

连旱对夏玉米叶绿素荧光特性、 产量和水分利用效率的影响

李彦彬, 卢争光*, 李道西, 周庭全, 侯皓森, 刘欢, 杨沛文
(华北水利水电大学, 郑州 450046)

摘要:【目的】探明连续干旱胁迫对夏玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率(WUE)的影响,为夏玉米抗旱稳产提供理论指导。【方法】选用夏玉米“DHA757”为供试品种,在拔节期(B)、抽雄期(C)和灌浆期(G)设置不同程度的干旱处理,分别为:正常(CK)、轻旱(1)、中旱(2)、重旱(3),分别对应田间持水率(FC)的(70%, 80%]、(60%, 70%]、(50%, 60%]、(40%, 50%]。通过移动防雨棚下桶栽的方式控水,试验设置拔节期单旱2个,两阶段连旱(拔节—抽雄期)3个,三阶段连旱(拔节—抽雄—灌浆期)3个,研究了连旱胁迫对夏玉米耗水量、SPAD、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、产量和WUE的影响。【结果】与CK相比,连旱胁迫显著降低了夏玉米的耗水量、SPAD、 F_v/F_m 和 F_v/F_o ,且降幅随干旱程度的加剧而增大。不同干旱处理均会造成夏玉米减产,在拔节期单旱处理下,B3减产最明显,B2次之;两阶段连旱和三阶段连旱处理下,轻旱减产不明显,其他干旱程度均导致产量显著降低。WUE在B2、B1C1、B2C2处理下相比CK分别增加了5.1%、2.8%、6.3%,说明低程度干旱有助于WUE的提高。【结论】综合考虑产量和WUE,拔节期中旱(50%~60%FC)和拔节—抽雄期两阶段连续轻旱(60%FC~70%FC)是节水和保障粮食安全的适宜选择。

关键词: 连旱; 夏玉米; 叶绿素荧光特性; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022333

OSID:



李彦彬, 卢争光, 李道西, 等. 连旱对夏玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 26-31, 39.

LI Yanbin, LU Zhenguang, LI Daoxi, et al. Effect of Prolonged Drought on Chlorophyll Fluorescence, Yield and Water Use Efficiency of Summer Maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 26-31, 39.

0 引言

【研究意义】玉米作为我国第一大粮食作物,对粮食生产和经济发展至关重要。华北平原是我国夏玉米种植的主要区域,种植面积占全国总种植面积的30%^[1]。夏玉米生育期跨越夏秋2季,与汛期时节交叉,但近年来温室效应引起的气候变异导致华北平原持续干旱等极端气候事件频发,干旱已成为该地区夏玉米减产的主要原因之一^[2-3]。因此,从不同生育阶段出发,探讨连续干旱胁迫对夏玉米生长及产量的影响,对华北地区夏玉米抗旱节水栽培和稳产具有重要意义。【研究进展】李波等^[4]研究发现,光合作用是夏玉米进行干物质积累的重要过程,而叶绿素量直接影响叶片光合能力。李晓等^[5]研究表明,干旱胁迫主要通过2个方面影响夏玉米的光合作用,一是引发光

合效应异常,二是影响光合电子传递;而叶绿素荧光可用来判断光合功能。叶绿素荧光动力学技术能够反映光合作用中光系统对光的吸收、转化、传递、耗散等过程,被称为光合作用的探针,因具有快速且对植物叶片无损伤等特点,被广泛应用于作物干旱研究^[6-7]。鲁晓民等^[8]、姚春霞等^[9]研究发现,当玉米发生干旱胁迫时,其叶片叶绿素相对量(SPAD)、原初最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II潜在活性(F_v/F_o)均会降低,且重旱处理下降显著。玉米的受旱程度和时期不同对产量和水分利用效率(WUE)的影响也不同。Gheysari等^[10]研究发现,在夏玉米拔节期施加水分胁迫会导致产量下降,干旱程度越大减产越严重。梁烜赫等^[11]研究也表明,灌浆期中度和重度水分胁迫对玉米的形态指标及干物质积累量均有显著影响。陈金平等^[12]在研究不同灌水处理对夏玉米WUE和产量的影响时发现,灌拔节水 and 灌浆水处理的总耗水量显著低于灌苗期水、拔节水、灌浆水和成熟期水的处理,产量分别下降8.0%和8.9%,WUE则分别提高5.3%和0.5%。郑孟静等^[13]研究也表明,在限水灌溉条件下,通过提高灌水频次可提高夏玉米的产量和WUE。【切

收稿日期: 2022-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179015); 河南省重大科技专项(201300311400); 华北水利水电大学研究生创新课题(YK-2021-26)

作者简介: 李彦彬(1973-),男,教授,博士生导师,主要从事农业水资源高效利用与防灾减灾研究。E-mail: liyb101@sina.com

通信作者: 卢争光(1995-),男,硕士研究生,主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: 1024574819@qq.com

