13.6b	15.2b
	浚单 20 Xundan 20	CK	20.5a	18.5a	15.5a	16.4a	15.8a	15.6a
		T1	19.0a	16.9a	15.7a	15.7ab	16.0a	15.7a
		T0	18.4a	14.9b	14.2b	15.1b	14.3b	15.5a
	浚单 22 Xundan 22	CK	19.8a	17.9a	15.4a	15.8a	16.1a	16.1a
		T1	18.1a	15.6b	14.1b	14.9a	15.2a	15.2b
		T0	17.3a	13.7b	13.4b	15.3a	15.1a	15.4b

注:同一列内同一品种标以不同字母的数据处理间差异显著(n=3)。下同。

Note: In each cultivar, values followed by a different letter within a column are significantly different at 0.05 probability level (n=3). They are the same as belows.

2.3 灌水量对夏玉米叶面积指数的影响

玉米叶片发展动态直接影响到光合物质生产和最终的生物产量,叶面积指数是衡量作物群体叶面积大小的指标。从表 2 可以看出,各处理叶面积指数在整个生育期均表现为单峰曲线,吐丝期达到峰值,且随灌水量的减少而降低。夏玉米品种各处理间的差异在整个生育期的表现基本一致,且均表现为 CK>T1>T0,12 叶展差异较大,随着生育期的推进,处理间的差异逐渐减小,表明 7 叶展水分胁迫使玉米新生叶片生长受抑制,导致叶面积减少,而吐丝

后降雨连续且偏多,光照不足,灌水多的处理逐渐失去了前期的优势。浚单 22 对水分较敏感,控水处理后,以 12 叶展为例,与 T0、T1 相比,CK 分别下降了 21.3% 和 9.8%,其余品种下降较少,郑单 958 为 16.8%、7.3%,中科 11 为 14.1%、5.9%,浚单 20 为 14.4%、6.8%,表现出较强的抗旱性,且同一时期正常灌水处理下,叶面积指数均表现为郑单 958>中科 11>浚单 20>浚单 22。表明玉米叶面积指数不仅受遗传因素的影响,合理的水分调控也起着重要的作用。

表 2 不同灌水处理下叶面积指数动态变化  
Table 2 LAI change dynamics under different irrigation treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	叶面积指数 LAI				
		7 叶展 7-leaf	12 叶展 12-leaf	吐丝期 Silking	灌浆中期 Mid-filling	成熟期 Maturity
郑单 958 Zhengdan 958	CK	0.46a	2.32a	5.33a	4.72a	3.30a
	T1	0.45a	2.15b	5.11ab	4.66ab	3.19a
	T0	0.45a	1.93c	4.87b	4.52b	3.12a
中科 11 Zhongke 11	CK	0.47a	2.05a	4.85a	4.45a	3.23a
	T1	0.50a	1.93b	4.68ab	4.30ab	3.10a
	T0	0.49a	1.76c	4.46b	4.17b	3.03a
浚单 20 Xundan 20	CK	0.46a	1.84a	4.72a	4.16a	2.99a
	T1	0.44a	1.72b	4.53ab	4.02ab	2.85a
	T0	0.45a	1.58c	4.29b	3.86b	2.74a
浚单 22 Xundan 22	CK	0.28a	1.64a	4.56a	3.68a	2.51a
	T1	0.30a	1.48b	4.32b	3.54ab	2.40a
	T0	0.29a	1.29c	4.05b	3.36b	2.35a

#### 2.4 灌水量对夏玉米光合参数的影响

随着灌水量的减少,玉米叶片净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )降低(表 3),叶片水分利用效率( $LWUE$ )呈升高趋势。T1 处理下,四个品种叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  与 CK 相比降幅较小,均未达到显著水平。T0 处理下,各品种叶片光合参数与 CK 差异显著(浚单 22 除外),郑单 958 的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  分别下降了 17.1%、32.6%、29.7% 和 17.8%, 中科 11 下降 13.6%、35.3%、28.1% 和 19.6%, 浚单 20 下降 15.5%、35.2%、35.9% 和 19%, 浚单 22 下降

