

# 干旱胁迫对玉米生长、生理指标及品质的影响

孔建禄<sup>1</sup>, 曾 湧<sup>1</sup>, 李世成<sup>1</sup>, 曹占凤<sup>2</sup>, 武永陶<sup>3</sup>, 李振谋<sup>4</sup>

(1. 甘肃省农业技术推广总站, 兰州 730030; 2. 甘肃省经济作物技术推广站, 兰州 730030;  
3. 兰州新区西岔镇农业科技服务中心, 兰州 730300; 4. 甘肃省靖远县农业技术推广中心, 甘肃 白银 730900)

**摘 要:** 以玉米品种金穗3号、陇单339、陇单602和先玉335为材料, 设对照(CK)、中旱(T1)、高旱(T2)3个处理, 在不同生育时期测定光合特征参数、生理生态指标、产量相关性状指标及品质指标, 分析干旱胁迫对玉米生理生态指标的影响。结果表明, 干旱胁迫后, 与对照相比玉米株高、穗位高、单株生物量、单株穗重、单株粒重、穗长、百粒重和小区产量均随干旱胁迫程度的增加而降低, 在高旱胁迫下, 分别降低19.78%、19.06%、36.76%、44.50%、45.08%、24.01%、22.81%和62.89%。空秆率增加, 粉丝间隔时间增加1.17~3.17 d; 净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶面积指数随着干旱胁迫程度呈下降趋势; 子粒粗脂肪和蛋白含量呈先升高后降低趋势, 淀粉含量呈逐渐降低趋势。在甘肃省干旱半干旱地区可种植金穗3号及相似品种, 适当控水可提高子粒品质。

**关键词:** 玉米; 干旱胁迫; 生理生态; 产量; 品质

**中图分类号:** S513.01

**文献标识码:** A

## Effects of Drought Stress on Growth, Physiological Indicators and Grain Quality of Maize

KONG Jian-lu<sup>1</sup>, ZENG Yong<sup>1</sup>, LI Shi-cheng<sup>1</sup>, CAO Zhan-feng<sup>2</sup>, WU Yong-tao<sup>3</sup>, LI Zhen-mou<sup>4</sup>

(1. Gansu Agricultural Technology Extension Station, Lanzhou 730030;

2. Gansu Economic Crop Technology Extension Station, Lanzhou 730030;

3. Lanzhou New District Xicha Town Agricultural Science and Technology Service Center, Lanzhou 730300;

4. Agricultural Technology Extension Center of Jingyuan County, Gansu Province, Baiyin 730900, China)

**Abstract:** Four maize varieties, Jinsui 3, Longdan339, Longdan602 and Xianyu335 were used as test materials, with three treatments of control(CK), medium drought(T1) and high drought(T2). Photosynthetic characteristic parameters, physiological and ecological indicators, yield-related trait indicators, and quality indicators were measured at different stages of growth to analyze the impact of drought stress on maize physiological and ecological indicators and explore the relationship between yield and quality. The results showed that compared to the control, plant height, ear position height, biomass per plant, ear weight per plant, seed weight per plant, ear length, 100-seed weight and plot yield decreased with increasing drought stress, with reductions of 19.78%, 19.06%, 36.76%, 44.50%, 45.08%, 24.01%, 22.81% and 62.89% respectively under high drought stress. High drought stress increased the rate of empty straw and increased the anthesis silking interval by 1.17 d to 3.17 d. The net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, intercellular carbon dioxide concentration and leaf area index showed a decreasing trend with the degree of drought stress. The crude fat and protein content of the seeds showed a tendency to increase and then decrease, while the starch content showed a gradual decrease. In the arid and semi-arid areas of Gansu province, Jinsui 3 and similar varieties with good drought resistance can be planted, and appropriate water control can improve seed quality.

**Key words:** Maize; Drought stress; Physiological ecology; Yield; Quality

录用日期: 2022-05-23

基金项目: 高标准农田生地熟化技术研究与模式集成示范(GNKJ-2020-5)

作者简介: 孔建禄(1975-), 江西上犹人, 正高级农艺师, 主要从事农业技术推广工作。E-mail: kongjianlu@126.com

曾 湧同为本文第一作者。

李振谋为本文通信作者。E-mail: 1369928193@qq.com

干旱是世界范围内限制作物生产力、造成粮食减产的主要因素。全球性气候变化以及人口的急剧增长势必造成农业用水受限,造成粮食供应紧张和水资源严重短缺的双重矛盾。玉米因其重要的粮食、饲料、工业用途在农业生产及国民经济发展中发挥着重要作用。玉米已成为我国第一大粮食作物,2021年播种面积 $4.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,占总播种面积近37%。近年因饲用消费和加工消费增加,供需缺口有所扩大,供求关系由基本平衡转向趋紧,最近两年进口突飞猛增。从2016年到2020年,我国玉米对外依赖度提升较多,达9.39%<sup>[1]</sup>。玉米作为雨养作物,对水分较为敏感,生长过程中缺水会严重影响玉米的产量<sup>[2]</sup>。随着干旱土壤面积的不断加剧,干旱持续时间增加,中度和重度的土壤干旱将成为未来农业生产面临的持续性问题,也对玉米未来生产提出了更为严峻的考验。