入点】目前,国内外关于夏玉米干旱胁迫的研究较多,大多集中在干旱对单个生育阶段的生长指标或生理指标的影响,而针对多阶段连旱的研究较少,不同生育阶段连续干旱胁迫对夏玉米生理特性和产量的影响机制尚不清楚。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究基于桶栽试验,探讨连旱程度与持续时间对夏玉米生理特征和产量的影响,分析叶绿素荧光参数、产量和水分利用效率对连旱的反馈机制,为夏玉米抗旱稳产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 6—10 月在华北水利水电大学龙子湖校区农业高效用水实验室的移动防雨棚中进行,试验区(34°78'N, 113°78'E)位于河南省郑州市金水区,属暖温带大陆性季风气候,海拔 80 m。试验期间平均气温为 24.0 °C,最高气温为 41.3 °C,最低气温为 9.4 °C,总降水量为 1 031.6 mm,平均相对湿度为 75.7%,平均风速为 0.55 m/s,平均日照时间为 6.6 h。试验地土壤类型为壤土,0~20 cm 土层的土壤 pH 值为 8.38,有机质量为 4.70 g/kg,全氮量为 0.37 g/kg,速效氮量为 61.46 mg/kg,速效磷量为 27.70 mg/kg,

速效钾量为 73.27 mg/kg。

1.2 试验设计

以夏玉米为供试材料,选用华北地区广泛推广种植的国审玉米品种“DHA757”,该品种具有耐热、抗倒伏、产量高等特点,由河南大司农生物科技有限公司提供。试验采用桶栽土培法,桶装土干体积质量为 1.31 g/cm³,桶为铁质圆柱形,分外、内双桶(外桶作为内桶的保护桶,防止地下水渗透腐蚀内桶),外桶内径 40 cm,高 60 cm,桶体埋入土中,上沿高出地面 5 cm;内桶内径 37 cm,高 60 cm。夏玉米于 6 月 22 日播种,每桶播种 4 粒,在出苗后至三叶一心期定苗,每桶定苗 1 株,于 10 月 9 日收获,全生育期 109 d。每桶施复合肥 10 g(N-P₂O₅-K₂O:28-5-7)。参照朱亚南等^[14]的水分处理设定,在夏玉米拔节期(7 月 26 日—8 月 16 日)、抽雄期(8 月 16 日—9 月 2 日)和灌浆期(9 月 2—17 日)3 个生育阶段设置不同程度的干旱,即正常、轻旱、中旱和重旱,分别对应田间持水率的(70%, 80%], (60%, 70%]、(50%, 60%] 和(40%, 50%]。试验设置了拔节期单旱 2 个,两阶段连旱 3 个,三阶段连旱 3 个,对照(CK)1 个,共计 9 个处理,每个处理设置 3 个重复,共计 27 个测桶。详细的试验设计如表 1 所示。

表 1 桶栽试验设计

Table 1 Barrel planting experiment design

序号	处理编号	试验处理的水平					备注
		播种到三叶期 (34 d) ^c	拔节期 (21 d)	抽雄期 (17 d)	灌浆期 (15 d)	成熟期 (21 d)	
1	B ^a 2 ^b	正常	中旱	正常	正常	正常	拔节期单旱
2	B3	正常	重旱	正常	正常	正常	
3	B1C1	正常	轻旱	轻旱	正常	正常	两阶段连旱
4	B2C2	正常	中旱	中旱	正常	正常	
5	B3C3	正常	重旱	重旱	正常	正常	三阶段连旱
6	B1C1G1	正常	轻旱	轻旱	轻旱	正常	
7	B2C2G2	正常	中旱	中旱	中旱	正常	
8	B3C3G3	正常	重旱	重旱	重旱	正常	对照
9	CK	正常	正常	正常	正常	正常	

注 a. B、C、G 分别表示拔节期、抽雄期、灌浆期,下同; b. CK 表示对照,1、2、3 分别表示轻旱处理、中旱处理、重旱处理,下同; c. “34 d”表示该生育阶段持续的天数,下同。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 土壤含水率的监测

自拔节期开始,于每个生育阶段初期用土钻法取土 1 次,取土深度分别为 0~10、10~30、30~50 cm,采用烘干法测定土壤含水率,将 3 个土层含水率的平均值作为该阶段土壤含水率初始值。通过自然蒸发和定量灌水将土壤含水率控制为轻旱、中旱和重旱 3 个水平;通过吊称桶质量控制土壤水分在指定范围,当土壤含水率低于范围下限时,使用量杯补水至范围上限。不同生育阶段内第 1 次的灌水量根据烘干法得到的土壤含水率值计算,见式(1),第 2 次及之后的灌

