文章编号:1000-7601(2020)06-0226-08 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.06.30

干旱区春玉米生长对持续干旱的响应机制

蒋菊芳[1,2],王润元[2],张　凯[2],杨　华[1],魏育国[1]

(1.甘肃省武威市气象局,甘肃 武威 733000;2.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开放实验室,甘肃 兰州 730020)

摘　要:干旱限制作物生长发育和产量形成,要科学解除干旱,需明确作物受旱开始时间和对干旱的响应机制。本文以春玉米"科河 28 号"为材料,设置正常灌溉和持续干旱两种处理,探求干旱区大旱年干旱发生发展过程中春玉米生长受限和干旱胁迫的旱信号、显著影响期及土壤水分阈值。结果表明:(1)捕捉大旱年干旱对田间指标影响的旱信号,试验处理 21 d 叶片含水率开始减小,试验处理 28 d 影响株高和叶面积增长,试验处理 32 d 影响叶片干物质积累。(2)解除持续干旱产生不可逆影响的时间,株高、叶面积、各器官干物质积累和含水率分别在试验处理 49、56、63 d 和 70 d;最小土壤贮水量为 74.6、69.0、58.0 mm 和 56.5 mm,最大土壤水分亏缺量为 30.4、37.8、47.2 mm 和 43.6 mm。(3)持续干旱对春玉米干物质积累和含水率的影响,叶片>叶鞘>茎>穗,且持续干旱造成经济产出小。(4)持续干旱对田间指标的影响效果为:拔节期显著,抽雄期最大,乳熟期出现负增长。(5)持续干旱对产量构成的影响:与正常灌溉相比,果穗长减小 70%,果穗粗减小 45%,秃尖长增大 33%,百粒重减小 73%,株子粒重减小 84%,理论产量减小 85%。(6)干旱持续 21 d 是春玉米受旱早信号,49 d 是影响不可逆期。春玉米三叶~七叶期和灌浆后期少灌水或不灌水对产量影响较小,拔节水、抽雄水是保障产出的关键水。

关键词:持续干旱;春玉米;生长指标;土壤贮水量;土壤水分亏缺量

中图分类号:S162.5;S513　　**文献标志码**:A

Response mechanism of spring maize growth to continuous drought in arid area

JIANG Jufang[1,2], WANG Runyuan[2], ZHANG Kai[2], YANG Hua[1], WEI Yuguo[1]

(1. *Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province*, *Wuwei*, *Gansu* 733000, *China*;
2. *Institute of Arid Meteorology of China Meteorological Administration*, *Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province*, *Key Laboratory of Arid Change and Disaster Reducing of CMA*, *Lanzhou*, *Gansu* 730020, *China*)

Abstract: Drought restricts crop growth and yield formation. To scientifically relieve drought, it is necessary to make clear about the beginning time and response mechanism to the drought. This paper took the spring maize Kehe 28 as the material and the two treatments of normal irrigation and continuous drought were set up during the whole growth stage. The changes of spring maize, the early signals of drought stress, the period of significant influence, and the threshold of soil moisture were explored during drought occurrence and development in the arid area. The results showed that: (1) To capture the early signals of the drought effects on field indicators during drought years, water content of leaves started to decrease in 21 d after experimental treatment, plant height and leaf area growth were affected by 28 d after experimental treatment, and dry matter accumulation of leaves was affected by 32 d after the treatment. (2) In the initial period when the significant effects of continuous drought were lifted, plant height, leaf area per plant, dry matter accumulation, and water content of each organ were 49, 56, 63 d, and 70 d after experimental treatment, respectively. The minimum soil water storage were 74.6, 69.0, 58.0 mm, and 56.5 mm, and the maximum soil water deficits were 30.4, 37.8, 47.2 mm, and 43.6 mm, respectively. (3) The effects of

收稿日期:2020-03-09　　**修回日期**:2020-05-26

基金项目:国家自然基金(41275118,2012CB955304);公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-2);甘肃省气象局十人计划(GSMArc2019-03);干旱基金(IAM202015);武威市科技计划项目(WW180213)

作者简介:蒋菊芳(1979-),女,甘肃武威人,副高级工程师,主要从事农业气象与生态气象业务和科研工作。E-mail: wwqxjjf@163.com

continuous drought on dry matter accumulation and moisture content of spring maize were: leaves > sheaths > stems > ears, and the continued drought caused a small economic output. (4) The effects of continuous drought on field indicators were significant at the jointing stage, the tasseling stage was the largest, and the milk ripening stage had a negative increase. (5) The effects of continuous drought on the yield composition: compared with normal irrigation, the ear length decreased by 70%, ear diameter decreased by 45%, bare tip length increased by 33%, seed weight decreased by 73%, seed weight decreased by 84%, and theoretical yield decreased by 85%. (6) The drought duration of 21 d was the early signal of drought in spring maize in the arid area, and the drought duration of 49 d was irreversible period. Spring maize was less effected on yield for less or no irrigation during the three to seven-leaves stage and late filling stage. The jointing stage water and tasseling stage water were the key to ensure output.

