

张继波,李楠,邱粲,等.水分临界期持续干旱胁迫对夏玉米光合生理与产量形成的影响[J].干旱气象,2021,39(5):734-741,[ZHANG Jibo, LI Nan, QIU Can, et al. Effect of Continuous Drought Stress During Critical Period of Water on Photosynthetic Physiology and Yield Formation of Summer Maize[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(5):734-741], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2021)-05-0734

# 水分临界期持续干旱胁迫对夏玉米 光合生理与产量形成的影响

张继波<sup>1,2</sup>,李楠<sup>1,2</sup>,邱粲<sup>2,3</sup>,薛晓萍<sup>1,2</sup>

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;

2.山东省气候中心,山东 济南 250031;3.上海师范大学地理系,上海 200234)

**摘要:**试验于2018年夏玉米生长季在临沂设施农业气象试验站自动控制遮雨棚内水分控制场进行,以郑单958(ZD958)为试材,在水分临界期(拔节-开花期)设计5个水分梯度控制试验,模拟研究干旱胁迫对夏玉米光合生理与产量形成的影响。结果表明:水分临界期持续干旱胁迫下,开花期夏玉米叶片叶绿素a含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、株高、叶面积、地上部干物重均降低,且干旱胁迫越重降低幅度越大,T5处理下上述要素分别较T1处理下降42.6%、75.5%、83.2%、65.1%、27.5%、18.2%和44.9%。随着干旱胁迫的加剧,叶片水分利用效率呈先增后降的变化趋势,且在轻度干旱胁迫时最高。持续干旱胁迫下,夏玉米叶、叶鞘获得的养分分配增多,茎、果实、根获得的养分供给减少,植株营养供给与分配的改变不利于夏玉米健壮生长,倒伏风险增加,影响产量形成。此外,持续干旱胁迫下,夏玉米秃尖比、双穗率升高,百粒重、理论产量大幅降低。

**关键词:**水分临界期;持续干旱胁迫;光合生理;产量;夏玉米

**文章编号:**1006-7639(2021)05-0734-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2021)-05-0734

**中图分类号:**S16

**文献标志码:**A

## 引言

玉米是我国广泛种植的重要粮食、饲料和经济兼用作物,其稳产、丰产对保障国家粮食安全具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。在全球变暖背景下,干旱发生频次增多、强度增强<sup>[3]</sup>,干旱已成为限制玉米稳产、丰产的主要因素。拔节-开花期是夏玉米生长的需水临界期,适宜田间持水量为80%左右<sup>[4]</sup>。山东省位于黄淮海东部,雨热同季,但夏季气温高、降水时空分布不均、蒸散量大,季节性干旱时有发生<sup>[5]</sup>,对夏玉米安全生产不利<sup>[6]</sup>。因此,开展夏玉米水分临界期持续干旱胁迫的模拟研究,探究持续干旱胁迫对水分临界期夏玉米光合生理与产量形成的影响,对夏玉米干旱监测、灾害影响评估及防灾减灾意义重大。

关于干旱胁迫对作物光合生理、植株形态、干物质积累与分配等方面的影响研究成果较多<sup>[7-9]</sup>。研

究表明:干旱胁迫下,植株株高降低,单叶叶面积和叶片数减少,总叶面积减小<sup>[10-12]</sup>,叶绿素生物合成受阻,促进叶绿素分解,导致叶片发黄,进而影响叶片光合作用及干物质积累<sup>[13]</sup>,还会造成雌穗吐丝延迟,雌雄发育间隔延长,进而影响受精,败育籽粒数增加<sup>[14-15]</sup>。此外,干旱胁迫还造成玉米叶片SOD、POD和CAT酶活性降低,进而导致活性氧累积,膜脂过氧化产物MDA及叶绿素降解增加,造成叶片光合能力下降,叶片向植株转运的干物质减少,叶干物质分配比例增加,穗、茎干物质分配比例减少,从而加速叶片衰老,不利于籽粒灌浆,最终导致产量下降<sup>[16-18]</sup>。然而,以往干旱胁迫对夏玉米影响的试验研究大多在盆栽条件下进行,限制了玉米根系的生长空间,其研究成果难以推广至大田。为此,本文综合前人研究成果,利用自动控制遮雨棚在夏玉米水

收稿日期:2021-04-29;改回日期:2021-08-15

基金项目:公益性行业(气象)科研专项“干旱气象科学研究——我国北方干旱致灾过程及机理”(GYHY(QX)201506001)、十三五山东重大气象工程项目(鲁发改农经[2017]97号)共同资助