水量根据称质量法计算,见式(2):

$$m_1 = \frac{\gamma H A (\theta_{\pm} - \theta_1)}{1000}, \quad (1)$$

$$m_i = G_1 + m_1 - G_i, \quad i=2, \dots, n, \quad (2)$$

式中: m_1 为生育阶段内第 1 次灌水量(kg),若 $\theta_{\pm} - \theta_1 < 0$,则 m_1 取 0; γ 为土壤干体积质量,为 1.31 g/cm³; H 为计划湿润层深度,为 50 cm; A 为内桶横截面积,为 1 075 cm²; $\theta_{\pm}$ 为生育阶段内计划土壤含水率的上限; θ_1 为生育阶段内第 1 次灌水前的土壤含水率; m_i 为生育阶段内第 2 次及之后的灌水量(kg), i 为灌水次数; G_1 为生育阶段内第 1 次灌水前的内桶与土壤质量之

和 (kg); G_i 为生育阶段内第 2 次及之后灌水前的内桶与土壤质量之和 (kg)。

1.3.2 叶绿素荧光特性

1) SPAD。在三阶段连旱处理末期选择晴朗无风的天气 (9 月 15 日), 在 09:00—11:00 时段, 使用 SPAD-502Plus 便携式叶绿素仪测定叶片 SPAD 值, 分别在叶根部、叶中部和叶尖测量, 记录平均值, 每个处理测量 3 株。

2) 荧光参数。测量日期和时间同 SPAD。使用超便携调制叶绿素荧光仪 MINI-PAM-II 测定标记叶荧光参数。测量前先对叶片进行暗适应 20 min, 饱和脉冲光调至为 5 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 时间设定为 0.6 s, 测定 F_v/F_m (原初最大光化学效率) 和 F_v/F_o (PS II 潜在活性) 等参数。 F_o 是初始荧光, F_m 是最大荧光产量, $F_v = F_m - F_o$ 是可变荧光^[15]。

1.3.3 产量

夏玉米籽粒成熟后, 以桶为单位进行收割, 然后在实验室内进行烘干、脱粒, 并记录经济产量。

1.3.4 耗水量及水分利用效率

灌水前对测桶进行吊装称质量, 通过测桶质量变化估算作物耗水量, 生育阶段内每次灌水间隔为 1~3 d。由于试验是在挡雨棚下进行且为双桶设计, 因此不考虑降水、地下水补给和向下排水, 耗水量等于蒸散量, 因此夏玉米耗水量的计算如式 (3) 所示:

$$W = ET = \frac{10\,000 \sum m_i}{gA} - \Delta W, \quad (3)$$

式中: W 为夏玉米生育阶段内的耗水量 (mm); ET

为蒸散量 (mm); $\sum m_i$ 为生育阶段内的总灌水量 (kg); g 为水的密度, 为 1 000 kg/m^3 ; ΔW 为生育阶段始末计划湿润层 (0~50 cm) 中的储水变化量 (mm)。

水分利用效率计算如式 (4) 所示:

$$WUE = \frac{10^7 Y}{WA}, \quad (4)$$

式中: WUE 为水分利用效率 (kg/m^3); Y 为经济产量 (kg)。

1.4 统计分析

运用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理和绘图, 采用 SPSS 22.0 软件进行差异性分析, 利用 LSD 多重比较法检验叶绿素荧光参数、产量、 WUE 的统计学差异。

2 结果与分析

2.1 连旱胁迫对耗水量的影响

图 1 为不同干旱胁迫处理下的夏玉米耗水量。单旱和连旱均会导致耗水量下降, 拔节期单旱处理下, B2、B3 处理的耗水量相比 CK 分别降低 12.7%、10.1%, B2 和 B3 处理无显著差异; 两阶段连旱处理下, B1C1、B2C2 处理的耗水量较 CK 分别降低 8.6%、22.6%, B3C3 处理的降幅较 B2C2 处理略有上升; 三阶段连旱处理下, B1C1G1、B2C2G2、B3C3G3 处理的耗水量较 CK 降低, 降幅分别为 8.7%、24.3%、29.1%。相同干旱程度下, 耗水量表现为拔节期单旱 > 两阶段连旱 > 三阶段连旱, 可见干旱时间越长作物耗水量越低。