19.4%、18.2%、22.2% 和 8.2%, 其中郑单 958、中科 11 和浚单 20 的  $P_n$ 、 $G_s$  与  $C_i$  的下降一致,处理间差异显著,浚单 22 的  $P_n$  和  $G_s$  虽降幅较大, $C_i$  却无显著差异,由此可以认定其  $P_n$  的下降是由非气孔因素造成的<sup>[11]</sup>,其余品种  $P_n$  下降的原因则是气孔因素, $P_n$  降幅表现为浚单 22 > 郑单 958 > 浚单 20 > 中科 11。由于蒸腾降低的幅度比光合的大,水分亏缺往往可以提高水分利用效率,与 CK 相比,T0 处理下郑单 958、中科 11、浚单 20、浚单 22 的  $LWUE$  分别提高了 23.1%、33%、30.3% 和 15%,其增幅和大小均表现为中科 11 > 浚单 20 > 郑单 958 > 浚单 22。

表 3 灌水量对夏玉米叶片光合特性的影响  
Table 3 Effects of irrigation on photosynthetic characteristics of summer maize

品种 Cultivar	处理 Treatment	净光合速率	蒸腾速率	气孔导度	胞间 $CO_2$ 浓度	水分利用效率
		$P_n$ /( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	$T_r$ /( $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	$G_s$ /( $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	$C_i$ /( $\mu mol \cdot m^{-2}$ )	$LWUE$ /( $\mu mol \cdot mmol^{-1}$ )
郑单 958 Zhengdan 958	CK	25.1a	4.93a	0.37a	192.1a	5.09b
	T1	23.9a	4.46a	0.33a	179.3a	5.36b
	T0	20.8b	3.32b	0.26b	158.6b	6.27a
中科 11 Zhongke 11	CK	22.1a	4.39a	0.32a	172.3a	5.04b
	T1	21.2ab	3.82a	0.29a	157.9a	5.55b
	T0	19.1b	2.84b	0.23b	138.6b	6.73a
浚单 20 Xundan 20	CK	23.2a	4.45a	0.39a	186.7a	4.88b
	T1	21.1ab	3.92ab	0.33ab	173.6a	5.39ab
	T0	19.6b	3.08b	0.25b	151.2b	6.36a
浚单 22 Xundan 22	CK	22.7a	5.06a	0.27a	165.5a	4.49a
	T1	20.6ab	4.45ab	0.25ab	148.7a	4.63a
	T0	18.3b	4.14b	0.21b	151.9a	4.42a

## 2.5 灌水量对夏玉米叶片 SPAD 值的影响

由表4可以看出,随着生育期的推进,各品种CK和T1处理SPAD值呈单峰曲线变化,吐丝期达到最大值(郑单958除外),而后缓慢下降至灌浆中期,T0处理则为先减少再增加,灌浆中期达到峰值,灌浆中期至成熟期因衰老而迅速下降,且随着灌水量的减少,玉米叶片SPAD值为CK>T1>T0。控水处理前,处理间无显著差异,品种间变异较小,差异不显著;控水处理后,12叶展T0和CK间差异达到

显著水平,与CK相比,郑单958、中科11、浚单20、浚单22叶片SPAD值分别减少8.7%、6.5%、9.5%、12.9%,其中浚单22降幅最大,其余品种降幅较小。吐丝期后,降雨增多,叶绿素含量逐渐恢复,T1处理与CK间无显著差异,T0处理下叶绿素破坏较严重,恢复时间较T1长,除浚单22外,其余品种在成熟期均恢复到CK水平。不同灌水量处理下,夏玉米叶片SPAD值的变化,是对不同水分环境的响应和适应。