作者简介:张继波(1987—),男,高级工程师,主要从事农业气象服务及研究。E-mail: zhangjb.196267@163.com。

通信作者:薛晓萍(1964—),女,正研级高级工程师,硕导,主要从事农业气象服务及研究。E-mail: xxpdyh@163.com。

分临界期设计水分控制试验,模拟不同水分处理下土壤水分变化规律及干旱发生发展过程,系统研究夏玉米光合生理特性、干物质生产及产量形成对水分临界期持续干旱胁迫的响应,以期为定量评估水分临界期持续干旱胁迫对夏玉米光合生理与产量形成的影响提供一定理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本研究于2018年在临沂设施农业气象试验站的自动控制遮雨棚内水分控制场进行。水分控制场(118°14'54"E、35°28'30"N)共包括15个试验小区,间距0.2 m,小区的长、宽、深均为4 m×4 m×2 m,内壁及底部采用防水材料进行防渗处理,土壤均为砂壤;自动移动式遮雨棚的长、宽、高分别为23 m×14 m×5 m,可东西方向平移,降雨时可自动关闭遮雨棚;为保证遮雨棚遮蔽时夏玉米最大限度接受散射光,遮雨棚顶部及四周安装了85%透光率的阳光板。选用郑单958(ZD958)为玉米试验材料,小区采用完全随机设计。试验地前茬作物为冬小麦,播种前精细整地、造墒,夏玉米于6月11日播种,采用人工点播方式,播种密度60 000株·hm<sup>-2</sup>,播种期基施复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15)统一为300 kg·hm<sup>-2</sup>,播种后水分供应充足,确保苗齐苗壮,各处理田间管理措施一致。

在夏玉米水分临界期设计5个水分梯度处理,分别标记为T1、T2、T3、T4、T5,每个处理重复3次,各处理随机分布,具体设计见图1。各处理20 cm土壤相对湿度在拔节前控制在60%左右,进入拔节后参照临沂夏玉米常年水分临界期(7月20日至8月10日)降水量(143.1 mm)进行水分控制。其中,T1处理10~20 cm土壤相对湿度保持在80%左右,T2、T3、T4、T5处理分别按照常年水分临界期降水量的80%、50%、25%、0%以喷灌形式进行一次补水处理,此后至开花期不再补水,开花期后按照

N				
T3	T2	T1	T4	T5
T1	T5	T3	T4	T2
T2	T4	T5	T1	T3
S				

图1 水分控制场试验小区分布

Fig. 1 Distribution of test regions of water control field

正常农事复水,并进行正常农事管理至夏玉米成熟收获。

### 1.2 测定项目与方法

#### (1) 发育期观测

参照《农业气象观测规范》<sup>[19]</sup>,在夏玉米播种后隔日开展发育期观测。

#### (2) 土壤相对湿度测定

土壤相对湿度,即土壤含水量与田间最大持水量的百分比。夏玉米播种-成熟期,采用烘干称重法,在每月8日、18日、28日测定0~10、10~20、20~30、30~40 cm及40~50 cm土壤相对湿度,每个试验小区重复3次;水分临界期内3日、13日、23日加密测定。

#### (3) 叶绿素含量测定

夏玉米开花期,采用丙酮乙醇法<sup>[20]</sup>,在每个试验小区选择10株长势一致的玉米叶片进行叶绿素含量测定。

#### (4) 叶片光响应曲线测定

夏玉米开花期,利用Li-6400(Li-cor, USA)便携式光合作用测定系统红蓝光叶室(O2B),在晴天09:00—12:00(北京时,下同)测定各处理下3株最新完全展开的叶片,并取平均值。通过开放式气路,将光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)梯度设定为2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、350、300、200、150、100、50、20、0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,叶室CO<sub>2</sub>浓度设定为400 μmol·mol<sup>-1</sup>,测定光合有效辐射梯度下夏玉米功能叶片净光合速率。

采用直角双曲线模型<sup>[21]</sup>,进行光响应曲线拟合,得到最大光合速率及表观量子效率。计算公式如下:

$$P_n = \frac{P_{\max} \times A_q \times I}{P_{\max} + A_q \times I} \quad (1)$$

式中: $P_n$ 、 $P_{\max}$ (μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)分别为净光合速率、最大光合速率; $I$ (μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)为光合有效辐射; $A_q$ 为表观量子效率。将拟合得到的 $P_{\max}$ 、 $A_q$ 回代,得到不同水分处理下夏玉米叶片的光补偿点和光饱和点。

#### (5) 叶片光合参数的测定

夏玉米开花期,利用便携式光合作用测定系统Li-6400(Li-cor, USA)红蓝光叶室(O2B),在晴天09:00—12:00测定各处理下3株最新完全展开的叶片,并取平均。通过开放式气路,设定叶室CO<sub>2</sub>浓度为400 μmol·mol<sup>-1</sup>、PAR为1500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,测定开花期夏玉米功能叶片净光合速率、蒸腾速率 Tr

( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和气孔导度  $\text{Cond}$  ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 计算水分利用效率 (WUE,  $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ ), 表达式如下:

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

#### (6) 植株特性的测定

① 株高和叶面积: 每个试验小区选取长势一致、有代表性的 10 株夏玉米, 在开花期测定其株高和叶面积。叶面积的计算公式如下:

$$A_1 = 0.75L_1 \times W_1 \quad (3)$$

式中:  $A_1$  ( $\text{cm}^2$ ) 为叶面积;  $L_1$ 、 $W_1$  (cm) 分别为叶长和叶宽。

② 地上部干物质积累与分配: 在开花期选取长势一致、有代表性的 10 株夏玉米, 按照茎秆、叶片、叶鞘、雌穗器官分开, 用烘箱  $105\text{ }^\circ\text{C}$  杀青 30 min, 然后  $80\text{ }^\circ\text{C}$  烘至恒重, 称量各器官干重, 计算单株干物质积累量。