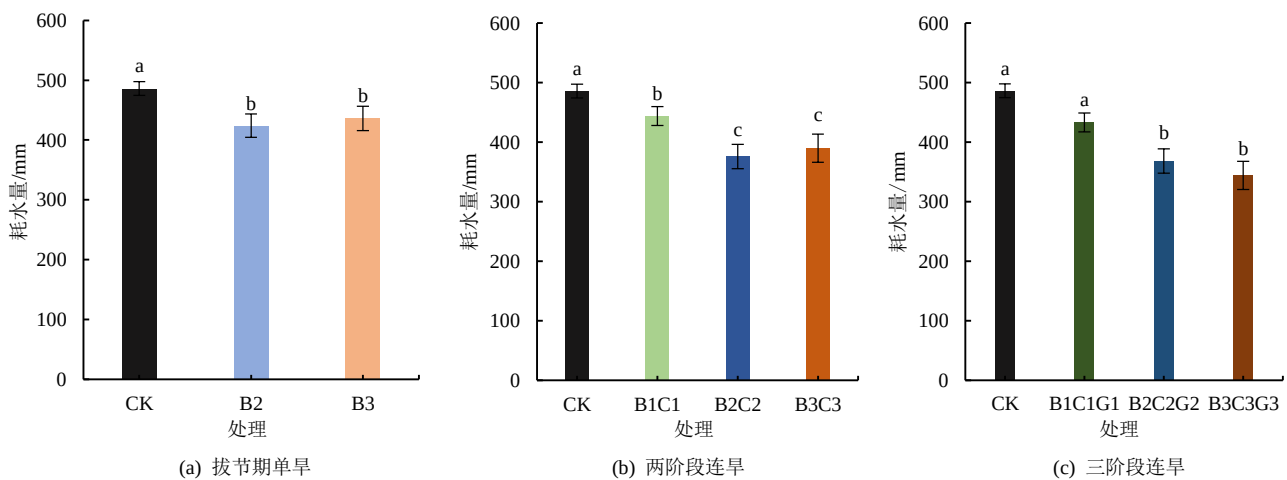


图 1 连旱胁迫处理下夏玉米的耗水量

Fig.1 Water consumption of summer maize under continuous drought stress treatments

2.2 连旱胁迫对夏玉米叶片 SPAD 的影响

图 2 为不同干旱胁迫处理下的夏玉米叶片 SPAD 变化情况。单旱和连旱均降低了叶片 SPAD, 且干旱程度越大降幅越大。与 CK 相比, B1C1、B2C2 处理叶片 SPAD 显著降低了 6.3%、11.9%, B1C1G1、

B2C2G2 处理的降幅略有下降, 为 1.0%、9.8%, 与 CK 之间的差距逐渐缩小, 出现了干旱适应现象。重旱处理下的 SPAD 持续下降, 可见即使玉米叶片出现干旱适应, 但在连续重旱胁迫下其 SPAD 仍会降低。

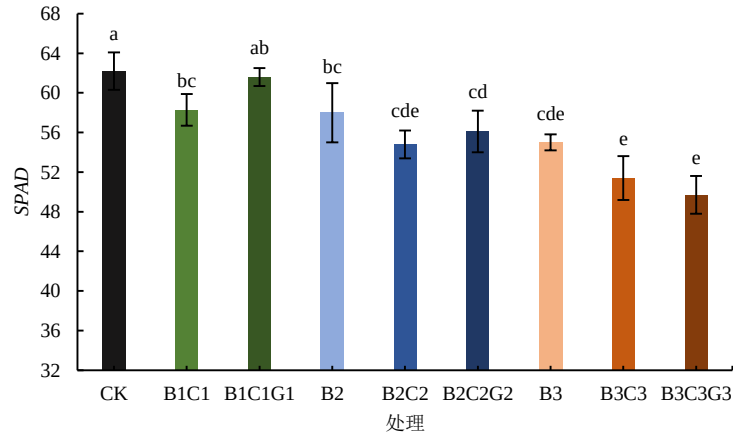


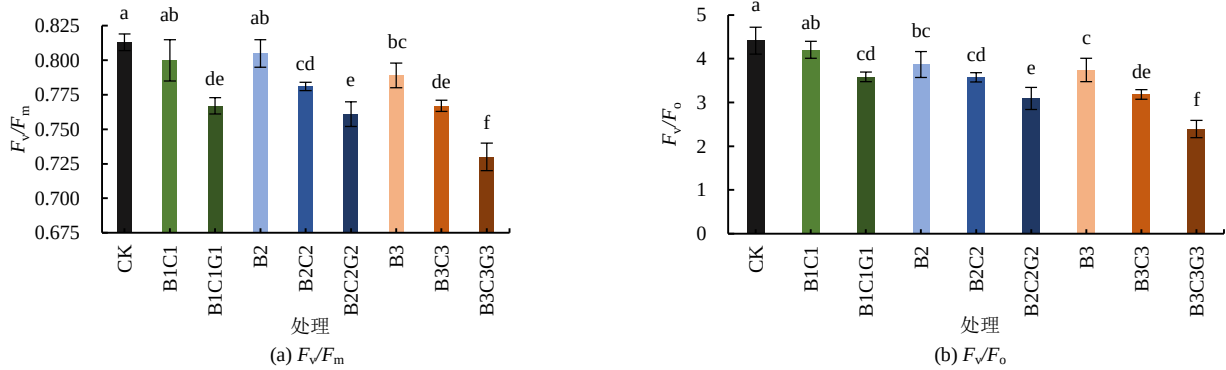
图2 连旱胁迫处理下夏玉米叶片 SPAD

Fig.2 SPAD of summer maize leaves under continuous drought stress treatments

2.3 连旱胁迫对荧光参数 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的影响

图3是不同干旱胁迫处理下夏玉米叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 。单旱与连旱均会引起 F_v/F_m 和 F_v/F_o 降低，且降幅与干旱程度、干旱时间呈正比。与CK相比，连续中旱和连续重旱对 F_v/F_m 、 F_v/F_o 的影响均达到了显著水平，且以B3C3G3处理的降幅最大，分别降低