干旱胁迫不仅会造成玉米减产,而且也会影响其品质变化。不同生育时期、不同程度的干旱胁迫,对玉米生长发育及品质影响有所不同<sup>[3,4]</sup>。研究表明,干旱胁迫后,玉米生长发育缓慢,雌雄不协调,灌浆受阻,最终表现为产量降低<sup>[5-12]</sup>。光合作用是作物生长最重要的生理过程之一,水分是影响光合作用的主要因子,持续干旱胁迫导致气孔关闭,叶片净光合速率和气孔导度下降,使光合作用受抑制,体内同化物积累降低,玉米长势变弱或死亡,进而导致玉米减产<sup>[13-16]</sup>。子粒组成成分直接影响玉米用途,干旱胁迫会引起玉米子粒组分含量变化,在开花、灌浆期,干旱胁迫改变了玉米品质<sup>[17,18]</sup>。在减少灌水的情况下,玉米蛋白质含量升高,淀粉含量降低,淀粉粒变小,进而导致黏度降低、胶凝温度和热焓值增加<sup>[19-21]</sup>。前人在玉米干旱胁迫方面做了许多研究,主要针对某一时期、同一干旱胁迫程度进行。本试验在严格控制水分胁迫条件下,以4个甘肃省主栽玉米品种为材料,分析不同生育时期、不同程度干旱胁迫对玉米生长发育、生理生态、品质等指标的影响,为甘肃省干旱半干旱地区玉米品种选择和节水灌溉绿色栽培技术提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为甘肃省主栽品种金穗3号、陇单339、陇单602和先玉335。

### 1.2 试验设计

试验于2020-2021年在甘肃省张掖市甘州区人工抗旱棚内进行,除雨天关闭外,其他时间段均打开

抗旱棚。试验设对照(CK)、中旱(T1)、高旱(T2)3个处理,3次重复,5 m行长,4行区,行距60 cm,株距25 cm,人工点播。试验地播种前施入磷酸二铵、尿素各 $300 \text{ kg/hm}^2$ ,膜下滴灌灌水 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 确保出苗。高旱(T2)处理全生育期不灌水,中旱(T1)和对照(CK)处理每次分别以 $150 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 灌水量在苗期、抽雄期和灌浆期各灌水1次,其他管理与大田生产相同。

### 1.4 测定项目与方法

在苗期、抽雄期和灌浆期利用LI-6400XT型光合测定系统,选择晴天上午9:00~12:00测定穗位叶(苗期测顶部第一片完全展开叶)的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )及胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ ),每个小区选择3株长势正常植株进行测定,每片叶片计数5次,计算平均值。

在苗期、抽雄期和灌浆期利用SPAD-502 Plus叶绿素仪,选择晴天上午9:00~12:00测定穗位叶的SPAD值,每个小区选择3株长势正常植株进行测定,每片叶片测量5次,计算平均值。利用AccuPAR LP-80植物冠层分析仪在苗期、抽雄期和灌浆期选择晴天上午9:00~12:00测定植株基部群体叶面积指数,每个小区测定5个重复值。

记载散粉至吐丝间隔时间(ASI),试验成熟收获后每个小区取10株,在室内进行株高、穗位高、单株生物量、单株穗重、单株粒重、穗长、百粒重和空秆率等性状测量,以其平均数代表考察性状值,并测定每个小区产量。