③ 根系干重: 在开花期进行夏玉米根系取样, 以植株为中心将长 15 cm、宽 (株距, 按密度计算)、深 20 cm 的土体挖出, 装入 40 目尼龙网袋。然后, 低压水冲洗根系, 剔除杂质后用烘箱  $105\text{ }^\circ\text{C}$  杀青 30 min, 再  $80\text{ }^\circ\text{C}$  烘至恒重, 称量根系干重。

#### (7) 产量结构测定

夏玉米成熟后, 各试验小区随机收获 30 株玉米, 晾晒后进行室内考种, 包括: 秃尖比、双穗率、籽粒重、百粒重, 计算各处理的理论产量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分处理下土壤相对湿度的变化

2018 年夏玉米全生育期降水量为 509.0 mm, 较常年略偏少, 其中 7 月 20 日至 8 月 10 日 (水分临界期) 降水量为 114.8 mm, 较常年水分临界期降水量偏少 19.7%; 平均气温  $26.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 较常年偏高  $1.5\text{ }^\circ\text{C}$  [图 2(a)], 降水和热量条件能够满足水分控制试验需求。

根据夏玉米发育期观测资料, 各处理夏玉米于 7 月 10 日陆续进入拔节期, 由于干旱胁迫导致部分处理发育期推迟, 至 8 月 10 日全部试验小区夏玉米均进入开花期。从图 2(b) 看出, 7 月 10 日进行补水, 7 月 13 日 (补水后) T1、T2、T3、T4 处理下 10~20 cm 土壤相对湿度较 7 月 8 日 (补水前) 明显升高, T1、T2、T3 处理下 10~20 cm 土壤相对湿度在 80% 以上, T4 处理下 10~20 cm 土壤相对湿度约 70%, T5 处理因未补水土壤相对湿度未发生明显变化; 此后至开花期, 除了 T1 处理下 10~20 cm 土壤相对湿度变化不大外, 其他处理的土壤相对湿度均持续降低, 8 月 13 日 T2、T3、T4、T5 处理下 10~20 cm 土壤相对湿度分别较 7 月 13 日降低 36.8%、33.0%、28.3% 和 17.5%。参照土壤水分的干旱判别标准<sup>[22]</sup> (表 1), 夏玉米进入开花期时, T2、T3、T4 处理下 20 cm 土壤相对湿度分别为 53.7%、49.7% 和 43.7%, 达到轻旱水平, T5 处理下 20 cm 土壤相对湿度为 39.2%, 达到重旱水平。

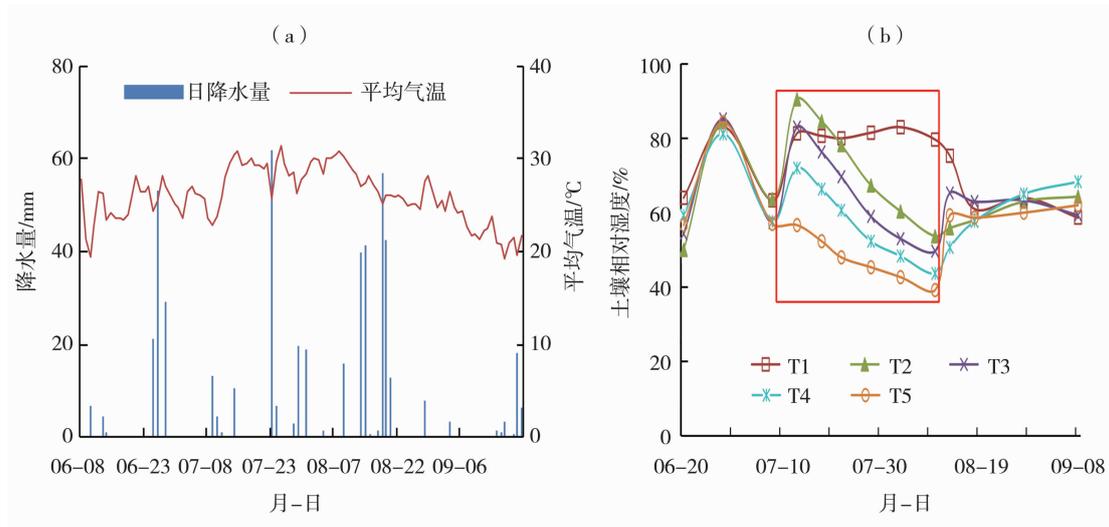


图 2 2018 年夏玉米全生育期气象条件 (a) 及各处理 10~20 cm 土壤相对湿度 (b) 变化 (红色方框为水分控制期)

Fig. 2 The change of meteorological condition (a) and soil relative moisture at 10~20 cm depth under different water treatments (b) in the whole growth period of summer maize in 2018 (The red box is water control period)

