

## 关键生育期持续水分胁迫对春玉米 土壤水分动态变化和产量的影响

齐月<sup>1</sup>, 蒋菊芳<sup>2</sup>, 胡蝶<sup>1</sup>, 王润元<sup>1</sup>, 王鹤龄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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, 兰州 730020;  
<sup>2</sup>甘肃省武威市气象局农业气象试验站, 甘肃武威 733000

**摘要:**为探讨关键生育期水分胁迫对春玉米土壤水分动态变化和产量的影响,在典型干旱区武威开展关键生育期水分胁迫模拟试验,试验设置CK(整个生育期供水充足的对照处理)、T1(拔节期持续干旱直至生育期结束)、T2(抽雄期持续干旱直至生育期结束)3种处理。结果表明,受水分胁迫影响,T1和T2干旱处理0~20 cm和0~40 cm土壤温度均高于CK处理,并且T2处理土壤温度高于T1处理;七叶期后,干旱处理剖面土壤含水量各层变化较大,至乳熟期,T1和T2处理土壤贮水量较CK分别减少了72%、57%;关键生育期的水分胁迫主要通过影响春玉米营养生长和生殖生长来影响最终的产量,T1和T2干旱处理产量分别减少了66.4%、54.2%,产量水平WUE分别减少了23.4%、13.1%。研究结果可为春玉米关键生育期干旱发生进行定量评估提供依据,为生态系统响应阈值的确定提供了思路。

**关键词:**春玉米;水分胁迫;拔节期;抽雄期;土壤水分;关键生育期

中图分类号:P49

文献标志码:A

论文编号:casb20190400009

### Continuous Water Stress at Key Growth Stages of Spring Maize: Effects on Soil Moisture Dynamics and Yield

Qi Yue<sup>1</sup>, Jiang Jufang<sup>2</sup>, Hu Die<sup>1</sup>, Wang Runyuan<sup>1</sup>, Wang Heling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster/Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA/Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020;  
<sup>2</sup>Agricultural Meteorological Experiment Station of Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei Gansu 733000

**Abstract:** To explore the effects of water stress at key growth stages on soil moisture dynamics and yield of spring maize, we carried out the water stress simulation experiment at key growth stages of spring maize in Wuwei which was a typical arid area, including CK (control treatment with sufficient water supply during the whole growth period), T1 (continuous drought during the jointing period until the end of the growth period), and T2 (continuous drought during the tasseling period until the end of the growth period). The results showed that: under the influence of water stress, the soil temperature of 0–20 cm and 0–40 cm in T1 and T2 drought treatment was higher than that of CK treatment, and the soil temperature of T2 treatment was higher than that of T1 treatment; after the seven-leaf stage, the soil moisture content of the drought treatment section varied greatly, by the milky stage, the water storage capacity of T1 and T2 treatments decreased by 72% and 57%,

**基金项目:**甘肃省青年科技基金计划项目“干旱半干旱区几种干旱指数的适应性及改进研究”(17JR5RA344);国家自然科学基金资助项目“灌浆期高温与水分胁迫交互作用对半干旱区春玉米生长和产量的影响”(41505098)、“半干旱区作物干旱致灾过程特征及其若干阈值研究”(41275118)、“半干旱区春小麦农田干旱解除的降雨过程调控机制”(41775107);公益性行业(气象)科研专项(重大专项)“我国北方关键区域干旱致灾过程特征和机理研究”(GYHY201506001-2);甘肃省气象局气象科研项目“半干旱区春玉米干旱致灾过程研究”(GSMAMs2018-13)。

**第一作者简介:**齐月,女,1988年出生,山东章丘人,助理研究员,硕士,主要从事气候变化及其对农业的影响研究。通信地址:730020 甘肃省兰州市城关区东岗东路2070号, Tel:0931-2402271, E-mail:goodqiyue@163.com。

**通讯作者:**王鹤龄,男,1978年出生,甘肃会宁人,副研究员,博士,主要从事干旱气候变化及影响评估。E-mail:wangheling1978@126.com。

**收稿日期:**2019-04-18, **修回日期:**2019-06-12。

respectively compared with that of CK; the water stress during the key growth periods mainly affected the final yield by affecting the vegetative growth and reproductive growth of spring maize; the yields in T1 and T2 drought treatment decreased by 66.4% and 54.2%, respectively, and the WUE decreased by 23.4% and 13.1%, respectively. The results can provide a basis for the quantitative assessment of the drought at key growth stages of spring maize, and provide ideas for the determination of the ecosystem response threshold.