Keywords: continuous drought; spring maize; growth indicators; soil water storage; soil water deficit

气候变暖、水资源短缺直接影响着农业生产、生态环境和社会经济的可持续发展。极端气候事件频发增加了农业生产的不稳定性,特别是干旱发生频率高、持续时间长、影响范围广、造成损失重,成为威胁世界粮食安全最主要的因素之一[1-2]。21 世纪前 10 a 全球干旱面积增加了 8%,而严重受旱面积(减产 30%以上)占总受旱面积(减产 10%以上)的比例由 20 世纪 50 年代的 34%增加到了 58%,并导致世界玉米产量下降了 3.8%[3]。玉米为我国第二大粮食作物,需水量较高,生育进程对水分胁迫较敏感[4-6]。大量研究表明干旱胁迫抑制植株生长,降低叶片光合能力和影响植株形态指标、产量性状,导致植株矮小、穗长缩短、千粒重显著减小等[7-8]。玉米应对轻度干旱采取避旱或耐旱方式,调整适应干旱逆境的生理生态策略,而应对中度以上干旱就需要人为干预解除干旱[9-11]。科学的防旱抗旱措施和对作物干旱发生发展的早期辨别、认识及科学评估对保障粮食生产安全具有重大意义[12-14]。明确作物受旱开始时间、受旱严重程度和发展特征,对解除干旱灾害非常重要[15-16]。但目前多数研究以降水为主要水源、在盆栽条件下进行的干旱复水研究居多,而针对干旱区大田玉米大旱年份早期预报预警、持续干旱的影响机制,以及根据水库蓄水、科学调补水资源、科学解除干旱造成损失的研究较少,且此类研究显得更为迫切。本试验研究以确定持续干旱影响开始时间、作物对持续干旱的响应机制为目标,期望对解除干旱、科学补水、调水提供理论依据和科学指导。本文以干旱区大田春玉米为试验材料,探索持续干旱胁迫对春玉米生育的影响,为干旱区春玉米生产应对干旱灾害、解除干旱灾害提供理论参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验在甘肃省武威市农业气象试验站(37°53′N, 102°53′E)进行,该站地处腾格里沙漠边缘与河西走廊绿洲过渡地带,为典型内陆干旱气候区,海拔 1 534.8 m,年平均气温 8.1℃,多年平均降水量为 171 mm,主要集中在 6—9 月。土壤质地为砂壤土,呈微碱性;地下水位约 25 m,一般采用井水补灌;有机质含量 0.7%,pH 为 8.3,10~50 cm 土壤容重 1.50~1.67 g·cm^{-3},田间持水量 19.2%~23.4%,永久凋萎湿度 5.4%~6.3%。

1.2　试验设计

试验于 2016—2017 年进行,试验品种春玉米“科河 28 号”,4 月中旬播种,9 月下旬收获,点播播种,播种密度约 46 395 株·hm^{-2}。试验设正常灌溉处理(CK)和全生育期持续干旱处理(T),每种处理设 2 个点,每个点 6 个重复,处理间用 1.5 m 深隔水膜隔离,防止土壤水分横向渗透。采样、田间管理一致,每个点试验田面积约为 165 m^2,播种行距 30 cm,株距 25 cm,播种深度约 15~20 cm。播种前依据土壤墒情计算,灌溉底墒水 2 000 m^3·hm^{-2},播种前施尿素、磷二铵,灌头水时追施尿素。CK 处理灌溉方案为底墒水+灌溉 4 水(拔节水 1 200 m^3·hm^{-2},抽雄水 1 800 m^3·hm^{-2},灌浆水 2 200 m^3·hm^{-2},乳熟水 1 200 m^3·hm^{-2}),T 处理灌溉方案为只灌底墒水。试验春玉米生育期间降水量 2016 年为 109.4 mm,≥10℃活动积温 3 188.2℃;2017 年降水量为 86.6 mm,≥10℃活动积温 3 342.8℃。

1.3　观测指标及方法

试验按照《农业气象观测规范》[17]观测,春玉米全生育期以每隔 7 天的频率同时同地观测土壤含水率、植株生长高度(每个处理 6 个重复,每个重复

6 株)、叶面积、干物质(每个重复 3 株),三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期和成熟期加测各要素,成熟后进行地段实产测定和产量结构分析(每个重复 10 株)。干物质取样后将植株按器官进行分类(叶片、叶鞘、茎秆、果穗),将样本放入干燥箱内,温度控制在 105℃左右杀青 1h,之后在 85℃恒温下烘干,待样本完全烘干后分别称取各器官的干物质重量。采用人工土钻取土,烘干称重法测定。根据农业干旱等级标准[18],随发育进程持续干旱对春玉米的影响分轻旱随发育进程、中旱、重旱和特旱。

土壤重量含水率:

$$W = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\%$$

式中,w 为土壤重量含水率,m_w 为湿土重量(g),m_d 为干土重量(g)。

土壤水分贮存量:

$$D = \rho \times h \times w \times 10$$

式中,D 为土壤水分总贮存量(mm),ρ 为地段实测土壤容重(g·cm^{-3}),h 为土层厚度(cm),w 为土壤重量含水率(%)。

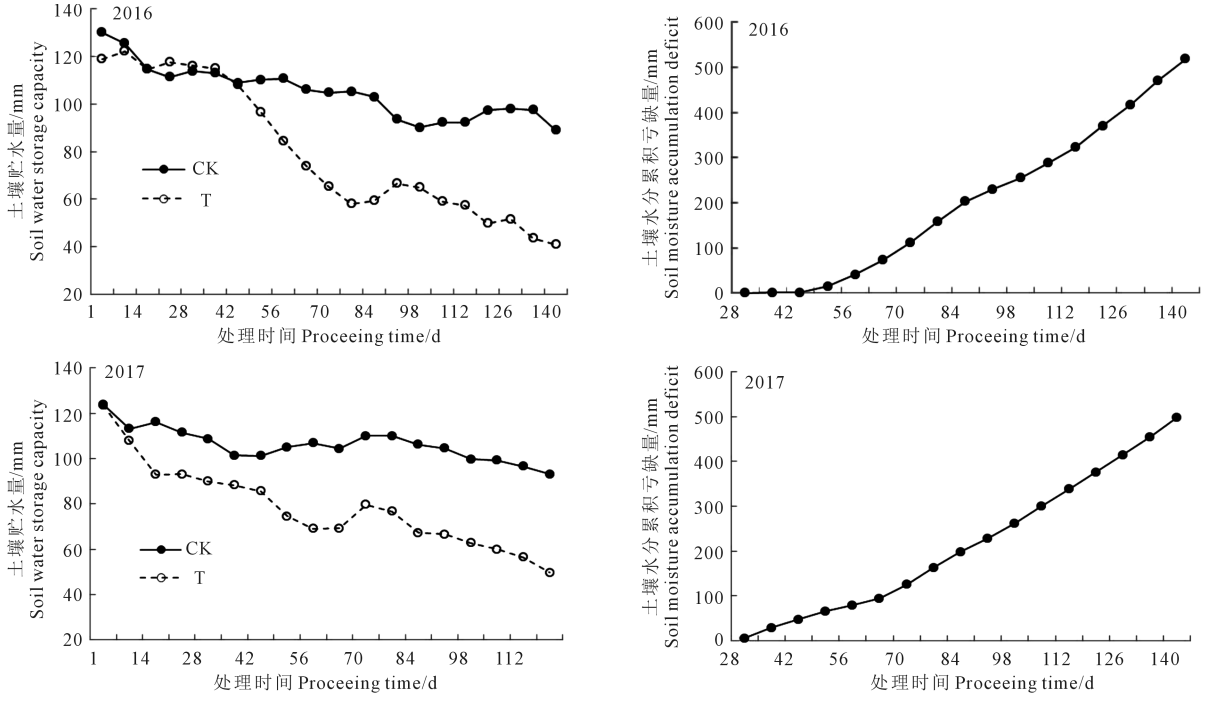
1.4 数据统计分析

数据采用 EXCEL 和 SPSS 21.0 分析软件进行相关分析。不同处理之间的差异性在 0.05 水平以上为影响显著。

2 结果与分析

2.1 土壤水分及植株形态对持续干旱的响应

2.1.1 土壤水分 播种前对试验地块土壤水分进行统一处理,在干旱持续发展过程中春玉米耕作层(0~50 cm)土壤贮水量在两种处理下呈现为:正常灌溉处理(CK)土壤贮水量随生育进程和处理时间略有波动,但总体维持在 105.1±2.4 mm(2016 年)、106.2±7.4 mm(2017 年),根据春玉米生长需求,处于适宜状态;而全生育期持续干旱处理(T)土壤贮水量随干旱处理时间呈持续下降状态,最终下降到 40.9、49.8 mm,早已不能满足春玉米生长发育所需;两种试验处理间呈极显著性差异($P<0.001$),达到干旱胁迫试验预设效果。全生育期持续干旱胁迫处理组(T)的土壤贮水量与干旱持续时间可用方程 $y=0.091x^2-6.452x+136.83$(2016 年,$R^2=0.9295$,$P<0.001$),$y=0.184x^2-6.574x+120.06$(2017 年,$R^2=0.9026$,$P<0.001$)较好的拟合。依据每次 CK 与 T 土壤贮水量的差值,可以计算土壤水分持续减少相对应的土壤水分累积亏缺量,土壤水分累积亏缺量与试验处理时间呈较好的线性关系:$y=37.082x-65.023$($R^2=0.9919$,$P<0.001$,2016 年),$y=36.501x+50.316$($R^2=0.9984$,$P<0.001$,2017 年)(图 1)。



注:CK:正常灌溉处理;T:干旱胁迫处理;H:土壤水分累积亏缺量,下同。

Note: CK: Normal irrigation treatment, T: drought stress treatment, H: soil moisture accumulation deficit; The same blow.

图 1 两种处理下春玉米大田土壤贮水量和水分累积亏缺量随处理时间的变化

Fig.1 The changes of soil water storage capacity and water accumulation deficit in field spring maize under two treatments with treatment time

2.1.2　植株形态　在大田试验过程中,干旱区春玉米植株形态指标株高、叶面积、有效叶片数是反映植株受旱和生长状况最直观的指标,在试验处理初期各形态指标差异不大,当土壤水分下降到一定程度后,T 与 CK 各指标差异显著。从图 2、表 1 看,CK 株高增长符合 Logistics 生长曲线,而 T 株高增长到一定高度后不再增加。两组处理株高动态变化拟合为一元二次曲线($P<0.01$),曲线交点即为干旱出现的早信号,达到显著性差异时,干旱抑制株高增长、产生不可逆影响,T 株高增长受干旱胁迫早信号为试验处理 28 d,显著影响期为试验处理 49 d,相对应的土壤贮水量为 74.6 mm,此时土壤水分亏缺量为 30.4 mm。从发育阶段看,株高在三叶~七叶期差异不大,在拔节期差异显著,抽雄期差异最大,株高 T 较 CK 偏小幅度达 17%~67%。CK 单株总叶面积呈“缓慢增大~快速增大~缓慢下降”变化趋势,而 T 单株总叶面积呈“缓慢增大和缓慢下降”趋势,叶面积受干旱胁迫早信号为试验处理 28 d,两种处理产生显著性差异的时间为试验处理 56 d,相对应的土壤贮水量为 69.0 mm,土壤水分亏缺量为 37.8 mm。单株叶面积在三叶~七叶期受干旱胁迫影响差异不大,拔节~抽雄期单株叶面积相差 282.5~1 729.6 cm^2,T 较 CK 偏小 36%~90%,乳熟期部分叶片枯黄,单株叶面积出现负增长,且 T 叶片枯黄时间偏早、量偏多。

2.2　植株干物质积累对持续干旱的响应

2.2.1　不同器官干物质量积累　干旱通过影响光合产物向各器官的分配转运,最终表现在各器官干物质积累不同。试验中,CK 春玉米不同器官干物质积累表现为持续增加,而 T 叶片、叶鞘干物质缓慢增加,茎和整株干物质积累增加速率很小,T 严重影响穗的形成。两种处理试验初期差别很小,随处理时间持续、土壤水分逐步减低呈现极显著性差异。T 与 CK 相比,春玉米叶、鞘、茎和植株干物质积累均显著降低(图 3)。CK 土壤水分适宜,春玉