表1 基于土壤水分的干旱判别标准  
Tab.1 The evaluation criteria of drought based on soil moisture

干旱状态	土壤相对湿度/%
无旱	RHs > 60
轻旱	40 < RHs ≤ 60
重旱	RHs ≤ 40

## 2.2 开花期叶片叶绿素含量及光合特性对持续干旱胁迫的响应

采用 Duncan 新复极差<sup>[23]</sup>分析方法,对持续干旱胁迫下开花期夏玉米叶片叶绿素(chlorophyll, Chl)

含量的变化进行差异检验。从表2看出,开花期夏玉米叶片 Chla 含量随干旱胁迫的加剧显著降低,干旱胁迫越重,降幅越大,T2、T3、T4、T5 处理下 Chla 含量分别较 T1 处理低 0.47、0.69、0.78、1.01 mg·g<sup>-1</sup>,且 T3、T4 处理差异不显著,但均显著低于 T2 处理、高于 T5 处理;不同水分处理下 Chlb 含量差异不大。另外,T1 处理下 Chla 含量、Chl(a+b)含量及 Chl(a/b)均最高,分别为 2.37、2.85 mg·g<sup>-1</sup>和 4.91,显著高于 T2 处理,而 T5 处理下 Chla 含量、Chl(a+b)含量和 Chl(a/b)均最低,分别为 1.36、1.70 mg·g<sup>-1</sup>和 4.0,除 Chla 含量与 T4 处理差异不显著外,Chl(a+b)含量和 Chl(a/b)均显著低于 T4 处理,且 T3、T4 处理间 Chl(a+b)含量、Chl(a/b)差异均不显著。

表2 持续干旱胁迫对开花期夏玉米叶片叶绿素含量的影响

Tab.2 Effects of continuous drought stress on chlorophyll content of summer maize leaves at the flowering stage

水分处理	Chla/(mg·g <sup>-1</sup> )	Chlb/(mg·g <sup>-1</sup> )	Chl(a+b)/(mg·g <sup>-1</sup> )	Chl(a/b)
T1	2.37 ± 0.145a	0.48 ± 0.042a	2.85 ± 0.157a	4.91 ± 0.144a
T2	1.90 ± 0.113b	0.40 ± 0.105ab	2.30 ± 0.220b	4.73 ± 0.372b
T3	1.68 ± 0.220c	0.36 ± 0.037b	2.04 ± 0.139bc	4.67 ± 0.335b
T4	1.59 ± 0.144c	0.35 ± 0.409b	1.94 ± 0.172c	4.54 ± 0.157b
T5	1.36 ± 0.261cd	0.34 ± 0.344b	1.70 ± 0.184d	4.00 ± 0.220c

注:表身中的字母表示在 0.05 的显著性水平上差异显著,下同。

由图3可知,随着干旱胁迫的加剧,开花期夏玉米叶片  $P_n$ 、Tr 和 Cond 均呈显著降低趋势,T2、T3 处理下  $P_n$ 、Tr 和 Cond 分别较 T1 处理降低 34.0%、47.4%、57.7% 和 40.1%、50.2%、56.9%,差异显著;T5 处理下  $P_n$ 、Tr 和 Cond 均最低,分别较 T1 处理降低 29.84  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、6.62  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、0.32  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且与 T4 处理差异不显著,但显著低于 T1、T2、T3 处理。另外,随着干旱胁迫的加剧,开花期夏玉米叶片 WUE 先升后降,即 WUE 自 T3、T2、T1、T4、T5 依次降低,轻度干旱胁迫的 T3 处理下 WUE 最高,为 5.15  $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ ,分别较 T1、T2、T4、T5 处理高 32.7%、16.4%、56.8% 和 89.3%,T5 处理下 WUE 最低,仅 2.72  $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ ,表明轻度干旱胁迫有利于夏玉米叶片 WUE 的显著提高,而干旱胁迫过重时,WUE 显著降低。

图4是持续干旱胁迫对开花期夏玉米叶片光响应曲线的影响。可以看出,在一定光合有效辐射范围内,随着光合有效辐射的增强,叶片光合速率升高,并在光饱和点达到最大;当光合有效辐射进一步增强时,各处理的光合速率均出现不同程度降低,

T5 处理降幅最大为 14.7%,T1 处理降幅最小为 0.3%,T2、T3、T4 处理降幅分别为 8.8%、3.8% 和 2.2%。此外,干旱胁迫条件下叶片光饱和点显著降低,T1 处理下光饱和点在 1800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,T2、T3、T4、T5 处理下光饱和点分别较 T1 处理降低 11.1%、11.1%、22.2% 和 33.3%。可见,干旱胁迫下夏玉米叶片遭受“光抑制”现象,且随干旱胁迫的加剧,光抑制现象越明显,叶片光合能力不断减弱。