表4 不同处理夏玉米穗位叶 SPAD 值的动态变化

Table 4 SPAD change dynamics in ear leaf of summer maize in various treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value				
		7 叶展 7-leaf	12 叶展 12-leaf	吐丝期 Silking	灌浆中期 Mid-filling	成熟期 Maturity
郑单 958 Zhengdan958	CK	51.03a	53.87a	55.53a	55.80a	48.23a
	T1	50.86a	51.51b	54.36a	55.55ab	48.20a
	T0	50.67a	49.15c	52.15b	54.21b	47.36a
中科 11 Zhongke11	CK	51.24a	53.25a	55.67a	55.37a	48.73a
	T1	50.89a	51.68ab	55.02ab	54.83ab	48.13a
	T0	51.13a	49.81b	53.27b	53.94b	47.45a
浚单 20 Xundan20	CK	51.04a	54.46a	56.43a	55.44a	48.85a
	T1	51.43a	52.61ab	55.72a	54.70ab	48.37a
	T0	51.23a	49.27b	52.91b	52.77b	46.92a
浚单 22 Xundan22	CK	50.97a	53.98a	55.62a	55.13a	48.00a
	T1	51.03a	50.60b	54.09a	53.64ab	47.46a
	T0	50.63a	47.04c	50.48b	51.40b	46.23b

## 2.6 灌水量对夏玉米叶片叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光是光合作用的探针,分析荧光参数的变化有助于探明光合机构受影响的部位。从表5可以看出,正常灌水处理下,品种间 $F_o$ 和 $F_v/F_m$ 差异较小,基本维持在同一水平上,随着灌水量的减少,处理间 $F_o$ 略有增加, $F_v/F_m$ 略有降低,但均未达到显著水平,表明光合机构未遭受破坏。

光化学淬灭系数( $qP$ )是对PSⅡ原初电子受体QA氧化态的一种量度,代表PSⅡ反应中心开放数目的比例,反映了PSⅡ天线色素捕获的光能转化为化学能的效率。 $qP$ 愈大,QA<sup>-</sup>重新氧化形成QA<sup>+</sup>的量愈大,即PSⅡ的电子传递活性越大。干旱使 $qP$ 值降低,各处理间表现为:CK>T1>T0,表明玉米经水分亏缺后,PSⅡ反应中心开放部分的比例减少,从而导致了PSⅡ电子传递能力的降低。T0处理下,郑单958、中科11和浚单20 $qP$ 值较大,降幅较小,浚单22 $qP$ 值最小,降幅较大,耐旱能力较差。非光化学淬灭系数( $NPQ$ )反映植物耗散过剩光能的能力。随着灌水量的减少,各处理 $NPQ$ 值增加,但

只有浚单22达到差异显著水平。T0处理下, $NPQ$ 值表现为浚单22>郑单958、浚单20>中科11。干旱胁迫下, $NPQ$ 测定值越小,品种耐旱性越强。

## 2.7 灌水对夏玉米产量的影响

2010年、2011年各灌水处理夏玉米产量趋势基本一致(表6),产量均随灌水量的减少呈降低趋势。2010年夏玉米品种各处理间差异均达到显著水平,与CK相比,T1、T0处理下,郑单958分别减产7.6%、15.9%;中科11减产5.0%、10.9%;浚单20减产6.9%、14.8%;浚单22减产10.5%、19.5%,降幅最大;郑单958、浚单20丰产、稳产性较强,中科11表现出优良的稳产性。干旱可明显导致减产,但产量并不完全与灌水量呈线性关系,容易受气候条件的影响。与2010年相比,2011年低水条件下的产量普遍偏高,正常灌水条件下的产量普遍偏低,CK、T1间无显著差异,CK、T0间差异显著(中科11除外),且各品种T0处理下的减产幅度均远小于2010年的水平。这些差别主要由2011年的气候造成的,玉米吐丝期、灌浆期是产量形成的最关键阶段,而此