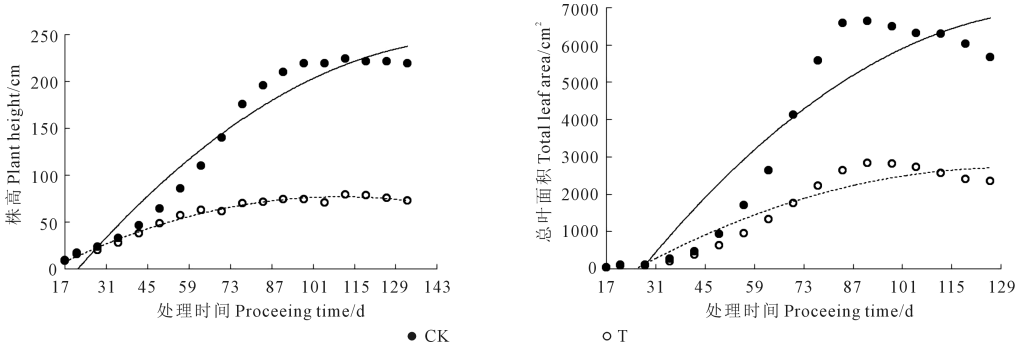


图 2　两种处理下春玉米株高和植株总叶面积随处理时间的变化

Fig.2　The change of plant height and total leaves area of spring maize under two treatments with treatment time

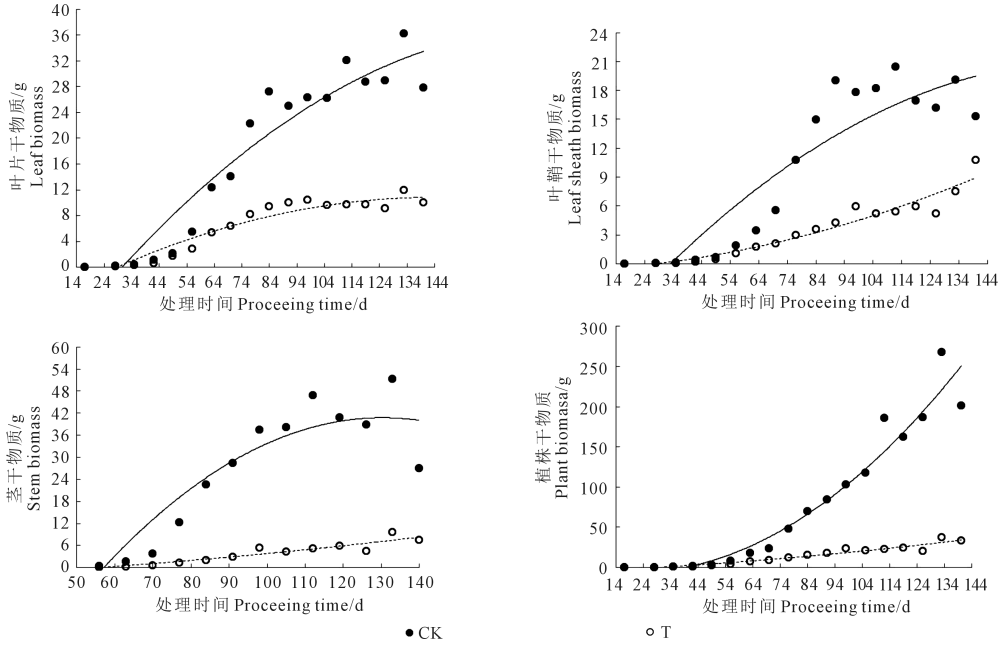


图 3　两种处理下春玉米不同器官干物质随处理时间的变化

Fig.3　The change of dry matter in different organs of spring maize under two treatments with treatment time

米的叶、鞘、茎干物质积累在整株占比较小、穗占比较大;而 T 在持续干旱胁迫下叶、鞘、茎积累干物质占比相对较大,穗很小。

两种处理各器官干物质积累变化拟合为一元二次曲线($P<0.01$)。由表 1 见,曲线交点(t)显示干旱对干物质积累影响的早信号,干物质积累叶片、叶鞘、茎、植株分别在试验处理的 32、34、57 d 和 42 d。各处理对春玉米不同器官干物质积累产生不可逆影响的时间,叶片、叶鞘、茎和植株分别在持续干旱胁迫处理 63、70、77 d 和 63 d,相对应的土壤贮水量分别为69.3、65.3、58.0 mm 和 74.0 mm,土壤水分亏缺量为 35.1、39.4、47.2 mm 和 32.1 mm。根据受胁迫的早信号时间,植株各器官干物质积累对干旱胁迫的敏感性表现为:叶片>叶鞘>茎>穗。

2.2.2 不同发育期干物质增长 CK 与 T 植株干物质增长量存在显著性差异,特别是试验处理达到 63 d(拔节期)开始叶片和整株干物质增长量出现显著性差异,相对应的土壤贮水量为 74.0 mm 和 69.3 mm,土壤水分亏缺量为 32.1 mm 和 35.1 mm。T 在试验处理 126 d(乳熟期)出现负增长,相对应的土壤贮水量为 51.7 mm 和 49.8 mm,土壤水分亏缺量为 46.3 mm 和 43.3 mm(表 2)。

表 1 持续干旱对春玉米影响的早信号(t)、显著影响期(T)、土壤水分贮存量(D)和亏缺量(H)

Table 1 The early signal, significant effects stage, soil moisture storage and deficit of the effects of continuous drought on springmaize