每个小区挑选子粒饱满无破损的种子,利用Unity 2600XTR近红外分析仪进行粗脂肪、淀粉和蛋白质含量的测定。

### 1.5 数据处理与分析

采用Excel 2007进行数据处理,利用R软件进行描述性统计、相关分析。

## 2 结果与分析

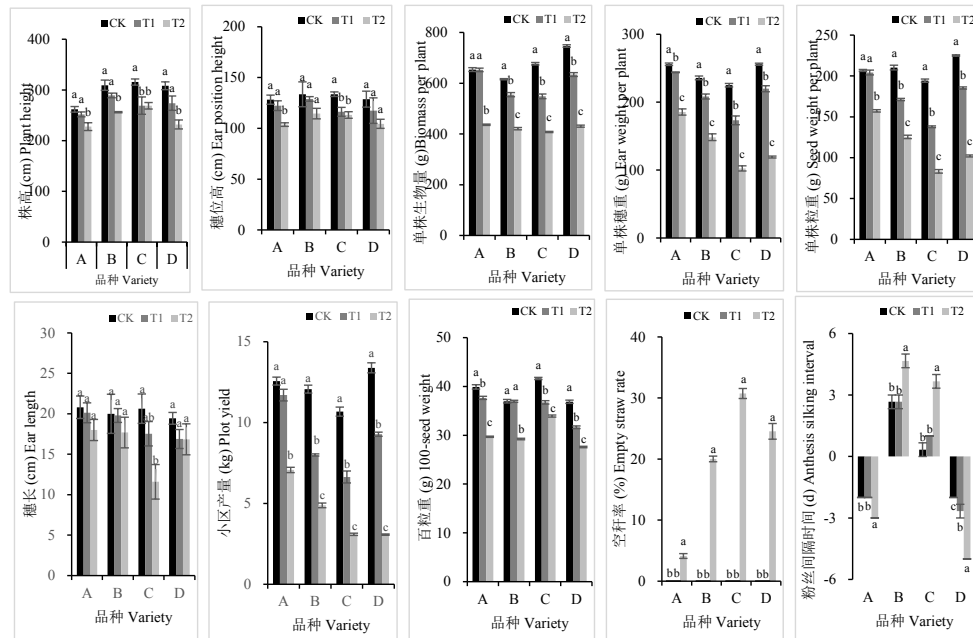
### 2.1 干旱胁迫对玉米生长及产量的影响

干旱胁迫影响玉米不同发育阶段的生长。从图1可以看出,干旱胁迫严重影响了玉米生长发育及产量。在2020年和2021年,金穗3号、陇单339、陇单602和先玉335的株高(PH)、穗位高(EPH)、单株生物量(BP)、单株穗重(EWP)、单株粒重(SWP)、穗长(EL)、百粒重(100-SW)和小区产量(PY)均随干旱胁迫程度的增加而降低;除穗长和穗位高外,其余性状在对照(CK)和高旱(T2)间达到显著差异。两年间,与对照相比,在高旱胁迫下,4个品种的株高、穗位高、单

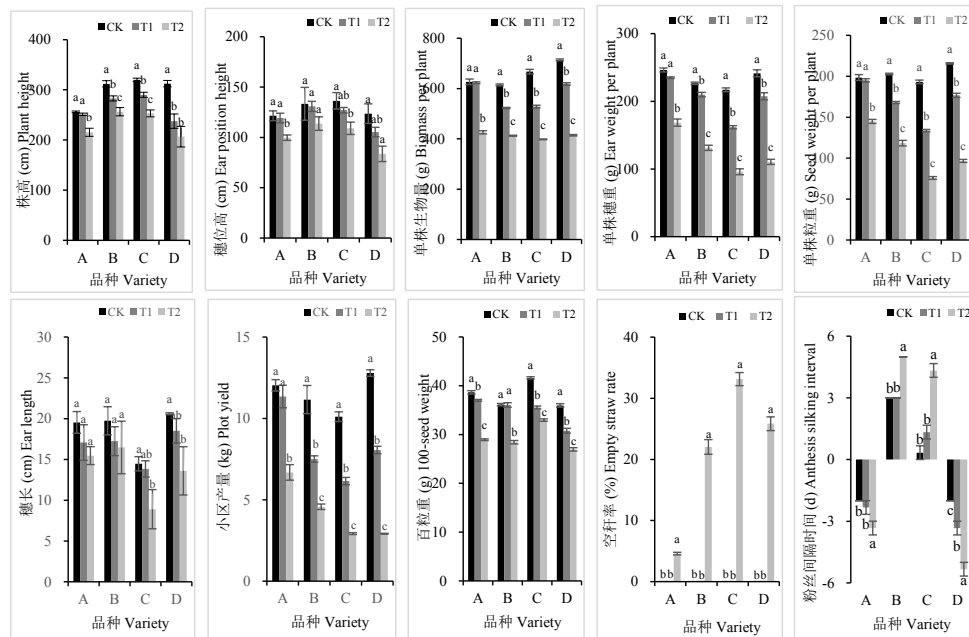
株生物量、单株穗重、单株粒重、穗长、百粒重和小区产量的平均值分别降低 19.78%、19.06%、36.76%、44.50%、45.08%、24.01%、22.81% 和 62.89%, 干旱对小区产量影响最大。在 4 个品种间, 高旱胁迫对先玉 335 影响最大, 其次为陇单 602、陇单 339、金穗 3 号。中旱胁迫下, 金穗 3 号的小区产量与对照差异不显著, 因此, 金穗 3 号耐旱性比较强。在对照

和中旱胁迫下, 4 个品种均未出现空秆现象。高旱胁迫下, 陇单 602 空秆率(ESR)最高, 为 31.94%, 其次为先玉 335(25.18%)、陇单 339(21.03%)、金穗 3 号(4.36%)。中旱胁迫对粉丝间隔时间(ASI)影响较小, 高旱胁迫下, 金穗 3 号较对照增加 1.17 d, 陇单 339 较对照增加 2.00 d, 陇单 602 较对照增加 3.07 d, 先玉 335 较对照增加 3.17 d。