## 2.3 开花期植株形态指标及地上部干物质与分配对持续干旱胁迫的响应

图5是开花期夏玉米株高和叶面积对持续干旱胁迫的响应。可以看出,开花期夏玉米株高随着干旱胁迫加剧而降低,T1处理的株高最高,分别较 T2、T3、T4、T5 处理高 14.7%、19.9%、26.5% 和 27.5%,且 T5 处理的株高显著低于 T2 和 T3 处理,但与 T4 处理无显著差异,表明干旱胁迫可以显著抑制夏玉米株高的生长;随着干旱胁迫的加剧,开花期夏玉米叶面积呈降低趋势,T1 处理的叶面积最大,T5 处理的叶面积最小,T2、T3、T4、T5 处理分别较 T1 处理降低 7.6%、10.6%、13.1% 和 18.2%,差异水平均显著。

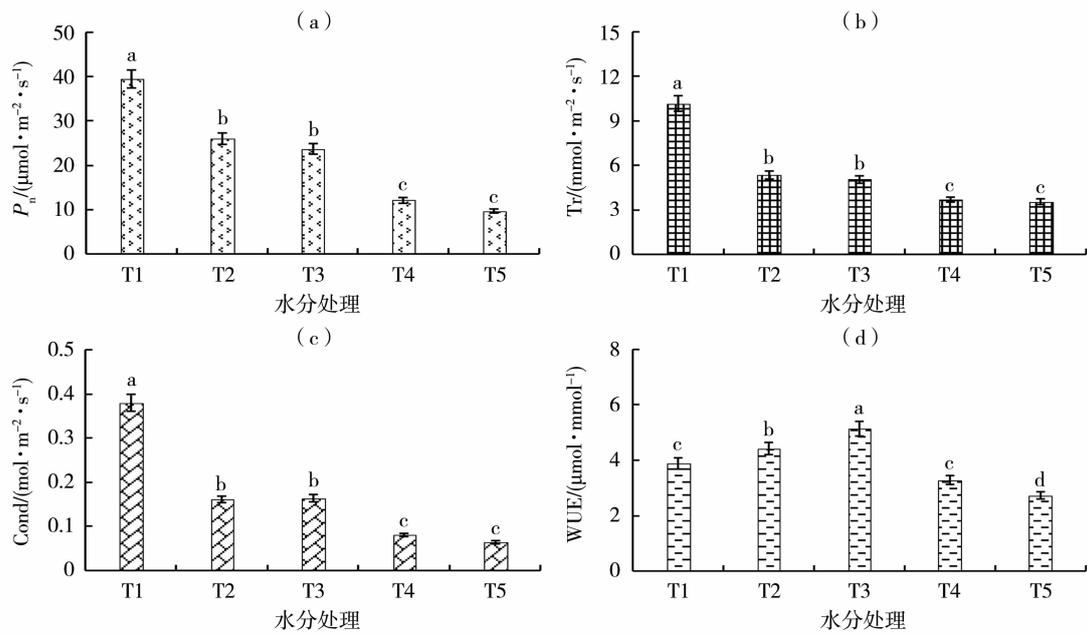


图3 持续干旱胁迫对开花期夏玉米叶片光合特性的影响  
(a)净光合速率,(b)蒸腾速率,(c)气孔导度,(d)水分利用效率  
Fig.3 Effects of continuous drought stress on photosynthetic characteristics of summer maize leaves at the flowering stage

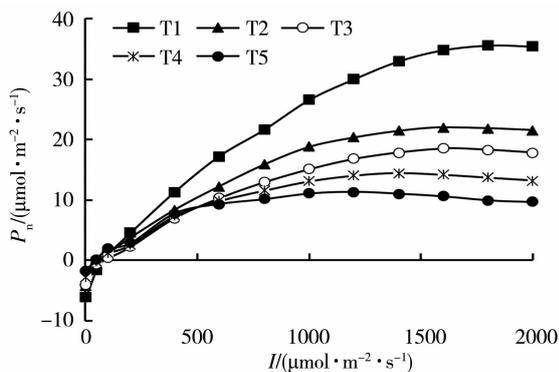


图4 持续干旱胁迫对开花期夏玉米叶片光响应曲线的影响  
Fig.4 Effects of continuous drought stress on light response curve of summer maize leaves at the flowering stage

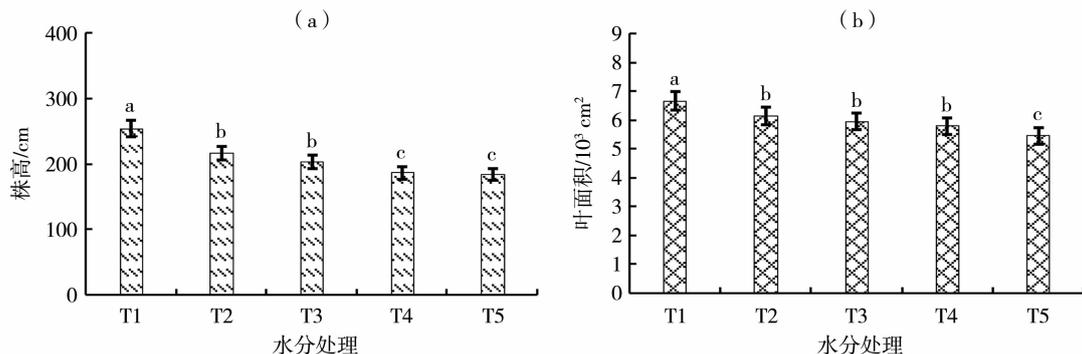


图5 持续干旱胁迫对开花期夏玉米株高(a)和叶面积(b)的影响

Fig.5 Effects of continuous drought stress on plant height (a) and leaf area (b) of summer maize at the flowering stage