指标 Indicator	处理 Treatment	方程 Equations	R^2	t/d	P	T/d	D/mm	H/mm
株高/cm Plant height	CK	$y=-0.013x^2+4.169x-82.51$	0.956		<0.01			
	T	$y=-0.008x^2+1.758x-19.74$	0.987	28	<0.01	49	74.6	30.4
总叶面积/cm² Total leaf area	CK	$y=-0.475x^2+140.6x-3447$	0.880		<0.01			
	T	$y=-0.239x^2+63.06x-1436$	0.903	28	<0.01	56	69.0	37.8
叶片干物质/g Leaf biomass	CK	$y=-0.001x^2+0.554x-15.52$	0.906		<0.01			
	T	$y=-0.0001x^2+0.232x-5.968$	0.913	32	<0.01	63	69.3	35.1
叶鞘干物质/g Leaf sheath biomass	CK	$y=-0.001x^2+0.352x-10.58$	0.834		<0.01			
	T	$y=0.0001x^2+0.013x-0.697$	0.926	34	<0.01	70	65.3	39.4
茎干物质/g Stem biomass	CK	$y=0.0001x^2+0.388x-15.05$	0.800		<0.01			
	T	$y=0.0001x^2-0.030x+0.106$	0.903	57	<0.01	77	58.0	47.2
植株干物质/g Plant biomass	CK	$y=0.019x^2-2.019x+41.92$	0.932		<0.01			
	T	$y=0.0001x^2-0.071x+1.489$	0.759	42	<0.01	63	74.0	32.1
叶片含水率/% Moisture content of leaves	CK	$y=-0.0001x^2-0.013x+87.03$	0.964		<0.01			
	T	$y=-0.0001x^2-0.051x+87.79$	0.962	21	<0.01	77	76.8	33.3
叶鞘含水率/% Moisture content of leaf sheath	CK	$y=-0.001x^2+0.059x+90.29$	0.969		<0.01			
	T	$y=-0.002x^2+0.113x+90.30$	0.987	56	<0.01	70	79.6	30.4
茎含水率/% Moisture content of steam	CK	$y=-0.0001x^2+0.022x+94.25$	0.931		<0.01			
	T	$y=-0.0001x^2-0.08x+95.20$	0.900	56	<0.01	84	59.4	43.6
穗含水率/% Moisture content of ear	CK	$y=0.006x^2-1.684x+176.9$	0.891		<0.01			
	T	$y=-0.011x^2+1.896x+10.36$	0.981	81	<0.01	112	56.5	40.2
植株含水率/% Moisture content of plant	CK	$y=-0.0001x^2+0.053x+85.86$	0.908		<0.01			
	T	$y=-0.003x^2+0.310x+80.62$	0.978	27	<0.01	98	62.7	37.0

注:CK:正常灌溉处理,T:干旱胁迫处理。

Note: CK: Normal irrigation treatment, T: Drought stress treatment.

表 2 两种处理下春玉米植株干物质增长随发育期的变化

Table 2 The change of plant biomass increase of spring maize with growth stages under two treatments

年份 Year	处理 Treatment	叶片 Leaf				植株 Plant			
		七叶期 Seven leave stage	拔节期 Jointing	抽雄期 Tasseling	乳熟期 Milkiness	七叶期 Seven leaves stage	拔节期 Jointing	抽雄期 Tasseling	乳熟期 Milkiness
2016	T	0.46a	10.92a	1.79a	−1.43a	0.61a	17.18a	7.07a	0.88a
	CK	0.40a	24.77b	1.24a	6.59b	0.57a	45.79b	37.87b	124.32b
2017	T	0.39a	2.16a	2.40a	−0.21a	0.49a	2.83a	3.66a	3.51a
	CK	0.54a	6.05b	12.70b	4.46b	0.71a	8.60b	39.35b	110.81b

注:表中数据为平均值,样本数 n 为 6;不同小字母表示处理间差异显著($P<0.05$);下同。

Note: The data in the table were means, $n=6$; the different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$); The same below.

2.3　植株含水率变化对持续干旱的响应

2.3.1　不同器官含水率变化　生育初期春玉米生长以叶、鞘为主,植株器官含水率两种处理差别很小,T 甚至大于 CK;生育中后期,两种处理春玉米叶、鞘、茎、穗和植株含水率均明显下降;随干旱胁迫持续、土壤水分逐步减低,两种处理间表现出极显著性差异,其动态变化呈极显著一元二次关系($P<0.01$)(图 4)。

从表 1 看,影响不同器官含水率变化的早信号,叶片、叶鞘、茎、穗和植株分别在试验处理 21、56、56、81 d 和 27 d。植株各器官叶片、叶鞘、茎、穗和整株含水率受干旱影响不可逆时间分别为 77、70、84、112 d 和 98 d,相对应的土壤贮水量为 76.8、79.6、59.4、56.5 mm 和 62.7 mm,土壤水分亏缺量 33.3、30.4、43.6、40.2 mm 和 37.0 mm。根据含水率受影响的早信号时间,植株各器官含水率对干旱胁迫的敏感性表现为:叶片>叶鞘、茎>穗。

2.3.2　不同发育期含水率变化　春玉米不同发育期 CK 与 T 叶片、叶鞘和整株含水率变化量存在显著性差异,持续干旱使含水率显著减少。T 在拔节期(处理时间 63 d)开始叶片、叶鞘和整株含水率变化量出现负值且达到显著性差异,相对应的土壤贮水量为 74.0 mm 和 69.3 mm,土壤水分亏缺量为32.1 mm 和 35.1 mm。而 CK 在抽雄期(处理时间 98 d),叶片、叶鞘和整株才出现含水率负变化,相对应的土壤贮水量达 90.1 mm 和 99.7 mm(表 3)。