2020



2021



注: A、B、C、D 分别为金穗 3 号、陇单 339、陇单 602、先玉 335。直方图上方不同小写字母表示同年不同处理间差异达 0.05 显著水平。下图同。

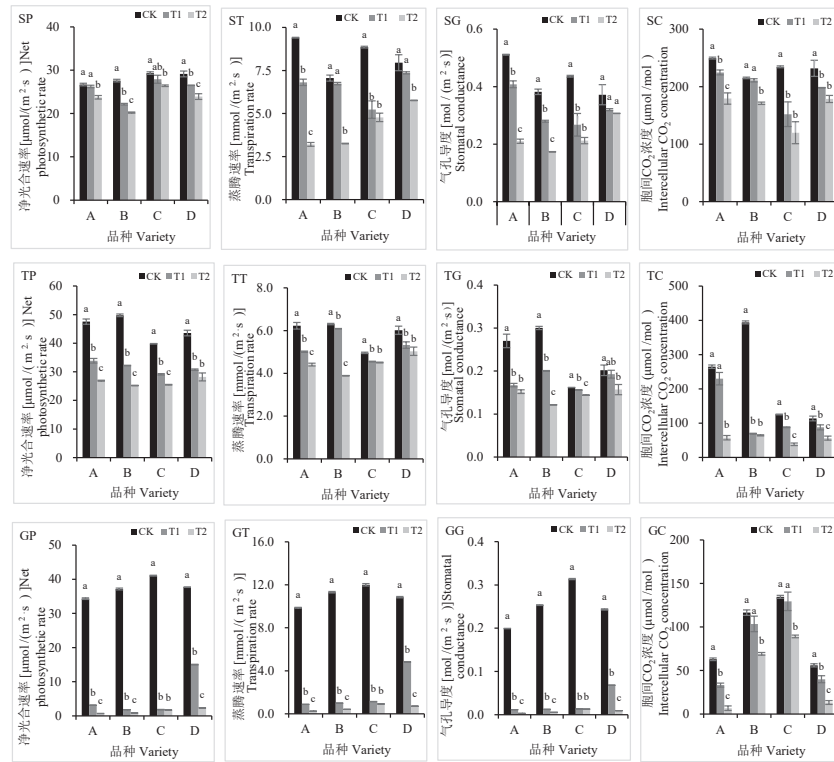
Note: A, B, C and D represent Jinsui 3, Longdan339, Longdan602 and Xianyu335 respectively. Different lowercase letters above the histogram indicate that the difference between the different treatments in the same year reaches a significant level of 0.05. The same below.

图 1 干旱胁迫对玉米产量指标的影响

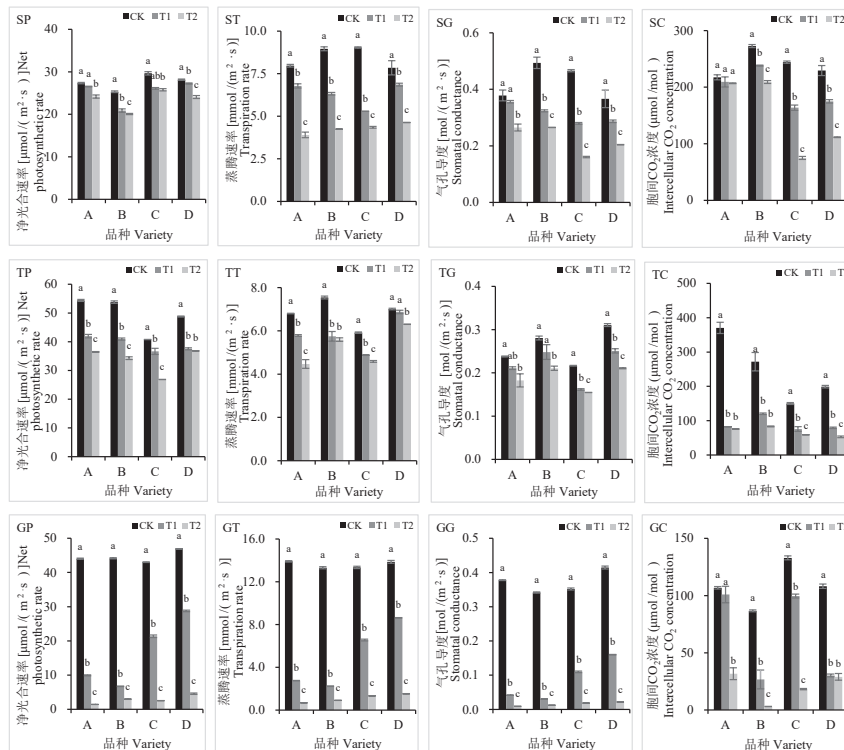
Fig.1 Effect of drought stress on yield traits of maize

## 2.2 干旱胁迫对玉米生理指标的影响

2020



2021



注:SP、ST、SG、SC分别为苗期净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度;TP、TT、TG、TC分别为抽雄期净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度;GP、GT、GG、GC分别为灌浆期净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度。

Note: SP, ST, SG, and SC represent  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ , and  $C_i$  at seedling stage, respectively. TP, TT, TG and TC represent  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ , and  $C_i$  at tasseling stage, respectively. GP, GT, GG and GC represent  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ , and  $C_i$  at grouting stage, respectively.