**Keywords:** spring maize; water stress; jointing stage; tasseling stage; soil moisture; key growth period

## 0 引言

干旱是限制农作物生长的主要气象灾害<sup>[1-4]</sup>。近年来,受全球变暖的影响,大气蒸发增强,土壤表层水分下降,干旱发生频率、影响范围及致灾损失呈增加趋势<sup>[5-6]</sup>。玉米是世界第一大粮食作物,其整个生育期对水分十分敏感,干旱是影响玉米生长发育和产量的主要灾害<sup>[7-10]</sup>。玉米是河西地区第二大粮食作物,种植面积逐年增加,关键生育期内水分胁迫是导致玉米减产的主要原因,也是造成河西地区粮食产量波动的主要原因<sup>[11-12]</sup>。研究关键生育期水分胁迫对春玉米土壤水分变化和产量的影响,制定缓解玉米减产措施,对保障气候变化背景下河西地区粮食安全具有重要意义。

近年来,许多学者从不同角度、不同层次进行了水分胁迫对玉米的影响研究<sup>[12-16]</sup>,如蔡福等<sup>[17]</sup>研究了持续干旱对春玉米光合特性的影响;蒋菊芳等<sup>[18]</sup>研究了干旱胁迫下春玉米叶片对光强和CO<sub>2</sub>浓度的反应;麻雪艳等<sup>[14]</sup>研究了干旱对夏玉米苗期叶片权衡生长的影响;任丽雯等<sup>[19]</sup>研究了干旱胁迫对春玉米土壤温湿度及产量形成的影响。已有研究分析了干旱对春玉米的影响,未给出减少干旱对玉米影响的措施。笔者研究关键生育期持续水分胁迫下春玉米土壤水分动态变化、垂直分布、耗水量的变化特征,分析了水分利用效率、耗水量与产量的关系,以期为河西地区防灾减灾提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间、地点

试验于2015年4月14日—9月21日在武威荒漠生态与农业气象试验站(37°53'N, 102°53'E)进行。该站位于甘肃省河西走廊东端,海拔1534.8 m。试验地土壤类型为沙壤土,土壤质地为砂壤土,呈微碱性,pH 8.43,平均土壤容重为1.56 g/cm<sup>3</sup>,0~50 cm平均田

间持水量和凋萎系数分布为21.08%、8.8%,永久萎蔫点为5.98%,地下水位约25 m。年均气温8.5℃,年降水量171.0 mm左右,主要集中在5—9月春玉米的生长期,年际变异系数较高,使得春玉米受干旱影响的风险较大。

### 1.2 试验材料

供试玉米品种选择当地常用品种‘科河28号’,2015年4月14日播种,采用点种播种,每穴播2粒。播种前施尿素225 kg/hm<sup>2</sup>,磷二铵187.5 kg/hm<sup>2</sup>,6月2日灌水时追施尿素225 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 试验设计** 4月3日浇底墒水,试验期间各处理的具体灌溉记录如表1所示。试验设CK(整个生育期供水充足的对照处理)、T1(拔节期持续干旱直至生育期结束)、T2(抽雄期持续干旱直至生育期结束)3种处理,每个处理设3个重复。试验处理期间累积降雨量为124.8 mm。

**1.3.2 观测项目和方法** 根据《农业气象观测规范》<sup>[20]</sup>观测不同处理下春玉米的生育期,记录各生育期的时间和天数;土壤含水量采用烘干法测定。利用土钻每10 cm分层钻取0~50 cm土样,分别装入铝盒中,测定湿土重,并置于烘箱内105℃烘干,进行干土样称重,计算重量含水量。

春玉米耗水量可以用实际蒸散量来代表,根据土壤水分平衡方程<sup>[21]</sup>,见式(1)。

$$E_{Ta} = [0.1 \sum_{i=1}^n h_i d_i (W_1 - W_2)] + P + I + G - R_0 - D \quad \dots (1)$$