10.2%和 45.7%。无论是轻旱、中旱还是重旱处理，三阶段连旱的降幅均大于两阶段连旱，这与SPAD的变化趋势一致。B1C1处理的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 均与CK差异不显著，说明两阶段连续轻旱对叶片原初最大光化学效率和潜在活性影响较小，而干旱时间越长，原初最大光化学效率和潜在活性越低。

图3 连旱胁迫处理下夏玉米叶的 F_v/F_m 和 F_v/F_o Fig.3 F_v/F_m and F_v/F_o of summer maize leaves under different drought stress treatments

2.4 连旱胁迫对产量和水分利用效率的影响

图4是连旱胁迫下的夏玉米产量及WUE。只要在生长阶段存在干旱胁迫，就会造成夏玉米减产，并且降幅与干旱时间、干旱程度呈正比。各处理产量为94.2~47.3 g/桶，其中CK产量最高，B3C3G3处理产量最低。与CK相比，轻旱程度下，B1C1处理的产

量下降了 5.9%，降幅不显著，而 B1C1G1 处理的产量下降了 20.0%，降幅显著；中旱程度下，B2 处理产量下降了 8.3%，减产不明显，而 B2C2、B2C2G2 处理下的产量显著降低 17.7%、27.7%；重旱程度下，B3、B3C3、B3C3G3 处理分别显著减产 23.2%、41.6%、49.8%。

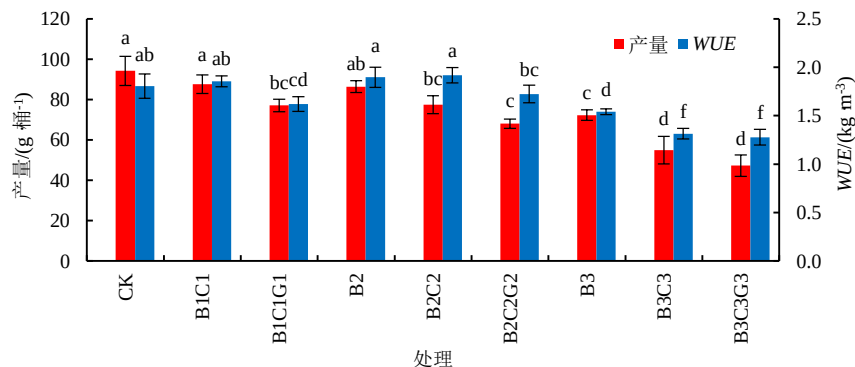


图4 连旱胁迫处理下夏玉米的产量及 WUE

Fig.4 Yield and WUE of summer maize under continuous drought stress treatments

B3C3、B1C1G1 处理和 B3C3G3 处理的 WUE 明显低于 CK, 而 B2、B1C1 处理和 B2C2 处理的 WUE 则相比 CK 分别增加了 5.1%、2.8% 和 6.3%。可见, 拔节期中旱、两阶段连续轻旱和连续中旱胁迫可以增加夏玉米 WUE 。B3C3 处理的 WUE 低于 B3C3G3 处理, 表明当干旱程度达到重旱时, 抽雄期干旱结束后复水并不能有效地提高夏玉米的 WUE 。综合考虑产量和 WUE , B2 处理和 B1C1 处理的表现最好。

3 讨论

叶绿素是植物捕捉光能的重要因子, 受干旱影响很大。刘承等^[16]在研究水分胁迫及复水对不同耐旱性玉米生理特性的影响时发现, 严重的干旱胁迫会破坏叶绿素结构, 导致叶绿素量降低, 影响光能转化和固定过程。本研究表明, 干旱降低了叶片 $SPAD$ 值, 且连续中旱及以上程度干旱对 $SPAD$ 值的影响达到了显著水平, 连续重旱处理较连续轻旱处理对 $SPAD$ 值的影响更大, 与前人研究结果^[17]一致。本研究还发现, 在轻旱和中旱程度下, 三阶段连旱较两阶段连旱的 $SPAD$ 值有所回升, 与 CK 之间的差距逐渐缩小, 呈“U”型变化趋势, 而重旱处理下的 $SPAD$ 值则持续降低。这一结果在一定程度上反映了植物叶绿素对干旱的适应现象, 即当干旱程度由轻旱上升到中旱时, 激发了植物叶片的应激机制, 造成叶绿素量小幅度上升^[18]; 当干旱程度持续加剧时, 植株体内的渗透势平衡遭到破坏, 引起细胞严重失水, 影响了叶绿素的合成, 从而引起叶绿素量下降^[19]。