图2 干旱胁迫对玉米光合作用的影响

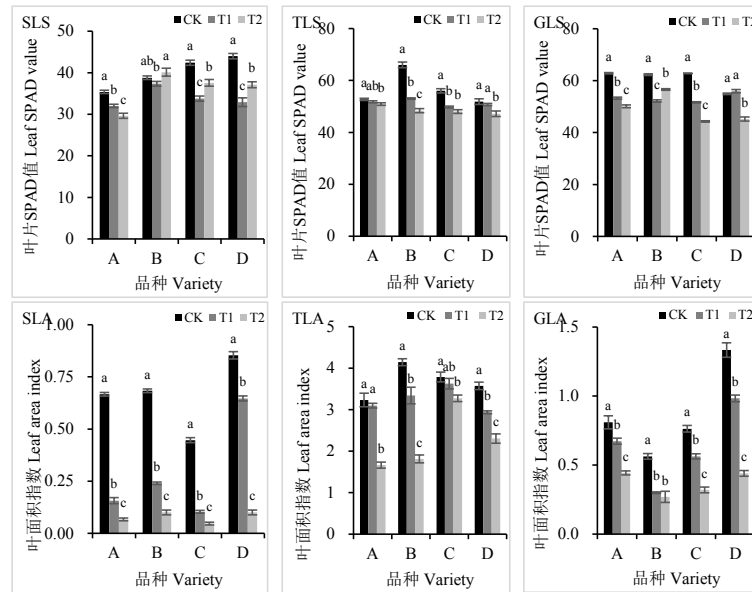
Fig.2 Effect of drought stress on photosynthesis of maize

光合作用直接影响作物的生长发育及产量形成。从图2看出,在不同干旱胁迫下,4个品种的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度呈下降趋势。随着生育进程的推进,净光合速率先升高后降低;对照的蒸腾速率先降低后升高,干旱胁迫下的蒸腾速率与对照相反;气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度呈降低趋势。抽雄期和灌浆期,光合作用在高旱胁迫和对照间呈显著差异,尤其是在灌浆时期,下降幅度非常大。两年间,中旱胁迫下,金穗3号、陇单339、

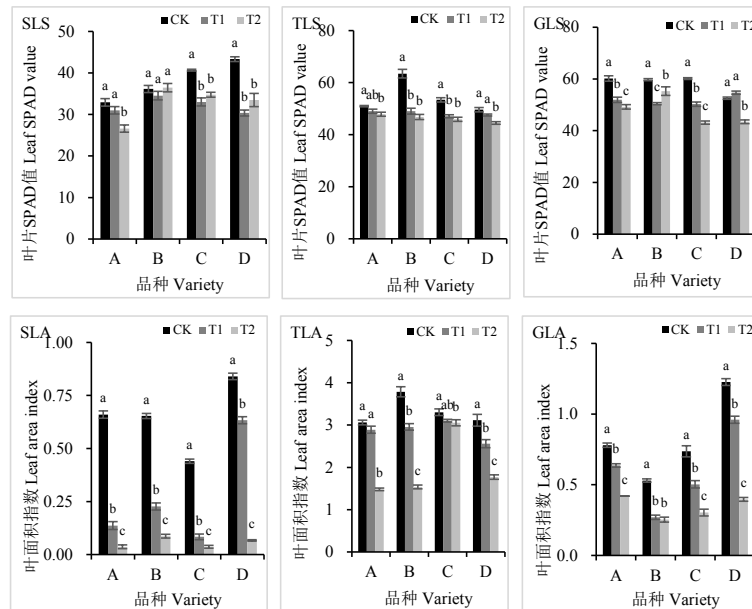
陇单602、先玉335的净光合速率和蒸腾速率的平均值比对照分别下降83.33%、89.48%、72.42%、48.24%和84.71%、86.93%、69.66%、45.55%;高旱胁迫下,金穗3号、陇单339、陇单602、先玉335的净光合速率和蒸腾速率的平均值比对照分别下降97.28%、95.28%、94.96%、91.84%和96.12%、94.61%、91.15%、90.96%,干旱胁迫对玉米光合作用影响非常大,严重降低了其光合速率。

从图3可以看出,不同品种的叶片SPAD值随着

2020



2021



注:SLS、TLS、GLS分别为苗期、抽雄期、灌浆期的叶片SPAD值;SLA、TLA、GLA分别为苗期、抽雄期、灌浆期的叶面积指数。

Note: SLS, TLS and GLS represent Leaf SPAD value at seedling stage, tasseling stage, grouting stage, respectively. SLA, TLA and GLA represent Leaf area index at seedling stage, tasseling stage, grouting stage, respectively.