2.4　植株器官含水率与干物质对持续干旱的响应对比

在春玉米生育进程中,各器官干物质与含水率呈相反的变化趋势(如图 3,图 4)。对持续干旱的响应,各器官含水率与持续干旱的相关系数大于干物质(表 1)。各器官含水率变化幅度明显大于干物质,且叶片和叶鞘对持续干旱的响应差异,含水率较干物质土壤水分亏缺量偏小为 1.8 mm 和 9.0 mm,叶片和植株含水率响应时间提早 11~15 d,说明各器官含水率较干物质对持续干旱的响应更早、更敏感。

2.5　植株产量构成对持续干旱的响应

随着干旱程度加剧和影响时间的延长,干旱对植株产量构成各要素的影响呈现极显著性差异,果穗长相差 14.0~15.7 cm、果穗粗相差 2.4 cm、秃尖长

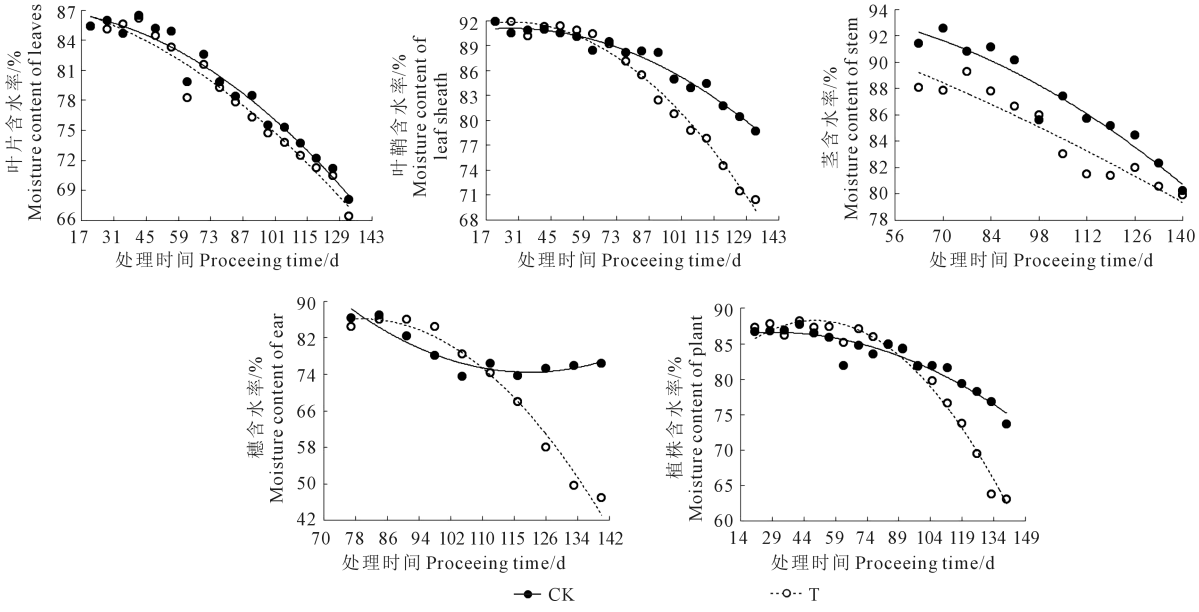


图 4　两种处理下春玉米各器官含水率随处理时间的变化

Fig.4　The change of water content in different organs of spring maize under two treatments with treatment time

表 3　两种处理下春玉米植株含水率随发育期的变化

Table 3　The change of water content of spring maize plants with growth stages under two treatments

年份 Year	处理 Treatment	叶片 Leaf				叶鞘 Leaf sheath				整株 Plant			
		七叶 Seven leave stage	拔节 Jointing	抽雄 Tasseling	乳熟 Milkiness	七叶 Seven leaves stage	拔节 Jointing	抽雄 Tasseling	乳熟 Milkiness	七叶 Seven leaves stage	拔节 Jointing	抽雄 Tasseling	乳熟 Milkiness
2016	T	2.29b	−1.92a	−6.42b	−7.07a	−1.35d	−0.88a	−3.10b	−5.54a	1.06b	−1.32a	−3.74b	−5.29b
	CK	2.05b	0.19b	−5.63b	−11.27b	−0.87d	2.66b	−4.75a	−13.86b	1.40b	1.06b	−1.49a	−10.94c
2017	T	3.88b	−4.24a	−4.96b	−0.10c	0.03c	−0.69a	−2.38b	−1.98c	2.33a	−2.81a	−3.15b	−0.16a
	CK	1.31b	0.39 b	−6.61b	−6.29a	2.40b	2.87b	−6.63a	−8.86a	1.43b	2.22b	−3.38 b	−11.10c

相差0.4~1.3 cm、百粒重相差21.0~21.7 g、株子粒重相差70.2~121.7 g、理论产量相差1160.0~2263.6 g·m^{-2}。全生育期持续干旱影响百分率:与正常灌溉相比,果穗长减小70%,果穗粗减小45%,秃尖长增大33%,百粒重减小73%,株子粒重减小84%,理论产量减小85%,相对应的土壤贮水量为40.9 mm和49.8 mm,相对应的土壤水分亏缺量为48.1 mm和43.3 mm(表4)。

表4 两种处理下春玉米产量构成对比

Table 4 The comparison of yield composition of spring maize under two treatments

年份 Year	果穗长/cm Ear length		果穗粗/cm Ear thickness		秃尖长/cm Bald tiplength		百粒重/g 100-grain weight		株籽粒重/g Plant grain weight		理论产量/(g·m^{-2}) Theoretical yield	
	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK
2016	7.5a	21.5b	2.5a	4.9b	2.5a	1.2b	7.7a	29.4b	15.3a	137.0b	229.8a	2493.4b
2017	5.5a	21.2b	2.8a	4.8b	2.7a	2.3b	7.9a	28.9b	17.9a	88.1b	249.4a	1189.4b