式中: $E_{Ta}$ 为农田实际蒸散量(mm); $n$ 为取土层次; $h_i$ 和 $d_i$ 分别为第 $i$ 层土层厚度(cm)和土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $W_1$ 和 $W_2$ 分别为2次取土间第 $i$ 层土壤湿度(计算中分别乘100); $P$ 和 $I$ 分别为观测时段内降水量和灌水量(mm); $G$ 和 $D$ 分别为地下水补给量和渗漏量,对于试验站地

表1 各个处理的灌溉记录

灌溉量/(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	6月2日	6月10日	6月18日	7月9日	7月29日	8月13日
T1	744	1015				
T2	512	1321	1549	674		
CK	429	1480	1794	2353	2937	2782

下水位约 25 m,地下水补给及渗漏忽略不计<sup>[22]</sup>。 $R_0$ 为径流量;有效降水量  $P_e$ 为降水量与径流量之差,计算公式<sup>[23]</sup>见(2)~(3)。

$$P_e = P - R_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$P_e = \sum_{u=1}^n (\alpha_u P_u) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中: $P_u$ 为第  $u$  次降水的降水量(mm); $\alpha_u$ 为有效利用系数。一般情况下, $\alpha_u$ 的取值如下:当  $P_u \leq 5$  mm 时, $\alpha_u=0$ ;当  $5$  mm  $< P_u \leq 50$  mm 时, $\alpha_u=0.9$ ;当  $P_u > 50$  mm 时, $\alpha_u=0.75$ <sup>[24-25]</sup>。则玉米耗水量可以表示为公式(4)。

$$E_{T_a} = [0.1 \sum_{i=1}^n h_i d_i (W_1 - W_2)] + P_e + I \quad \dots\dots\dots (4)$$

水分利用效率  $WUE$  根据公式(5)<sup>[26]</sup>计算。

$$WUE = \frac{FY}{E_{T_a}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中: $FY$ 为春玉米产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

1.3.3 数据处理 数据采用 Excel 2010 和 SPSS 进行方差分析和差异显著性检验,方差分析多重比较采用 Duncan 法( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 关键生育期水分胁迫对春玉米 0~20 cm 和 0~40 cm 土壤温度的影响

通过对 T1、T2 和 CK 3 种处理的土壤温度进行比较分析,在春玉米整个生育期内,无论 0~20 cm 还是 0~40 cm, T1 和 T2 处理的土壤温度均比 CK 温度高。0~20 cm 的土壤温度, T1 和 T2 处理分别比 CK 处理高 0.56℃ 和 1.15℃, 0~40 cm 的土壤温度, T1 和 T2 处理分别比 CK 处理高 0.55℃ 和 0.92℃。从各发育期看,七叶期和拔节期, 3 种处理 0~20 cm 还是 0~40 cm 的曲线基本吻合;抽雄开花期, T1 和 T2 处理 0~20 cm 和 0~40 cm

的土壤温度均比 CK 高,并且 0~20 cm 的 T2 处理土壤温度变化明显高于 0~40 cm, 主要由于 T2 处理在抽雄期水分胁迫影响,土壤水分减少,受土壤蒸发和作物的蒸腾影响温度升高;吐丝期后期和乳熟期前期,各处理土壤温度发生明显变化,无论 0~20 cm 还是 0~40 cm, T2 > T1 > CK; 乳熟期后期,各处理 0~20 cm 的土壤温度曲线基本吻合, 0~40 cm 的土壤温度 T2 和 T1 处理基本一致大于 CK, 由于 9 月中旬开始气温下降,地温整体也降低。

### 2.2 关键生育期水分胁迫对春玉米土壤水分动态的影响

图 2 为不同生育期 0~50 cm 剖面土壤水分变化情况,整个生育期看,乳熟期土壤剖面水分变化平缓, T1 和 T2 处理的土壤水分偏低,七叶期、拔节期和抽雄吐丝期土壤剖面含水量变化较大。从不同生育期看,在七叶期, T1、T2 和 CK 的深 0~50 cm 平均剖面土壤水分含量分别为: 14.60%、15.37% 和 13.87%; 0~30 cm 各处理剖面土壤水分变化较大; T2 和 CK 处理在 30~40 cm 深度剖面土壤水分变化较小; 40~50 cm 各处理剖面土壤水分含量较高。拔节期,由于受水分胁迫的影响, T1 和 T2 处理上层 0~40 cm 土壤水分变化较 40~50 cm 剧烈,主要是在拔节期作物根系较深,需水大导致深层土壤水分变化较大; CK 处理 20~30 cm 土壤水分变化较小,其他土层变化均较大。抽雄吐丝期,由于作物需水较大, T1 和 T2 处理土壤表层水分变化大,由于拔节期水分胁迫影响,导致 T1 处理此时土壤含水量较低; 乳熟期,由于拔节期和抽雄期水分胁迫影响, T1 和 T2 处理土壤水分含量均较低, CK 处理与其他各生育期的变化不大。