图3 干旱胁迫对玉米叶片SPAD值和叶面积指数的影响

Fig.3 Effect of drought stress on leaf SPAD value and leaf area index of maize

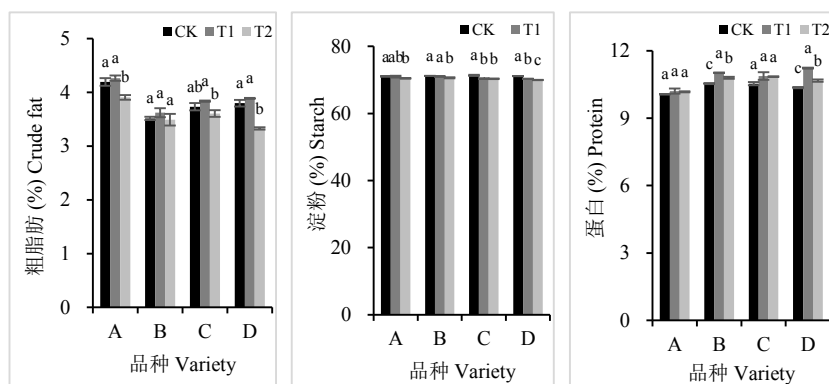


生长发育的进程呈增长趋势。金穗3号随着干旱胁迫的加重,在不同时期呈递减趋势;陇单339在苗期和灌浆期受到高旱胁迫后反而升高,陇单602和先玉335变化无规律。叶面积指数在苗期、抽雄期和灌浆期呈先升高后降低趋势,受到干旱胁迫后,叶面积指数显著下降,在3个时期,高旱胁迫比对照分别下降55.95%、39.47%和89.70%。在苗期,4个品种的叶面积指数在处理和对照间均呈显著差异;在抽雄期和灌浆期,高旱胁迫与对照间呈显著差异,先玉335在3个时期的叶面积指数下降幅度最大,其次为陇单339、金穗3号、陇单602。可见,干旱胁迫严重影响玉米生物量大小。

### 2.3 干旱胁迫对玉米子粒品质的影响

不同干旱胁迫影响玉米子粒粗脂肪、淀粉和蛋白含量。随着干旱胁迫程度增加,4个品种的粗脂肪含量呈先升高后降低趋势,中旱胁迫较对照增加1.66%~3.54%,高旱胁迫比对照减少1.24%~9.45%;蛋白含量同样呈先升高后降低趋势,中旱胁迫比对照增加1.46%~8.22%,高旱比对照增加1.25%~3.03%;淀粉含量呈逐渐降低趋势,中旱比对照减少0.10%~1.35%,高旱比对照减少0.79%~1.62%。陇单339和陇单602的粗脂肪含量在不同处理间差异不显著,4个品种的淀粉含量在对照与中旱胁迫间差异不显著,与高旱胁迫差异显著,金穗3号和陇单602的蛋白含量在处理间差异不显著。

2020



2021

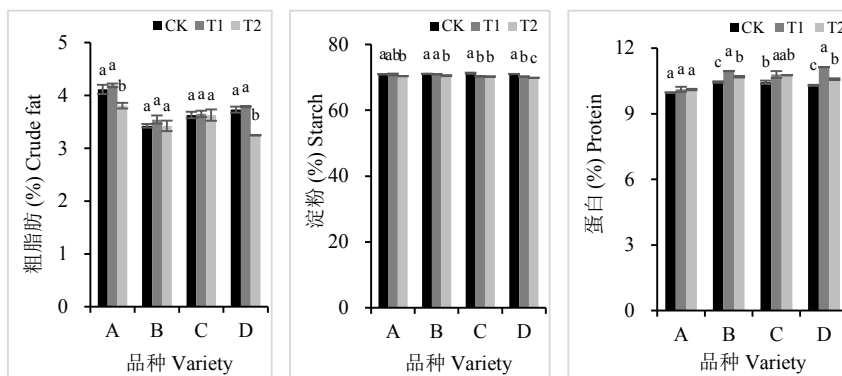


图4 干旱胁迫对玉米子粒品质的影响

Fig.4 Effect of drought stress on grain quality of maize

## 3 结论与讨论

水分是作物生长必不可少的因子,玉米植株高大,全生育期耗水量多,不同生育时期因生长发育不同耗水量有所差异。干旱是玉米生长最重要的非生物胁迫因素之一,严重影响了玉米的生长发育。研究表明,干旱胁迫使玉米株高降低、单株生物量减少、穗重和穗粒重降低、穗长缩短,最终导致产量下