叶绿素荧光参数与光合作用密切相关, 干旱条件下作物光合作用中光系统对光的吸收、传递及能量的释放都可以从荧光参数中得以体现^[20]。张美微等^[21]研究表明, 较高的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 有利于光合作用中光能高效地转化为化学能, 从而提高光合效率, 增加有机物积累量, 而不同生育阶段的水分胁迫则会降低夏玉米叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 。本试验结果表明, 连旱降低了夏玉米叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o , 并且降幅与干旱程度、连旱时间均呈正比, 这与前人研究结果一致^[22]。本研究还发现, 连旱处理下的初始荧光 F_o 随干旱程度的加剧不断上升, 而最大荧光产量 F_m 变化与之相反, 最大光合效率 F_v/F_m 随 F_o 的上升而降低, 在三阶段连续重旱程度下达到谷值, 与宋贺等^[23]研究结果一致。这可能是长时间的水分亏缺状态对植物细胞造成了不可逆的损害, 破坏了 PS II 反应, 导致光化学反应无法吸收足够多的能量, 并且多余能量以热量形式散失, 进而降低了夏玉米叶片 PS II 的光能转换效率和潜在活性^[24]。

邱新强等^[25]指出, 夏玉米产量与耗水量呈良好的二次函数关系, 在适度缺水的情况下会增加 WUE 。同时, 由于供水方式和时期的不同, WUE 也有所不同。本试验研究表明, 连旱处理下, 干旱程度越高, 玉米的水分利用效率就越低。虽然玉米的产量和耗水量随着干旱程度的加剧而减少, 但产量受干旱的影响更大^[26]。与 CK 相比, 拔节期中旱、两阶段连续轻旱和连续中旱胁迫增加了夏玉米的 WUE , 这可能是在作物生长发育的某些阶段, 适当的干旱胁迫可以调节作物的生长过程, 并将同化产物分配到不同的组织和器官中, 从而达到提高水分利用效率的目的^[27]。本试验采用桶栽土培方式, 桶体积较小, 试验条件具有一定的局限性, 与实际大田存在一定的差异, 故试验结果还需进一步结合大田试验研究。

4 结论

1) 连旱破坏了夏玉米叶的叶绿素结构, 导致 $SPAD$ 值、 F_v/F_m 和 F_v/F_o 显著降低, 影响光合作用, 造成减产。

2) 干旱导致夏玉米耗水量减少, 且干旱时间越长耗水量越低。拔节期中旱、两阶段连续轻旱和连续中旱处理增加了夏玉米的 WUE 。

3) 综合考虑产量和 WUE , 在水资源稀缺时, 拔节期中旱 (50%FC~60%FC) 和拔节-抽雄期两阶段连续轻旱 (60%FC~70%FC) 是节水和保障粮食生产的合理选择。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of statistics of the people's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] 董宛麟, 程路, 孙志刚, 等. 夏玉米产量时空变化及气候年型分析[J]. 玉米科学, 2020, 28(5): 110-118.
DONG Wanlin, CHENG Lu, SUN Zhigang, et al. Analysis on temporal and spatial variation of summer maize yield and climatic year pattern[J]. Journal of Maize Science, 2020, 28(5): 110-118.
- [3] 王利民, 刘佳, 张有智, 等. 我国农业干旱灾害时空格局分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 96-105.
WANG Limin, LIU Jia, ZHANG Youzhi, et al. Spatial and temporal pattern analysis of agricultural drought disaster in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 96-105.
- [4] 李波, 李婷, 王铁良, 等. 土壤水分对玉米叶绿素荧光指标的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(3): 14-18, 2.
LI Bo, LI Ting, WANG Tieliang, et al. Effect of soil moisture on chlorophyll fluorescence index of maize[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(3): 14-18, 2.
- [5] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报, 2006(10): 2 186-2 196.
LI Xiao, FENG Wei, ZENG Xiaochun. Chlorophyll fluorescence