阶段降雨量占玉米整个生育期的 87%，阴雨寡照和低温的影响直接造成产量的降低。正常气候条件下，干旱导致产量的显著降低，丰产稳产性高的品种

抗旱性较强；多雨条件下，干旱对产量的影响减弱，产量高的品种表现出对异常气候较好的适应性。

表 5 灌水量对夏玉米叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 5 Effects of irrigation on chlorophyll fluorescence parameters of summer maize

品种 Cultivar	处理 Treatment	初始荧光 $F_o$	PSII 最大光化学效率 $F_v/F_m$	光化学淬灭系数 $qP$	非光化学淬灭系数 $NPQ$
郑单 958 Zhengdan958	CK	134a	0.839a	0.811a	0.183a
	T1	137a	0.835a	0.722ab	0.199a
	T0	149a	0.815a	0.685b	0.218a
中科 11 Zhongke11	CK	143a	0.824a	0.803a	0.151a
	T1	144a	0.827a	0.718ab	0.168a
	T0	155a	0.815a	0.678b	0.195a
浚单 20 Xundan20	CK	140a	0.834a	0.806a	0.151a
	T1	142a	0.832a	0.739ab	0.177a
	T0	152a	0.818a	0.668b	0.209a
浚单 22 Xundan22	CK	153a	0.831a	0.803a	0.172b
	T1	158a	0.827a	0.613b	0.201ab
	T0	171a	0.810a	0.583b	0.235a

表 6 不同灌水处理下的玉米产量

Table 6 Yield of summer maize under different irrigation treatments

年份 Year	品种 Cultivar	产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
		CK	T1	T0
2010	郑单 958 Zhengdan958	8955.0a	8277.0b	7531.2c
	中科 11 Zhongke11	7411.5a	7039.1ab	6603.0b
	浚单 20 Xundan20	8470.2a	7888.3b	7215.3c
	浚单 22 Xundan22	8236.7a	7368.0b	6627.2c
2011	郑单 958 Zhengdan958	7561.5a	7323.1ab	7008.0b
	中科 11 Zhongke11	6755.3a	6595.4a	6372.4a
	浚单 20 Xundan20	7344.0a	7087.1ab	6823.5b
	浚单 22 Xundan22	7060.2a	6669.0ab	6252.1b

注：同一行内同一品种标以不同字母的数据处理间差异显著 ( $n=3$ )。

Note: In each cultivar, values followed by a different letter within a line are significantly different at 0.05 probability level ( $n=3$ ).

### 3 讨论

光合作用是植物最基本的生命活动，是植物合成有机物质和获取能量的根本源泉，可以反映植株的生长势和抗旱性强弱<sup>[1,12]</sup>。通常将影响植物光合作用的因子分为气孔因子和非气孔因子。Farquhar 等<sup>[13]</sup>研究认为，当光合作用下降时，如果胞间 CO<sub>2</sub> 浓度降低，而气孔阻力升高，说明光合速率的降低主要是由气孔限制所致，否则为非气孔限制引起。本试验中，在 T1 处理下，四个品种叶片  $P_n$ 、 $Tr$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  与 CK 间无显著差异，这可能是由于生育前期中度补灌对吐丝期的后效性减弱，也可能是由吐丝前降

雨造成的；在 T0 处理下，郑单 958、中科 11、浚单 20 玉米叶片  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均下降，气孔限制是  $P_n$  下降的主要原因，而浚单 22 玉米叶片  $P_n$ 、 $G_s$  下降， $C_i$  却无显著变化，说明此时非气孔限制已成为促使光合速率降低的主要因子， $P_n$  降幅表现为浚单 22 > 郑单 958 > 浚单 20 > 中科 11，表明中科 11 受到气孔限制程度最小。叶片水分利用效率 ( $LWUE$ ) 能表征植物对自身蒸腾耗水量的利用能力。随着补灌量的减少，玉米在降低  $P_n$  的同时更大程度地降低了  $Tr$ ，因而  $LWUE$  提高。表明玉米能通过控制气孔的开放程度去响应和适应环境的变化。