降<sup>[22-26]</sup>。本研究表明,4个品种的株高、穗位高、单株生物量、单株穗重、单株粒重、穗长、百粒重和小区产量在干旱胁迫后降低,穗部性状如粒重、穗长降低明显,最终导致产量严重降低,在高旱胁迫后小区产量减少62.89%。梁晓玲<sup>[27]</sup>等研究发现,干旱胁迫后玉米杂交种的产量降低48.24%,说明干旱是限制玉米产量的主要因素。空秆率和粉丝间隔时间与玉米产量密切相关,在高旱胁迫下,4个品种均出现空秆现

象,品种间差异较大,金穗3号空秆率最低,为4.36%。研究表明,强抗旱品种的粉丝间隔时间比弱抗旱品种长,严重影响结实率<sup>[28]</sup>。本研究表明,在高旱胁迫下,金穗3号粉丝间隔时间最短,为3.17 d;先玉335最长,为5.17 d。路贵和等<sup>[29]</sup>研究发现,产量是评价玉米抗旱性最重要的指标。根据本研究结果,在4个品种中,金穗3号受干旱胁迫影响最小,先玉335产量降低幅度最大,说明在甘肃省干旱半干旱区可选择抗旱性较强的金穗3号作为主栽品种。

光合作用是作物干物质积累的主要途径,干旱胁迫加速叶片衰老,导致光合作用降低,最终影响玉米产量<sup>[30]</sup>。本研究发现,玉米受到干旱胁迫后,光合作用明显下降,尤其在灌浆期高旱胁迫下,4个品种的净光合速率比对照下降了91.84%~97.28%,严重影响了干物质的积累,导致产量显著降低。在本研究中,不同品种叶片SPAD值大小依次为灌浆期>抽雄期>苗期,干旱胁迫后,不同品种的SPAD值变化有所不同,与品种抗旱性的关系还需进一步研究。在一定范围内,作物产量随叶面积指数的增大而提高,当叶面积指数增加到一定程度后,光照不足,光合效率减弱,产量反而下降。本研究中,叶面积指数在苗期、抽雄期和灌浆期呈先升高后降低趋势,有利于生长后期玉米光合作用,提高产量。干旱胁迫后,叶面积指数显著下降,影响光合作用,在4个品种中,先玉335在3个时期的叶面积指数下降幅度最大。

品质是育种家一直关注的指标,玉米作为重要的粮食和饲料作物,品质显得尤为重要。干旱胁迫不仅影响玉米产量,同样也会影响品质的好坏<sup>[31,32]</sup>。在本研究中,干旱胁迫后,4个品种的粗脂肪和蛋白含量呈先升高后降低趋势,淀粉含量呈逐渐降低趋势。因此,研究干旱胁迫对玉米品质的影响需要全方位考虑各种影响因素。通过本研究得出,在甘肃省干旱半干旱地区可选择抗旱性较强的金穗3号及相似品种作为主栽品种,根据玉米子粒用途控制灌水量,一方面可提高玉米子粒品质,另一方有利于农业绿色高效发展。

#### 参考文献:

- [1] 刘靖文,侯丽薇,杨艳涛. 中国玉米供需平衡及国际市场可利用性分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(4): 126-133.  
LIU J W, HOU L W, YANG Y T. Analysis on the balance between supply and demand of corn market in China and the availability of international market[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(4): 126-133. (in Chinese)
- [2] BOYER J S, WESTGATE M E. Grain yields with limited water[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2385-2394.
- [3] ZAMPIERI M, CEGLAR A, DENTENER F, et al. Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(6): 064008.
- [4] SMEEKENS S. Drought resistance: Spraying for yield[J]. Nature Plants, 2017, 3(3): 17023.
- [5] SONG H, LI Y, ZHOU L, et al. Maize leaf functional responses to drought episode and rewatering[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 57-70.
- [6] NEMALI K S, BONIN C, DOHLEMAN F G, et al. Physiological responses related to increased grain yield under drought in the first biotechnology-derived drought-tolerant maize[J]. Plant, Cell & Environment, 2015, 38(9): 1866-1880.
- [7] YANG J, ZHANG J. Grain filling of cereals under soil drying[J]. New Phytologist, 2010, 169(2): 223-236.
- [8] 肖俊夫, 刘战东, 刘祖贵, 等. 不同时期干旱和干旱程度对夏玉米生长发育及耗水特性的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(4): 54-58.  
XIAO J F, LIU Z D, LIU Z G, et al. Effects of drought at different growth stages and different water availabilities on growth and water consumption characteristics of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(4): 54-58. (in Chinese)
- [9] FONSECA A E, WESTGATE M E. Relationship between desiccation and viability of maize pollen[J]. Field Crops Research, 2005, 94(2-3): 114-125.
- [10] 张玉书, 米娜, 陈鹏狮, 等. 土壤水分胁迫对玉米生长发育的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3): 1-7.  
ZHANG Y S, MI N, CHEN P S, et al. Influences of soil water stress on growth and development of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(3): 1-7. (in Chinese)
- [11] 郭晓华. 生态因子对玉米产量构成因素的调控作用[J]. 生态学杂志, 2000, 19(1): 6-11.  
GUO X H. Studies on regulating effects of ecological factors on the yield-related traits in maize[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(1): 6-11. (in Chinese)
- [12] 张小虎, 张振晓, 李晋花. 大豆田间抗旱性鉴定方法及评价[J]. 现代农业科技, 2011(2): 63-64.  
ZHANG X H, ZHANG Z X, LI J H. Identification methods and its evaluation of drought resistance for soybean in field[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011(2): 63-64. (in Chinese)
- [13] 陈军, 戴俊英. 干旱对不同耐性玉米品种光合作用及产量的影响[J]. 作物学报, 1996, 22(6): 757-762, 774.  
CHEN J, DAI J Y. Effect of drought on photosynthesis and grain yield of corn hybrids with different drought tolerance[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(6): 757-762, 774. (in Chinese)
- [14] 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 L, ZHAO R, WANG Y Z, 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. (in Chinese)
- [15] 李真真, 张莉, 李思, 等. 玉米叶片气孔及花环和维管束结构对水分胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2944-2950.