图6是持续干旱胁迫对开花期夏玉米干物质积累与分配的影响。可以看出,随着干旱胁迫的加剧,各处理夏玉米叶、叶鞘、根、茎、果实等干重均显著降低。其中,T1处理下开花期夏玉米总干重最高,T2处理的总干重较T1处理偏低13.4%,且差异显著,而T4、T5处理总干重差异不显著,分别较T1处理偏低41.2%和44.9%。另外,随着干旱胁迫的加剧,开花期夏玉米叶、叶鞘干重占地上部干物重的百分比逐渐增加,即干旱胁迫越重,增加越多;茎、果实、根干重占地上部干物重的百分比有所减少,且干旱胁迫越重,减少越多。这表明干旱胁迫下,夏玉米植株养分分配产生变化,叶、叶鞘获得的养分分配增多,茎、果实、根获得的养分供给减少,营养供给与分配的改变对玉米植株的健壮生长不利,倒伏风险增

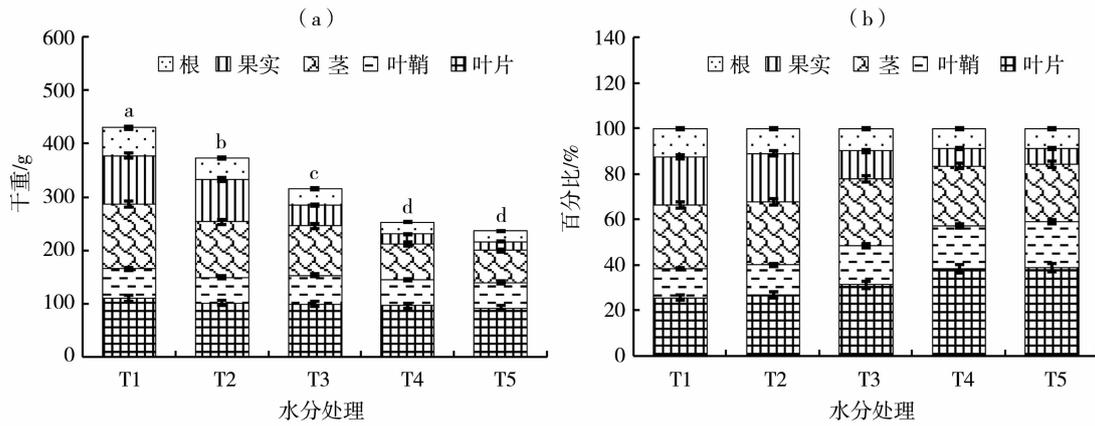


图 6 开花期夏玉米地上部干物重(a)及占比(b)对持续干旱胁迫的响应  
Fig. 6 Effects of continuous drought stress on dry matter weight above ground parts (a) and ratio (b) of summer maize at the flowering stage

加,影响产量形成。

### 2.4 产量构成对水分临界期持续干旱胁迫的响应

随着干旱胁迫的加剧,夏玉米株籽粒重、百粒重及理论产量均显著降低,而秃尖比和双穗率显著升高(表 3)。T1 处理的秃尖比和双穗率均最低,分别为 0.9% 和 3.0%,显著低于其他处理;T2、T3 处理的秃尖比均为 6.0%,双穗率分别为 33.0% 和 37.0%,而 T4、T5 处理秃尖比和双穗率均超过 50%,分别为 50.0%、70.0% 和 60.0%、90.0%。T1 处理的株籽粒重为 157.7 g,较 T2、T3、T4 和 T5 处理高 49.8%、

51.0%、58.4% 和 61.8%,差异显著,T2、T3 处理株籽粒重显著高于 T4、T5 处理,且 T2、T3 处理和 T4、T5 处理株籽粒重分别差异不显著;由于灌浆不充分,T2、T3、T4、T5 处理的百粒重显著低于 T1 处理,且 T2、T3、T4 处理差异不显著,分别较 T1 处理低 13.5%、11.6% 和 13.2%,T5 处理的百粒重最低,较 T1 处理低 25.8%;干旱胁迫对夏玉米理论产量造成不可逆的影响,T1 处理的理论产量最高为 1100 g·m<sup>-2</sup>,T2、T3、T4、T5 处理均显著偏低,分别较 T1 处理低 45.5%、54.5%、64.8%、72.7%。

表 3 水分临界期持续干旱胁迫对夏玉米产量构成的影响  
Tab. 3 Effects of continuous drought stress on yield components of summer maize in critical period of water