叶绿素是植物光合作用过程中吸收光能的主要物质,干旱条件下叶绿素分解且合成受阻,含量降低<sup>[14]</sup>,在降雨的作用下,夏玉米生育中后期叶绿素含量逐渐恢复,处理间差异减小。正常情况下,叶绿素吸收的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光、热耗散三种途径来消耗,这三种途径间存在着此消彼长的关系,因此叶绿素荧光变化可以反映光合作用的情况。 $F_o$  代表色素所吸收的光能中不参与光化学反应的能量,与 PS II 的受损状况有关,PS II 的破坏和可逆失活可引起  $F_o$  的增加<sup>[15]</sup>。随着补灌量的减少, $F_o$  略有增加,但处理间差异并不显著,表明光合机构未遭到破坏。在非胁迫条件下  $F_v/F_m$  的变化极小,不受物种和生长条件的影响,胁迫条件下该参数明显下降<sup>[16]</sup>,Lu 等<sup>[17]</sup>却发现小麦在中度和严重水分胁迫下  $F_v/F_m$  也不发生明显的变化,与本研究的结果类似,同时结合  $F_o$  的测定结果,表明亏缺补灌未造成光合作用原初反应过程的破坏。光化学淬灭系数  $qP$  在一定程度上反映了 PS II 反应中心的开放程度,而非光化学淬灭系数  $NPQ$  是光合机构的一种自我保护机制。本研究表明,随着补灌量的减少  $qP$  降低,仅 CK、T0 间达到显著差异(浚单 22 除外),降幅表现为浚单 22 > 郑单 958、浚单 20 > 中科 11,中科 11、郑单 958、浚单 20 下降幅度小,说明干旱胁迫下三个品种光能捕获与转化能力强,也是其在干旱胁迫下有较高产量的光合生理原因,这与  $P_n$  的变化相协调。玉米受到胁迫后, $NPQ$  不同程度上升,是 PS II 将过剩的光能以热的形式耗散,以保护 PS II 的功能<sup>[18]</sup>。与上述结果不同,胁迫下  $NPQ$  略有增加,但处理间差异不显著,可能是多雨弱光低温的特殊气候造成的,降低了植物对非辐射能耗散的需求。

光合作用是极其复杂的过程,干旱对其影响的途径更是多种多样,但干旱对作物的影响最终会体现在产量上。干旱胁迫下玉米叶片光合作用和光能转化率降低,是作物减产的主要原因。抗旱性强的品种光合特性比抗旱性弱的品种受干旱影响程度小,产量减少的幅度也就小,抗旱性表现:中科 11 > 郑单 958、浚单 20 > 浚单 22。由于受到区域气候的影响,多雨年份,适量中水补灌可以起到节水稳产的作用。

#### 参考文献:

- [1] 徐大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002: 4-9.
- [2] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:24-28.
- [3] Efeoglu B, Ekmekci Y, Cicek N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery[J]. South African Journal Botany, 2009, 75:34-42.
- [4] Ephraim J E. The effects of drought stress on leaf elongation, photosynthetic and transpiration rates in maize leaves[J]. Photosynthetica, 1991, 25:607-619.
- [5] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: Some new advances[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2002, 21:1-30.
- [6] Zheng Shenghua, Yan Changrong. The ecophysiological and morphological characteristics of maize in seedling stage under water stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4):1138-1143.
- [7] 颜建明, 郁继华, 黄高宝, 等. 低温弱光下辣椒叶片 PS II 光能吸收和转换变化及与品种耐性的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9):1855-1862.
- [8] Jung S, Steffen K L, Lee H J. Comparative photoinhibition of a high and a low altitude ecotype of tomato to chilling stress under high and low light conditions[J]. Plant Science, 1998, 134:69-77.
- [9] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4):444-448.
- [10] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer[J]. Photosynthesis Research, 1986, 10:51-62.
- [11] 李 耕, 高辉远, 董树亭, 等. 灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光系统活性的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(10):1916-1922.
- [12] Sharp R E, Poroyko V, Hejlek L G, et al. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407):2343-2351.
- [13] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33:317-345.
- [14] Borrell A K, Hammer G L. Does maintaining green leaf area sorghum improve yield under drought[J]. Crop Science, 2000, 40: 1037-1048.
- [15] 张雷明, 上官周平, 毛明策, 等. 长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 695-698.
- [16] 许大全, 张玉忠, 张荣统. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(4):237-243.
- [17] Lu C M, Zhang J H. Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1999, 50:1199-1206.
- [18] 卜令铨, 张仁和, 常 宇, 等. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(5):1184-1192.