- analysis technology and application progress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006(10): 2 186-2 196.
- [6] ALI Q, ASHRA F. Induction of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) due to exogenous application of trehalose: growth, photosynthesis, water relations and oxidative defence mechanism[J]. *Crop Science*, 2011, 197, 258-271.
- [7] 李英浩, 刘景辉, 赵宝平, 等. 干旱胁迫下腐植酸对燕麦叶绿素荧光特性的调控效应[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(4): 26-33.
LI Yinghao, LIU Jinghui, ZHAO Baoping, et al. Regulatory effect of humic acid on chlorophyll fluorescence characteristics of oats under drought stress[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(4): 26-33.
- [8] 鲁晓民, 曹丽茹, 张前进, 等. 不同基因型玉米自交系苗期干旱-复水的生理响应机制[J]. *玉米科学*, 2018, 26(2): 71-80.
LU Xiaomin, CAO Liru, ZHANG Qianjin, et al. Physiological response mechanism of drought rehydration in maize inbred lines of different genotypes at seedling stage[J]. *Journal of Maize Science*, 2018, 26(2): 71-80.
- [9] 姚春霞, 张岁岐, 燕晓娟. 干旱及复水对玉米叶片光合特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 278-283.
YAO Chunxia, ZHANG Suiqi, YAN Xiaojuan. Effects of drought and rehydration on Photosynthetic Characteristics of maize leaves[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 278-283.
- [10] GHEYSAI M, SADEGHI S H, LOESCHER H W, et al. Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 182: 126-138.
- [11] 梁炬赫, 徐晨, 赵鑫, 等. 干旱对不同种植密度玉米生长发育及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(11): 15-19.
LIANG Jinhe, XU Chen, ZHAO Xin, et al. Effects of drought on growth, development and yield of Maize with different planting densities[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(11): 15-19.
- [12] 陈金平, 王和洲, 刘安能, 等. 不同灌水策略对夏玉米水分利用效率和产量构成要素的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(7): 7-13.
CHEN Jinping, WANG Hezhou, LIU Anneng, et al. Effects of different irrigation strategies on water use efficiency and yield components of summer maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(7): 7-13.
- [13] 郑孟静, 张丽华, 翟立超, 等. 限水灌溉下不同灌溉模式对夏玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(2): 203-215.
ZHENG Mengjing, ZHANG Lihua, ZHAI Lichao, et al. Effects of different irrigation patterns on Yield and water use efficiency of summer maize under water limited irrigation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(2): 203-215.
- [14] 朱亚南, 常小雅, 梁萧, 等. 阶段干旱及复水对玉米光合特性的影响[J]. *河南农业*, 2018(8): 29-30.
ZHU Yanan, CHANG Xiaoya, LIANG Xiao, et al. Effects of stage drought and rehydration on Photosynthetic Characteristics of corn[J]. *Agriculture of Henan*, 2018(8): 29-30.
- [15] 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(4): 444-448.
ZHANG Shouren. Significance and discussion of chlorophyll fluorescence kinetic parameters[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999(4): 444-448.
- [16] 刘承, 李佐同, 杨克军, 等. 水分胁迫及复水对不同耐旱性玉米生理特性的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(5): 702-708.
LIU Cheng, LI Zuotang, YANG Kejun, et al. Effects of water stress and rehydration on physiological characteristics of different drought tolerant maize[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(5): 702-708.
- [17] 李芬, 康志钰, 邢吉敏, 等. 水分胁迫对玉米杂交种叶绿素量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2014, 29(1): 32-36.
LI Fen, KANG Zhiyu, XING Jimin, et al. Effect of water stress on chlorophyll content of Maize Hybrids[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2014, 29(1): 32-36.
- [18] 王潜. 玉米茎木质部水力特性对水盐胁迫的响应研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
WANG Qian. Response of water and salt stress to water and salt stress in xylem of maize stalk[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [19] 谢文华, 陈琴, 白璐. 干旱胁迫下3种驱蚊植物营养生长期叶绿素量的变化[J]. *中国测试*, 2017, 43(6): 55-59.
XIE Wenhua, CHEN Qin, BAI Lu. Changes of chlorophyll content of three mosquito repellent plants during vegetative growth under drought stress[J]. *China Measurement & Test*, 2017, 43(6): 55-59.
- [20] 夏璐, 赵蕊, 王怡针, 等. 干旱胁迫对夏玉米光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(3): 102-110.
XIA Lu, ZHAO Rui, WANG Yizhen, et al. Effects of drought stress on Photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(3): 102-110.
- [21] 张美微, 李志源, 鲁振, 等. 吐丝期干旱对夏玉米叶绿素荧光特性和产量的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(4): 924-930.
ZHANG Meiwei, LI Zhiyuan, LU Zhen, et al. Effects of drought at silking stage on chlorophyll fluorescence characteristics and yield of summer maize[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(4): 924-930.
- [22] 肖万欣, 王延波, 谢甫缙, 等. 干旱对玉米自交系叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 54-61.
XIAO Wanxin, WANG Yanbo, XIE Fushe, et al. Effects of drought on chlorophyll fluorescence characteristics of maize inbred lines[J]. *Journal of Maize Science*, 2015, 23(4): 54-61.
- [23] 宋贺, 蒋延玲, 许振柱, 等. 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*, 2019, 39(7): 2 405-2 415.
SONG He, JIANG Yanling, XU Zhenzhu, et al. Responses of photosynthetic physiological parameters of Maize to drought during the whole growth period and drought after jointing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2 405-2 415.
- [24] 周祥利, 陶洪斌, 李梁, 等. 花后水分亏缺对玉米叶绿素荧光动力学参数及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2010, 25(6): 187-190.
ZHOU Xiangli, TAO Hongbin, LI Liang, et al. Effects of water deficit after Anthesis on chlorophyll fluorescence kinetic parameters and yield of maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(6): 187-190.
- [25] 邱新强, 路振广, 张玉顺, 等. 不同生育时期干旱对夏玉米耗水及水分利用效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(27): 68-75.
QIU Xinqiang, LU Zhenguang, ZHANG Yushun, et al. Effect of drought on water consumption and water use efficiency of summer corn in different growth periods[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(27): 68-75.
- [26] 郝卫平. 干旱复水对玉米水分利用效率及补偿效应影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
HAO Weiping. Study on the effect of drought rehydration on water use efficiency and compensation effect of maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [27] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 干旱胁迫对玉米叶片光响应及叶绿素荧光特性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(10): 82-87.
YU Wenyong, JI Ruipeng, FENG Rui, et al. Effects of drought stress on light response and chlorophyll fluorescence characteristics of maize leaves[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(10): 82-87.