### 2.3 关键生育期水分胁迫对土壤贮水量的影响

不同生育阶段 0~50 cm 土层土壤贮水量分析发

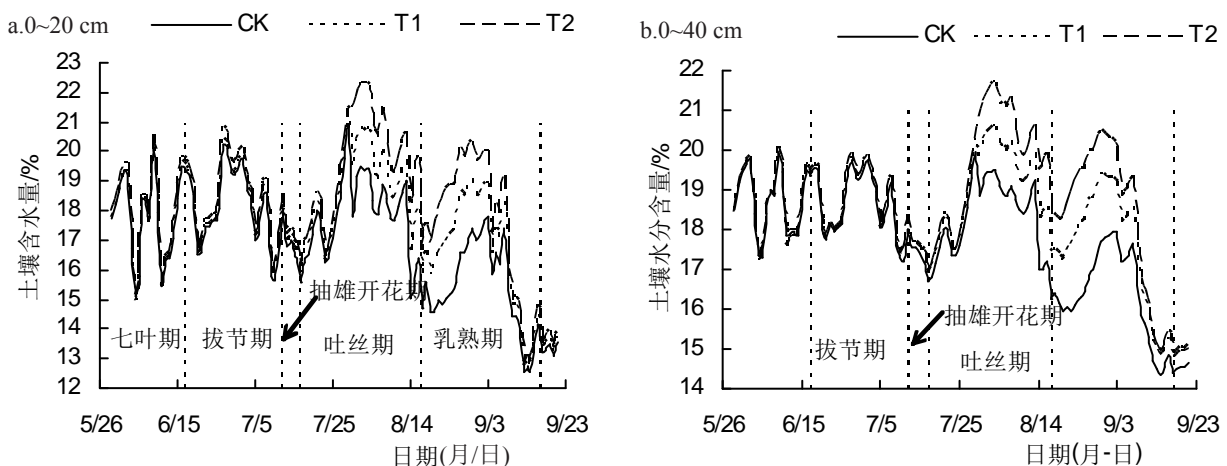


图 1 不同水分胁迫下春玉米 0~20 cm 和 0~40 cm 土壤温度变化

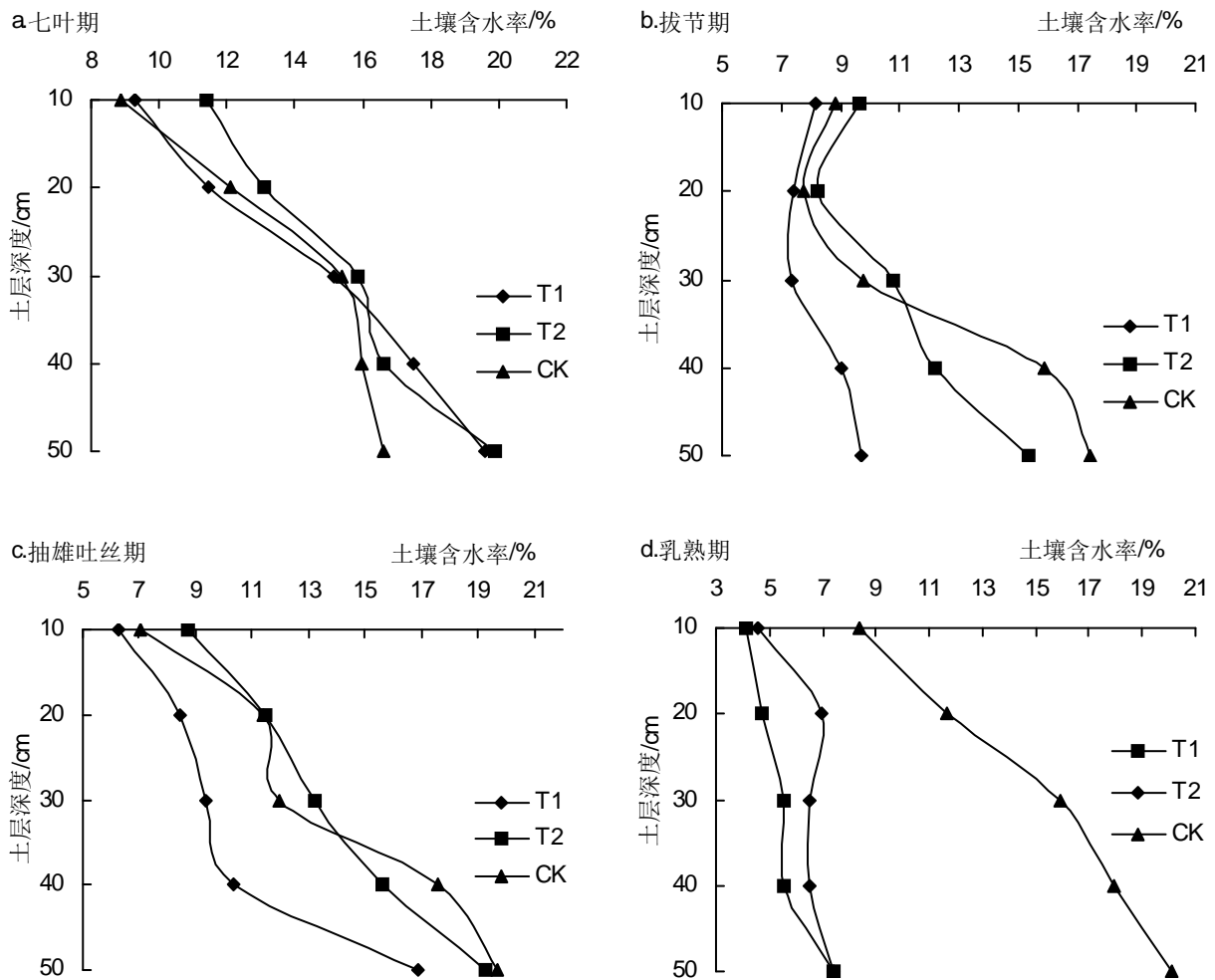


图2 关键生育期不同处理剖面土壤含水量变化

现,不同处理土壤贮水量变化趋势不同,随着水分的控制,T1和T2处理土壤贮水量逐渐减少,CK处理土壤贮水量位于107.5~128.7 mm之间,能够满足不同生育阶段春玉米耗水需要。三叶期,不同处理土壤贮水量介于112.9~128.7 mm之间,各处理间无显著的差异。七叶期,T1、T2和CK处理间土壤贮水量差异不显著。拔节期,T1处理土壤贮水量比CK处理减少了40%,T2处理比CK处理减少了17%,T2处理与CK间土壤贮水量差异不显著。抽雄吐丝期,T1处理土壤贮水量比CK处理减少了43%,T2处理比CK处理减少了19%,T2处理与CK间土壤贮水量差异不显著。受水分胁迫的影响,乳熟期T1和T2处理土壤贮水量均较低,比CK分别减少了72%和57%,与CK间土壤贮水量差异显著。