3 讨 论

作物在遭遇干旱胁迫时会发生一系列反应:生长速率减缓、光合产物减少、消耗增加、资源获取量减少,通过试验证明春玉米以降低株高、减小叶面积和减少有效叶片数为表征。在干旱发生发展过程中,作物受旱程度取决于缺水时间的长短、作物生长发育阶段,也取决于不同的物种和基因型等[19]。研究区春玉米一般于4月中旬播种,要经过一个较长时段的营养生长期,由于气温较低,春玉米生长缓慢,所以需水也较少,此时适度干旱利于蹲苗扎根。持续干旱试验早信号在叶片含水率上最先反馈,试验处理21 d发出预警信号,株高和叶面积在试验处理28 d发出预警信号,叶片干物质积累在试验处理32 d发出预警信号。持续干旱在试验处理49 d后株高呈显著性差异,春玉米拔节期表现出显著性负增长,进一步证明拔节期对干旱的敏感性。干旱虽然是一个缓慢的累积过程,但在干旱致灾过程的不同阶段,承灾体失水速度、受害程度等不尽相同[20],试验春玉米株高、叶面积、各器官含水率、干物质积累并未快速表现出显著减小,而是先采取保守性应激响应,而后被动适应,当干旱积累到一定程度,从叶片、叶鞘到茎、穗逐步减小,这符合作物生长中心转移规律。干旱的持续发展,最终对产量构成各要素产生显著影响,特别是经济产量。通过两年重复试验研究,对干旱区春玉米土壤水分持续减少的响应进行了详细分析。从春玉米各指标发出早信号开始到干旱胁迫影响差异显著的这段时间,需要调配灌溉,以挽回不可逆转的损害。试验期间2017年降水量偏少,再加上上一年干旱的后续影响,较2016年表现为干旱影响初始时间稍早,土壤贮水量较小,产量构成各要素值偏小。试验与周广胜等[21-22]以夏玉米为材料对土壤水分持续减少的研究有异曲同工的效果,但本试验在当地大田进行,为下一步开展关键发育期干旱胁迫和解除干旱试验打下了坚实基础。

4 结 论

本试验通过连续测定大田春玉米形态指标株高、单株叶面积、分器官干物质和含水率等的变化,对干旱区大旱年型持续干旱过程进行了模拟研究。对春玉米受干旱胁迫的早信号、受旱不可逆影响时间及其土壤贮水量和土壤水分亏缺量、以及产量构成等进行了分析。试验结果表明:(1)持续干旱对春玉米生长影响的早信号,试验处理21 d叶片含水率开始减小,试验处理28 d影响株高和叶面积增长,试验处理32 d影响叶片干物质积累。(2)持续干旱对形态指标的不可逆影响时间:株高、叶面积、各器官干物质积累和含水率分别在试验处理49、56、63 d和70 d;最小土壤贮水量为74.6、69.0、58.0 mm和56.5 mm,最大土壤水分亏缺量为30.4、37.8、47.2 mm和43.6 mm。(3)持续干旱对春玉米干物质积累和含水率的影响顺序为:叶片>叶鞘>茎>穗,干旱胁迫下叶、鞘、茎积累干物质占比相对较大,穗很小,造成经济产出小。(4)持续干旱对田间指标的影响效果为:拔节期显著,抽雄期最大,乳熟期出现负增长。(5)与正常灌溉相比,持续干旱对产量构成的影响依次为:果穗长减小70%,果穗粗减小45%,秃尖长增大33%,百粒重减小73%,株子粒重减小84%,理论产量减小85%。土壤贮水量为40.9~49.8 mm,土壤水分亏缺量为43.3~48.1 mm。(6)大旱年干旱区干旱持续21 d是春玉米受旱早信号,49 d是受旱影响不可逆期。春玉米三叶~七叶期和灌浆后期少灌水或不灌水对产量影响较小,拔节水、抽雄水是保障产出的关键。

参 考 文 献:

[1] 丁一汇,任国玉.中国气候变化科学概论[M].北京:气象出版社,2008,10-18.

[2] 黄荣辉,陈际龙,周连童,等.关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J].大气科学,2003,27(4):770-787.

[3] 张强.干旱技术的发展及其科学挑战[J].地球科学进展,2007,22(6):636-641.

[4] 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):2896-2905.
[5] 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.
[6] 韩希英,宋凤斌,王波,等.土壤水分胁迫对玉米光合特性的影响[J].华北农学报,2006,21(5):28-32.
[7] 张仁和,薛吉全,蒲军,等.干旱胁迫对玉米苗期植株生长和光合特性的影响[J].作物学报,2011,37(3):521-528.
[8] 宋凤斌,戴俊英.玉米对干旱胁迫的反应和适应性-玉米雌穗和雄穗生长发育对干旱胁迫的反应[J].吉林农业大学学报,2005,27(1):1-5,10.
[9] 赵丽英,邓西平,山仑.持续干旱及复水对玉米幼苗生理生化指标的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):59-61.
[10] 陈家宙,王石,张丽丽,等.玉米对持续干旱的反应及红壤干旱阈值[J].中国农业科学,2007,40(3):532-539.
[11] 白莉萍,隋方功,孙朝晖,等.土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J].生态学报,2004,24(7):1556-1560.
[12] Zhang Q, Zhang J, Sun G W, et al. Research on water-vapor distribution in the Air over Qilian Mountains [J], ACTA Meteor Sinica, 2008, 22(1):107-118.
[13] 何海军,寇思荣,王晓娟.干旱胁迫对不同株型玉米光合特性及产量性状的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):63-66.
[14] 杨晓光,于沪宁.夏玉米水分胁迫与反冲机制及其应用[J].生态农业研究,1999,7(3):27-31.
[15] 高延军,裴冬,张喜英,等.棉花调亏灌溉效应研究[J].中国农业生态学报,2004,12(1):136-139.
[16] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.调亏灌溉玉米生理指标及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,1998,14(4): 82-87.
[17] 中国气象局.农业气象观测规范:上卷[M].北京:气象出版社,1993:7-153.
[18] 中国气象局.GB32136-2015,农业干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2015.
[19] Wang R Y, Zhang Q, Wang Y L, et al. Response of corn to climate warming in arid areas in northwest China [J], Acta Botanica Sinica, 2004, 46(12):1387-1392.
[20] 麻雪艳,周广胜.夏玉米苗期主要生长指标的土壤水分临界点确定方法[J].生态学杂志,2017,36(6) :1761-1768.
[21] 胡明新,周广胜.拔节期干旱和复水对春玉米物候的影响及其生理生态机制[J].生态学报,2020,40(1):1-9.
[22] 纪瑞鹏,于文颖,冯锐,等.作物对干旱胁迫的响应过程与早期识别技术研究进展[J].灾害学,2019,34(2):153-160.