measured data was used to calibrate the AquaCrop model. The calibrated model was then used to evaluate how the yield responded to irrigation methods and amounts in normal year, from which we obtained the optimal irrigation scheduling to maximize the yield. **【Result】** Soil water content in the top 0~40 cm soil layer under M1+N2 was higher than that under M1+N1 and M2+N2. The biomass and yield under different treatments were ranked in the order of M2+N2 > M2+N1 > M1+N2 > M1+N1. The R^2 , EF and $RMSE$ between the simulated and measured soil water contents for all treatments were in the range of 0.645~0.907, 0.461~0.779, and 0.021~0.034, respectively. The R^2 , EF and $RMSE$ between the simulated and measured canopy coverage were 0.942~0.992, 0.964~0.990, and 0.463~0.781, respectively. The R^2 , EF and $RMSE$ between the simulated and measured biomass were 0.959~0.984, 0.969~0.986, and 0.507~0.614 t/hm², respectively. The $RMSE$ between the simulated and measured yield and water use efficiency were 0.180~0.890 t/hm² and 0.001~0.003 t/(hm²·mm), respectively. **【Conclusion】** Under conventional drip irrigation, increasing irrigation amount can improve water content in the 0~40 cm soil layer; water content in the 0~40 cm soil layer under conventional irrigation was higher than the mulched treatment when irrigation amount was 20 mm. Mulching or increasing irrigation amount can improve biomass and yield of the summer maize. The AquaCrop model can reproduce the growth of summer maize. The optimal irrigation scheduling to maximize maize yield in the studied region is to irrigate 20 mm of water at seedling stage, 10 mm at heading stage, and 10 mm at filling stage.

Key words: AquaCrop model; summer maize; soil water content; canopy coverage; biomass and yield; WUE

责任编辑: 韩 洋

(上接第 31 页)

Effect of Prolonged Drought on Chlorophyll Fluorescence, Yield and Water Use Efficiency of Summer Maize

LI Yanbin, LU Zhengguang*, LI Daoxi, ZHOU Tingquan, HOU Haosen, LIU Huan, YANG Peiwen

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: **【Objective】** Drought is a common stress faced by crops during their growth. Its impact on crop growth and ultimate yield depends on when droughts occur as well as their duration and severity. This paper is to investigate the impact of prolonged droughts on chlorophyll fluorescence, yield and water use efficiency (WUE) of summer maize, and provide a guidance for enhancing drought resistance and ensuring stable yield of summer maize.

【Method】 Pot experiment was conducted at a site with mobile rain shed covering. Maize variety DHA757 was used as the model plant; the drought was artificially imposed at jointing-stage (B), tasseling stage (C), and filling stage (G), respectively, at normal (CK), light (1), medium (2), or heavy (3) level. There were nine treatments: two drought treatments with different severity occurring only at jointing-stage, three consecutive droughts occurring continuously across jointing and tasseling stages, three consecutive droughts occurring continuously across jointing, tasseling and filling stage, and one control (without drought). In each treatment, we measured water consumption, F_v/F_m , F_v/F_o , yield, and water use efficiency (WUE) of the crop. **【Result】** Continuous drought significantly reduced water consumption, $SPAD$, F_v/F_m , and F_v/F_o of the maize, compared to the control. The decrease in these parameters increased with drought severity. All drought treatments reduced the crop yield. For the single drought treatment at the jointing-stage, the yield reduction of B3 was most significant, followed by B2. For droughts lasting two stages and three stages, light droughts did not result in a significant reduction in yield, but other droughts reduced the yield significantly. Compared to CK, B2, B1+C1 and B2+C2 increased WUE by 5.1%, 2.8% and 6.3%, respectively, indicating that a light drought was beneficial to improving WUE . **【Conclusion】** Considering both yield and WUE , a medium drought at the jointing stage (with soil water content dropping to 50%~60% of the field capacity), and a prolonged drought lasting two stages with the soil water content in the range of 60%~70% of the field capacity are suitable for reducing water evaporation without considerably compromising the yield. Our results provide guidance to help sustain summer maize production in regions susceptible to drought.

Key words: continuous drought; summer maize; chlorophyll fluorescence characteristics; yield; water use efficiency

责任编辑: 韩 洋