2.4 关键生育期水分胁迫对春玉米水分利用效率的影响

不同水分胁迫下春玉米耗水量最终反映到经济产量及其产量构成要素上。由表1可以看出,不同处理

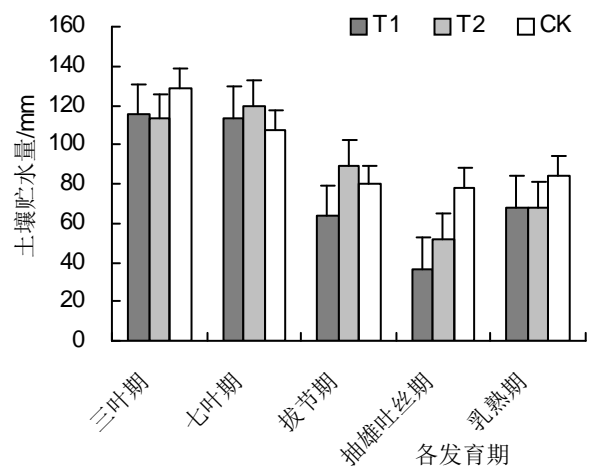


图3 不同处理春玉米各发育期0~50 cm 土层土壤贮水量

的果穗长、果穗粗和百粒重变化不同,T1<T2<CK;与CK相比,随着水分胁迫的持续,T1和T2处理的果穗长、果穗粗和百粒重逐渐减小。T1和T2处理果穗

表2 不同水分胁迫下春玉米产量构成和水分利用效率

处理	果穗长/cm	果穗粗/cm	百粒重/g	耗水量/mm	产量/(kg/hm <sup>2</sup> )	WUE/(g/kg)
T1	6.9±2.87a	2.48±0.85b	25.38±0.76b	330.19±8.22b	3650.84±749.86a	9.28±2.54a
T2	11.48±2.97b	4.18±0.78b	26.19±2.25a	490.34±23.61b	4968.41±522.48a	10.53±0.58b
CK	13.23±1.48b	4.98±0.16b	30.87±2.27a	859.30±24.17a	10851.62±579.24b	12.12±0.32a

长分别减小了47.8%和13.2%，果穗粗减少了50.2%和16.1%，百粒重减少了17.8%和15.2%，产量减少了66.4%和54.2%，产量水平WUE减少了23.4%和13.1%。不同水分胁迫处理，产量水平WUE达到了显著水平。水分胁迫导致了耗水量的减少，果穗长较短，百粒重小，最终影响春玉米产量，产量水平WUE的减小是由于产量降低和耗水量减小所致。

### 3 结论与讨论

(1)从土壤温度来看，拔节期和抽雄期2个干旱处理的土壤温度明显高于正常灌溉处理。从吐丝期开始，无论0~20 cm还是0~40 cm，抽雄期干旱处理的土壤温度高于拔节期干旱处理，乳熟后期，各处理的土壤温度基本一致。关键生育期水分胁迫导致土壤温度升高，蒸发加速，最终会对产量造成影响。

(2)从土壤水分动态变化看，七叶期前，各处理的土壤水分变化不大。控水开始，各处理表层土壤水分变化均较大。受水分胁迫的影响，拔节期干旱处理和抽雄期干旱处理20~50 cm土壤水分变化较大，控水开始，土壤水分含量急剧下降。随着春玉米生长发育的需要，乳熟期时，各控水处理土壤含水量较低。

(3)从土壤储水量看，三叶期和七叶期，各处理土壤储水量无显著差异；控水开始，拔节期干旱处理和抽雄期干旱处理土壤储水量急剧减少，抽雄吐丝期，拔节期干旱处理较正常灌溉处理减少约50%，乳熟期，拔节期干旱处理和抽雄期干旱处理较正常灌溉处理分别减少72%和57%，春玉米生长发育受到严重限制。

(4)从水分利用效率和产量变化看，由于受到水分胁迫的影响，拔节期干旱处理和抽雄期干旱处理的果穗长和果穗粗较正常灌溉处理分别减小约50%和15%；百粒重和水分利用效率的减小幅度不大，分别为20%和15%。干旱处理的减产幅度较大，由于春玉米关键生育期缺水，导致其减产50%以上，对生长发育产生严重的影响。

春玉米拔节期是生长逐渐进入营养生长和生殖生长并进时期，这一时期是玉米一生中生长发育最旺盛的阶段，干物质积累开始增加，叶面蒸腾加大，是需水的关键期。拔节期干旱将使春玉米营养体生长不良，

同时会影响幼穗的分化，分化的小穗和小花数目减少，造成植株矮小，结实器官生长发育不良，最终导致春玉米严重减产<sup>[19,27]</sup>。春玉米拔节期受水分胁迫影响，土壤表层含水量较少，发育后期土壤含水量较正常灌溉处理减少了约72%，造成减产约67%，说明拔节期的干旱将对春玉米造成严重减产，若发生干旱并且干旱持续时间较长，需要及时灌溉。