(上接第 175 页)

参 考 文 献:

[1] 操信春,任杰,吴梦洋,等.基于水足迹的中国农业用水效果评价[J].农业工程学报,2018,34(5):1-8.
[2] 操信春,吴普特,王玉宝,等.中国灌区水分生产率及其时空差异分析[J].农业工程学报,2012,28(13):1-7.
[3] 陈林.新疆节水灌溉发展现状、面临问题及建议[J].新疆农垦科技,2016,39(6):62-64.
[4] 山仑,邓西平,康绍忠.我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J].水利学报,2002,(9):27-31.
[5] 崔远来,李远华,陆垂裕.灌溉用水有效利用系数尺度效应分析[J].中国水利,2009,(3):18-21.
[6] 彭世彰,艾丽坤. 提高灌溉水利用系数,保障国家粮食安全与水安全[J].水资源保护,2012,28(3):79-82.
[7] Willaarts B A, Garrido A, Lechon Y, et al. Cross-sectoral implications of the implementation of irrigation water use efficiency policies in Spain: A nexus footprint approach[J].Ecological Indicators,doi:10.1016/j.ecolind,2019.105795.
[8] 王忠,周和平,张江辉.新疆农业用水定额技术研究应用[M].北京:中国农业科学技术出版社,2012:180-181.
[9] 彭世彰,高晓丽.提高灌溉水利用系数的探讨[J].中国水利,2012,(1):33-35.
[10] 许建中,赵竞成,高峰,等.灌溉水利用系数传统测定方法存在问题及影响因素分析[J].中国水利,2004,(17):39-41.
[11] 雷波,刘钰,许迪.灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J].农业工程学报,2011,27(1):10-14.
[12] 周和平,张明义,周琪,等.新疆地区农业灌溉水利用系数分析[J].农业工程学报,2013,29(22):100-107.
[13] 谭芳,崔远来,王建漳.灌溉水利用率影响因素的主成分分析——以漳河灌区为例[J].中国农村水利水电,2009,(2):70-73.
[14] 付晓.基于 Copula 函数的钢铁上市公司股票投资风险评价[D].马鞍山:安徽工业大学,2014.
[15] 江文婷.基于 GARCH-EVT-Copula 模型的开放式基金的风险度量及业绩评价[D].广州:华南理工大学,2011.
[16] 林正奎.基于 VaR-Copula 的信息安全评价模型研究[J].数学的实践与认识,2012,42(8):85-90.
[17] 《中国水利年鉴》编辑委员会.中国水利年鉴:2017[M].北京:中国水利水电出版社,2018.
[18] 中国灌溉排水发展中心,水利部农村饮水安全中心.2017 年中国灌溉排水发展研究报告[R].北京:水利部,2018.
[19] 李浩鑫,邵东国,尹希,等.基于主成分分析和 Copula 函数的灌溉用水效率评价方法[J].农业工程学报,2015,31(11):96-102.
[20] 姜潮,张旺,韩旭.基于 Copula 函数的证据理论相关性分析模型及结构可靠性计算方法[J].机械工程学报,2017,53(16):199-209.
[21] 杨丰顺,邵东国,顾文权,等.基于 Copula 函数的区域需水量随机模拟[J].农业工程学报,2012,28(18):107-112.
[22] Nelsen R B. An introduction to copula[M].Lecture Notes in Statistics. New York: Springer-Verlag,1999.
[23] Zhang L, Singh V P. Bivariate flood frequency analysis using the copula method[J].Journal of Hydrologic Engineering,2006,11(2):150-164.
[24] 侯芸芸.基于 Copula 函数的多变量洪水频率计算研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2010.
[25] 郭生练,刘章君,熊立华.设计洪水计算方法研究进展与评价[J].水利学报,2016,47(3):302-314.
[26] 王鹏新,冯明悦,孙辉涛,等.基于主成分分析和 Copula 函数的干旱影响评估研究[J].农业机械学报,2016,47(9):334-340.
[27] 王小军,张强.广东省灌溉水有效利用系数影响因素的动静态分析[J].水利水电科技进展,2015,35(2):6-11.
[28] 郭生练,闫宝伟,肖义,等.Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J].水文,2008,(3):1-7.
[29] Salvadori G. Michele C D. Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: A copula approach[J].Water Resources Research,2010,46(10):219-233.
[30] Hao Z C, Hao F H, Singh V P,et al. Quantitative risk assessment of the effects of drought on extreme temperature in eastern China[J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2017,122(17):9050-9059.
[31] Zhao Y, Zhang J P, Xiao W H. Study on the joint probability distribution of irrigation water volume and irrigation water efficiency[J].Water Science & Technology: Water Supply,2015,15(4):802-809.