水分处理	秃尖比/%	双穗率/%	株籽粒重/g	百粒重/g	理论产量/(g·m <sup>-2</sup> )
T1	0.9 ± 0.06d	3.0 ± 0.15d	157.7 ± 10.58a	31.8 ± 2.69a	1100.0 ± 6.59a
T2	6.0 ± 0.18c	33.0 ± 1.35c	79.2 ± 5.69b	27.5 ± 2.14b	600.0 ± 2.39b
T3	6.0 ± 0.23c	37.0 ± 2.69c	77.3 ± 4.87b	28.1 ± 2.69b	500.0 ± 3.15c
T4	50.0 ± 3.58b	60.0 ± 3.54b	65.6 ± 5.69c	27.6 ± 1.58b	387.6 ± 2.11d
T5	70.0 ± 6.21a	90.0 ± 5.24a	60.3 ± 3.22c	23.6 ± 2.01c	300.0 ± 1.85d

## 3 结论与讨论

### 3.1 讨论

光合作用是绿植物(包括光合细菌)将光能转化为可用于生命过程中的化学能,并进行有机物合成的生物过程,是物质生产基础,其强弱决定了作物生长及最终产量。水分作为光合作用的必备原料之一,其变化对植株光合生理过程产生重要影响,同时水分是植株叶绿素合成的必要条件,叶片缺水会抑

制植株叶绿素的生成,促进叶绿素的分解,导致叶片发黄,光合作用降低。干旱胁迫发生时,夏玉米叶片气孔因缺水而闭合,使得蒸腾速率和气孔导度降低、水分和 CO<sub>2</sub> 运输受阻,进而导致叶片光合速率降低,且随干旱胁迫的加剧降低幅度增大。然而,光合速率降低的原因不同,干旱胁迫下气孔因素和非气孔因素是造成夏玉米叶片光合速率降低的主要原因,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和气孔限制值对干旱胁迫的响应是判断夏玉米叶片光合速率降低原因的主

要依据<sup>[24]</sup>。

光合产物在各器官之间的积累和转运是籽粒产量形成的重要物质基础。玉米籽粒产量很大程度上取决于生育后期光合产物的生产能力,而营养器官的干物质转移也是重要的影响因素。干旱胁迫发生时,夏玉米株高和叶面积不同程度降低,地上部干物重减少,植株养分向叶、鞘转移增多以及向茎、果实、根的供给减少,进而导致植株茎秆瘦弱、倒伏风险增加、产量形成困难,这与贾双杰等的研究结论一致<sup>[25]</sup>。

理论产量是夏玉米实际产量预估的有效手段,夏玉米秃尖比和双穗率随干旱胁迫加剧显著升高,而株籽粒重和百粒重则有所降低。干旱胁迫发生时,夏玉米理论产量显著降低,轻度干旱胁迫导致理论产量较 T1 处理降低 45%~65%,重度干旱胁迫则降低 70% 左右,这可能是持续干旱胁迫下玉米雌雄穗发育进程延缓,雄穗抽出困难、雌穗吐丝延迟,进而导致玉米穗部秃尖和穗粒数减少,产量降低,这与米娜等<sup>[26]</sup>的研究结论基本一致。

本研究基于夏玉米水分临界期水分控制试验,模拟研究不同水分处理下土壤水分变化规律及干旱发生发展过程,系统研究水分临界期持续干旱胁迫对夏玉米叶片光合生理及产量形成的影响,为明确干旱胁迫致灾机理及干旱灾害监测、影响评估提供理论依据。由于夏季干旱的发生往往伴随高温,今后还应加强高温、干旱复合灾害对夏玉米生长发育及物质形成的影响研究。

### 3.2 结论

(1) 拔节-开花期是夏玉米的水分临界期,持续干旱胁迫造成开花期夏玉米叶片 Chla 含量降低,导致光合能力显著下降,且干旱胁迫越重,降幅越大;轻度干旱胁迫促进开花期夏玉米叶片 WUE 升高,而重度干旱胁迫则导致夏玉米叶片 WUE 显著降低。

(2) 持续干旱胁迫导致开花期夏玉米植株矮化、叶面积降低,地上部干物质减少;干旱胁迫迫使植株养分在不同器官间进行再次分配,减少对茎、果实、根的养分供给,造成植株产量形成困难。

(3) 持续干旱胁迫造成夏玉米秃尖比和双穗率显著升高、株籽粒重和百粒重降低,进而导致产量降低,且胁迫越重,产量降幅越大。

### 参考文献:

[1] 董树亭,张吉旺. 建立玉米现代产业技术体系,加快玉米生产发展[J]. 玉米科学,2008,16(4):18-20.  
[2] 陈翔,鲍杨俊,李庆,等. 黄淮海夏玉米花期高温发生特点、危害

机理与防控措施综述[J]. 安徽农业大学学报,2020,47(2):304-308.