- LI Z Z, ZHANG L, LI S, et al. Responses of stomata and Kranz anatomy of maize leaves to soil water shortages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2944–2950. (in Chinese)
- [16] GAO J, ZHANG R H, WANG W B, et al. Effects of drought stress on performance of photosystem II in maize seedling stage[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1391–1396.
- [17] LU D, CAI X, ZHAO J, et al. Effects of drought after pollination on grain yield and quality of fresh waxy maize[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(1): 210–215.
- [18] 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.
- SHI L J, WEN Z R, ZHANG S B, et al. Effects of water deficit at flowering stage on yield and quality of fresh waxy maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(8): 1205–1211. (in Chinese)
- [19] LIU L M, KLOCKE N, YAN S P, et al. Impact of deficit irrigation on maize physical and chemical properties and ethanol yield[J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(5): 453–462.
- [20] 陈妮娜, 纪瑞鹏, 贾庆宇, 等. 关键发育期干旱对春玉米产量及子粒品质的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1687–1694.
- CHEN N N, JI R P, JIA Q Y, et al. Effects of drought stress at key growth stages on yield and grain quality of spring maize[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1687–1694. (in Chinese)
- [21] 王龙飞, 杨倩, 李广浩, 等. 吐丝后不同阶段干旱胁迫对糯玉米子粒产量和淀粉品质的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(1): 69–76.
- WANG L F, YANG Q, LI G H, et al. Effect of drought stress at different post-silking stages on grain yield and starch quality of waxy maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1): 69–76. (in Chinese)
- [22] ANJUM S A, ASHRAF U, ZOHAIB A, et al. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: A review[J]. Zemdirbyste, 2017, 104(3): 267–276.
- [23] CAIRNS J E, SONDER K, ZAIDI P H, et al. Maize production in a changing climate: Impacts, adaptation, and mitigation strategies[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 79(17): 5167–5178.
- [24] GONZALEZ-DUGO V, DURAND J L, GASTAL F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(3): 529–544.
- [25] THIRUNAVUKKARSAU N, JYOTI K, GANAPATI M, et al. Genomics-enabled next-generation breeding approaches for developing system specific drought tolerant hybrids in maize[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 361.
- [26] YANG M, GENG M, SHEN P, et al. Effect of post-silking drought stress on the expression profiles of genes involved in carbon and nitrogen metabolism during leaf senescence in maize (*Zea mays* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 135: 304–309.
- [27] 梁晓玲, 刘文欣, 阿布来提·阿布拉, 等. 干旱胁迫对玉米杂交种产量及穗部性状的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(2): 75–80.
- LIANG X L, LIU W X, ABULAITI A, et al. Influence of drought stress on yield and ear traits of maize hybrids[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 75–80. (in Chinese)
- [28] 周玉乾, 杨彦忠, 周文期, 等. 干旱胁迫下玉米自交系抗旱性评价及筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 211–217.
- ZHOU Y Q, YANG Y Z, ZHOU W Q, et al. Evaluation and selection of drought resistance inbred lines of maize under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 211–217. (in Chinese)
- [29] 路贵和, 戴景瑞, 张书奎, 等. 不同干旱胁迫条件下我国玉米骨干自交系的抗旱性比较研究[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1284–1288.
- LU G H, DAI J R, ZHANG S K, et al. Drought resistance of elite maize inbred lines in different water stress conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(10): 1284–1288. (in Chinese)
- [30] 刘源. 玉米花期耐高温品种的筛选与综合评价[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [31] WANG Y X, FREI M. Stressed food: The impact of abiotic environmental stresses on crop quality[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(3–4): 271–286.
- [32] THITISAKSAKUL M, JIMENEZ R C, ARIAS M C, et al. Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(1): 67–80.

(责任编辑: 姜媛媛)