## Effects of complementary irrigation on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in summer maize

WANG Ce, WANG Zhi-qiang, ZHANG Zhi-wei, LIN Tong-bao\*

(College of Agronomy, Henan Agricultural University, Key Laboratory of Physiology, Ecology and Genetic Improvement of Food Crops in Henan Province, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**Abstract:** Pool experiment was conducted to investigate the responses of photosynthetic characteristics, chlorophyll fluorescence parameters, and yield of summer maize to different supplemental irrigations using four cultivars of Zhengdan958, Zhongke11, Xundan20 and Xundan22 as materials. Maize growth was inhibited following the supplemental irrigations was reduced. Leaf area index, net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $Tr$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), chlorophyll relative content ( $SPAD$ ) and photochemical quenching ( $qP$ ) also decreased, while the leaf water use efficiency ( $LWUE$ ) increased with the decreasing of irrigation. The difference between normal irrigation and moderate deficit was not significant, while that between normal irrigation and severe deficit was significant. The initial fluorescent ( $F_o$ ), PS II biggest photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ) and non-photochemical quenching ( $NPQ$ ) showed insignificant changes. The results indicated that the reduction in photosynthetic capacity and light energy transfer efficiency were the main factors for the loss in yield. However, various cultivars showed different changing amplitude, the smaller changing amplitude showed less influence by drought stress and relatively stronger drought resistance. Cultivars performance on drought resistance is Zhongke11 > Zhengdan958 and Xundan20 > Xundan22. Because of regional climate effects, moderate supplementary irrigation play key roles in saving water and stabilizing production under seasonal drought condition.

**Keywords:** summer maize; complementary irrigation; photosynthesis; chlorophyll fluorescence; yield

(上接第 98 页)

## Effects of simulated acid rain on photosynthetic characteristics and yield of spring wheat at flowering stage

ZHANG Jian<sup>1</sup>, WANG He-ling<sup>2</sup>

(1. Dingxi Dryland Agricultural Research and Extension Center, Dingxi, Gansu 743000, China;

2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** Spring wheat at flowering stage was sprayed with simulated acid rain at different pH levels of 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 and 5.6, and then, the yield and the photosynthetic parameters of spring wheat leaves were monitored. The results indicate: The net photosynthetic rate reduces in the range of 24.20% ~ 58.23%, stomatal conductance reduces in the range of 35.90% ~ 58.37%, transpiration rate reduces in the range of 36.70% ~ 56.69%, intercellular  $CO_2$  concentration increases in the range of 73.26% ~ 101.06%, the chlorophyll relative content reduces in the range of 1.96% ~ 15.99%, and the yield of spring wheat reduces in the range of 12.54% ~ 32.53%. The effect of simulated acid rain on photosynthetic characteristics of spring wheat leaves increases more and more remarkable with the increase of hydrogen ion concentration. The pH values of simulated acid rain are significantly positively correlated with net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, relative chlorophyll content and the yield, while they are significantly negatively correlated with intercellular  $CO_2$  concentration.

**Keywords:** simulated acid rain; spring wheat; water use efficiency; photosynthetic characteristics; yield