- [3] 张强,韩兰英,王胜,等. 影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征[J]. 科学通报,2018,63(23):2378-2392.  
[4] 徐英,李曼华,李辉,等. 不同发育期的干旱对华北地区夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 气象与环境学报,2017,33(1):108-112.  
[5] 薛晓萍. 山东干旱与农业产量定量关系研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.  
[6] 吴霞,王培娟,公衍铎,等. 1961—2015年黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析[J]. 农业工程学报,2019,35(18):189-199.  
[7] YOUSFI N, SLAMA I, GHNAYA T, et al. Effects of water deficit stress on growth, water relations and osmolyte accumulation in *Medicago truncatula* and *M. laciniata* populations[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2010,333:205-213.  
[8] 任丽雯,王兴涛,丁文魁,等. 不同发育阶段干旱胁迫对春玉米土壤温湿度及产量形成的影响[J]. 干旱气象,2016,34(5):860-865.  
[9] 毕建杰,刘建栋,叶宝兴,等. 干旱胁迫对夏玉米叶片光合及叶绿素荧光的影响[J]. 气象与环境科学,2008,31(1):10-15.  
[10] WALLACE J G, ZHANG X C, BEYENE Y, et al. Genome-wide association for plant height and flowering time across 15 tropical maize populations under managed drought stress and well-watered conditions in Sub-Saharan Africa[J]. *Crop Science*, 2016,56(5):2365-2378.  
[11] DAO A, SANOU J, EDGAR TRAORÉ V S, et al. Selection of drought tolerant maize hybrids using path coefficient analysis and selection index[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2017,20(3):132-139.  
[12] 麻雪艳,周广胜. 干旱对夏玉米苗期叶片权衡生长的影响[J]. 生态学报,2018,38(5):1758-1769.  
[13] SHEN X F, DONG Z X, CHEN Y. Drought and UV-B radiation effect on photosynthesis and antioxidant parameters in soybean and maize[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015,37(2):25.  
[14] 李叶蓓,陶洪斌,王若男,等. 干旱对玉米穗发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2015,23(4):383-391.  
[15] 施龙建,文章荣,张世博,等. 开花期干旱胁迫对鲜食糯玉米产量和品质的影响[J]. 作物学报,2018,44(8):1205-1211.  
[16] 刘艳,汪仁,华利民,等. 施氮量对玉米生育后期叶片衰老与保护酶系统的影响[J]. 玉米科学,2012,20(2):124-127.  
[17] 高杰,张仁和,王文斌,等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光系统 II 性能的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(5):1391-1396.  
[18] 谭方颖,李昊,王建林,等. 华北夏玉米干物质分配系数对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报,2019,30(1):217-223.  
[19] 国家气象局. 农业气象观测规范:上卷[M]. 北京:气象出版社,1993.  
[20] 张志良,翟伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2003:67-69.  
[21] YE Z P. A new model for relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. *Photosynthetica*, 2007,45(4):637-640.  
[22] 中国气象局. 农业干旱等级:GB/T 32136—2015[S]. 北京:中

- 国标准出版社,2015.
- [23] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社,2006: 105.
- [24] 李潮海,赵亚丽,杨国航,等. 遮光对不同基因型玉米光合特性的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(6):1259-1264.
- [25] 贾双杰,李红伟,江艳平,等. 干旱胁迫对玉米叶片光合特性和穗发育特征的影响[J]. 生态学报,2020,40(3):854-863.
- [26] 米娜,张玉书,蔡福,等. 干旱胁迫对玉米物候及产量组成的影响及模拟研究[J]. 中国生态农业学报,2019,27(12):1779-1788.

## Effect of Continuous Drought Stress During Critical Period of Water on Photosynthetic Physiology and Yield Formation of Summer Maize

ZHANG Jibo<sup>1,2</sup>, LI Nan<sup>1,2</sup>, QIU Can<sup>2,3</sup>, XUE Xiaoping<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China;  
2. Shandong Provincial Climate Center, Jinan 250031, China;  
3. Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** The experiment was conducted during the growth season of summer maize in 2018 in moisture control field of automatic control rain shelter in agriculture meteorological test station of Linyi. With ‘Zhengdan 958’ (ZD958) as test material, five-gradient water control tests were designed during the critical period of water (jointing to blooming stage). The effects of continuous drought stress on photosynthetic physiology and yield formation of summer maize in the critical period of water were simulated and studied. The results show that the leaf chlorophyll a content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and plant height, leaf area, total dry weight above ground parts of summer maize at the flowering stage decreased under continuous drought stress during the water critical period, and the heavier drought stress was, the greater reduction was. The above elements under T5 treatment were 42.6%, 75.5%, 83.2%, 65.1%, 27.5%, 18.2% and 44.9% lower than those under T1 treatment in turn. The water use efficiency of summer maize leaves increased firstly and then decreased with the intensification of drought stress, and it reached the highest under light drought stress. Under continuous drought stress, the nutrient allocation of maize leaves and sheaths increased, while the nutrient supply of stems, fruits and roots decreased, which wasn't conducive to healthy growth of summer maize, the risk of lodging increased, and the yield formation was difficult. In addition, the continuous drought stress also caused increase of bald tip ratio and double spike rate of summer maize and significant decrease of 100-kernel weight and theoretical yield.

**Key words:** critical period of water; continuous drought stress; photosynthetic physiology; yield; summer maize