春玉米抽雄期是由营养生长转向生殖生长的关键时期，若受到干旱影响，玉米光合作用降低，淀粉酶活性受到抑制，影响籽粒淀粉合成、运输与积累，进而造成玉米穗出现秃顶显现，导致春玉米百粒重降低，造成玉米减产。抽雄期春玉米受到水分胁迫的影响，土壤含水量减少，蒸发加强，土壤温度升高，严重影响其生长发育<sup>[28]</sup>。土壤含水量较正常灌溉处理减少了约57%，造成减产约55%，百粒重的减少幅度较大。抽雄期干旱直接影响春玉米的产量，造成严重的减产，并且拔节期持续干旱对春玉米的影响远大于抽雄期持续干旱的影响。由于本研究基于1年的野外试验观测资料，试验数据较少，其结果还需要进一步验证。

### 参考文献

- [1] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(1): 185-212.
- [2] Neumann P M. Coping Mechanisms for Crop Plants in Drought-prone Environments [J]. *Ann Bot*, 2008, 101(7): 901-907.
- [3] Alam M R, Nakasathien S., Sarobol E., et al. Responses of physiological traits of maize to water deficit induced at different phenological stage[J]. *Kasetsart Journal: Natural Science*, 2014, 48(2): 183-196.
- [4] Dai, Aiguo. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(1): 52-58.
- [5] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013: 1535.
- [6] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate Trends and Global Crop Production since 1980[J]. *Science*, 2011, 333(6042): 616-

- 620.
- [7] Xu Z. Z., Zhou G. S., Wang Y. L., et al. Changes in Chlorophyll Fluorescence in Maize Plants with Imposed Rapid Dehydration at Different Leaf Ages[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2008, 27(1): 83-92.
- [8] Saglam A, Kobayashi N, Ito O., et al. Leaf rolling reduces photosynthetic loss in maize under severe drought[J]. *Acta Botanica Croatica*, 2017, 73(2): 315-332.
- [9] 周海香, 胡梦琪, 刘文兆, 等. 董志塬区气象干旱特征及其对作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 199-204.
- [10] 于庆峰, 苗庆丰, 史海滨, 等. 秸秆覆盖量对土壤温度和春玉米耗水规律及产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 111-116.
- [11] 杨宏伟, 杨正华, 侯淑梅, 等. 甘肃河西地区膜下滴灌条件下春玉米田水盐特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(2): 213-219.
- [12] 任丽雯, 马兴祥. 石羊河流域水分胁迫对玉米生长发育指标和产量的影响[J]. *干旱气象*, 2014, 32(5): 760-764.
- [13] 石耀辉, 周广胜, 王秋玲, 等. 夏玉米对土壤水分持续减少的响应及其转折点阈值分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 295-304.
- [14] 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.
- [15] 冯晓钰, 周广胜. 夏玉米叶片水分变化与光合作用和土壤水分的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 177-185.
- [16] 王秀领, 阎旭东, 徐玉鹏, 等. 不同耕作方式对春玉米土壤水分、温度及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(3): 92-98.
- [17] 蔡福, 米娜, 纪瑞鹏, 等. 关键生育阶段持续干旱对东北春玉米光合特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1578-1589.
- [18] 蒋菊芳, 赵福年, 张宇林, 等. 干旱胁迫下春玉米叶片对光强和 CO<sub>2</sub> 浓度的反应[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(36): 43-48.
- [19] 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.
- [20] 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [21] 张淑杰, 班显秀, 纪瑞鹏, 等. 基于 GIS 的农田土壤含水量预报方法研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(5): 1043-1047.
- [22] 米娜, 纪瑞鹏, 张玉书, 等. 半湿润区雨养玉米农田水分利用效率对环境因子的响应[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 2911-2919.
- [23] 王春乙, 蔡菁菁, 张继权. 基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 238-245.
- [24] 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [25] 张淑杰, 周广胜, 李荣平. 基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 695-704.
- [26] 侯连涛, 江晓东, 韩宾, 等. 不同覆盖处理对冬小麦气体交换参数及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 58-63.
- [27] 王俊强, 韩业辉, 于运凯, 等. 拔节期和抽雄吐丝期干旱胁迫对黑龙江省玉米产量及农艺性状的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2016(1): 37-42.
- [28] 赵天宏, 沈秀瑛, 杨德光. 抽雄期水分胁迫对玉米籽粒产量及其果穗性状的影响[J]. *辽宁农业科学*, 2002(6): 5-7.