

宁夏灌区春小麦形态结构及干物质分配对不同时期干旱胁迫的响应

王琛¹ 王连喜^{1*} 马国飞^{2,3} 张晓煜^{2,3} 李琪¹

(¹南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; ²中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002; ³宁夏气象科学研究所, 银川 750002)

摘要 于2018年,以宁夏主推春小麦品种“永春4号”为试验材料,设置了6种不同灌水处理来研究春小麦形态结构及干物质分配对不同时期干旱胁迫的响应过程及机制。结果表明:全发育期不灌水处理使发育期缩短达11 d;分蘖期及拔节期干旱会导致春小麦穗下茎节缩短、叶面积和株高显著下降、叶片提前变黄衰退;分蘖期缺水对叶面积影响最大,拔节期缺水对株高影响最大;干旱影响春小麦干物质的积累和分配,分蘖期干旱使叶片占干物质总量的比重下降,叶鞘占干物质总量的比重上升;与CK组相比,全发育期干旱处理的穗长、穗数、穗粒数和千粒重分别显著下降5.9%、43.4%、9.6%和7.6%;分蘖期轻微干旱显著降低小麦穗数,但显著提高小麦穗粒数和千粒重;开花-灌浆期干旱对小麦千粒重影响最大,与CK组相比千粒重下降17.4%。

关键词 春小麦; 生育时期; 干旱胁迫; 形态结构

Responses of morphological structure and dry matter allocation of spring wheat to drought stress at different developmental stages in the irrigation district of Ningxia. WANG Chen¹, WANG Lian-xi^{1*}, MA Guo-fei^{2,3}, ZHANG Xiao-yu^{2,3}, LI Qi¹ (¹*School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*; ²*Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750002, China*; ³*Ningxia Institute of Meteorological Science, Yinchuan 750002, China*).

Abstract: We examined the responses of morphological structure and dry matter distribution of spring wheat to drought stress in different developmental periods in 2018, with the mainly popularized variety of Yongchun No. 4 in Ningxia as the experimental material. There were six different irrigation treatments. The results showed that the treatment of no irrigation at all growth stages shortened the whole growth stage by 11 days. Drought in the tillering and jointing stages reduced lower stem segments of spring wheat spike, leaf area, and plant height, and advanced leaf yellowing. Water shortage at tillering stage had the strongest effect on leaf area, while water shortage at jointing stage had the most effect on plant height. Drought affected the accumulation and distribution of dry matter in spring wheat. When spring wheat was under drought stress at the tillering stage, the proportion of leaves in the total dry matter decreased by 6.6%, and the proportion of leaf sheath in the total dry matter increased by 9.0%. Compared with the control, when the spring wheat was under no irrigation at all growth stages, the spike length, spike number, spike grain number and thousand kernel weight were reduced by 5.9%, 43.4%, 9.6% and 7.6% respectively. Mild drought at tillering stage significantly decreased the wheat spike number, but increased the number of grains per spike and the thousand kernel weight by 9.2% and 4.7%. The drought during flowering to filling stage had the greatest effect on the thousand kernel weight, with a

decrease of 17.4%.

Key words: spring wheat; growth stage; drought stress; morphology.

春小麦是宁夏引黄灌区、内蒙古、甘肃等省区的主要栽培作物(党根友等,2013)。在全球气候变暖的背景下,中国北方气候暖干化明显,宁夏地区降水量较少且呈下降趋势,干旱的发生范围和频率呈上升趋势,对小麦产量和品质的影响加重,已成为春小麦安全生产的重要限制因素之一(邓振镛等,2010; Pradhan *et al.*, 2012; 李菲等,2013)。干旱对春小麦的影响是十分复杂的。干旱缺水会导致植株体内缺水,影响叶片和植株生长发育(袁蕊等,2016; 张雨新等,2017)。不同时期小麦对水分需求量也有所不同(肖晶晶等,2012)。研究表明,小麦干旱缺水会降低小麦和其叶片的生长速度,使其叶面积降低(Zivcak *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014)。而且干旱越严重,小麦叶面积、株高等指标受到的抑制作用越强(乐章燕等,2014; 高丽华等,2014)。而一些研究则发现,苗期适度水分胁迫会使叶片渗透调节能力提高,渗透势降低,之后水分恢复正常后,叶片状况得到改善,甚至由于作物的补偿效应,还有利于叶片的生长发育,提高水分利用效率(韩凯虹等,2015; Kazan *et al.*, 2016; 倪胜利等,2018)。叶面积的大小直接影响作物的光合作用,进而影响干物质的积累(于振文等,1995; Xu *et al.*, 2009)。干物质的积累分配会影响作物的产量构成,且不同品种,不同环境间差异明显(Li *et al.*, 2010)。

研究表明,不同时期及不同灌水量会对小麦穗粒数、千粒重等有不同的影响,出苗-返青期不灌水之后复水会使小麦穗数和穗粒数降低,但千粒重会显著升高(姚宁等,2015)。灌浆期受到水分胁迫则会使穗粒数与千粒重明显减小,籽粒产量会明显下降(刘培等,2010)。以上多数研究仅针对受旱小麦的形态指标进行了阶段性定量研究分析。本文选择干旱发生频繁、对灌溉水依赖度很高的宁夏引黄灌区,开展不同时期春小麦干旱胁迫处理试验及对小麦形态结构参数的持续观测,研究不同时期干旱及复水后对春小麦形态结构及干物质分配的影响,以期为春小麦节水栽培和优化灌溉提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验地选择在宁夏回族自治区永宁县望洪镇。

永宁县地处宁夏平原中部(35°12'N—35°49'N, 105°12'E—106°37'E),东临黄河,西倚贺兰山,属中温带大陆性气候,气候干燥,雨量少而集中,蒸发强烈,日照充足,昼夜温差大,无霜期较短。海拔1113.7 m,年平均气温 9.6 ℃,年极端最高气温 38.5 ℃,年极端最低气温-25.1 ℃,年降水量 177.2 mm,最大日降水量 59.0 mm,年日照时数 2892.7 h,年蒸发量1696.4 mm。供试地土壤类型为灌淤土,有机质含量8.8 g·kg⁻¹,全氮含量 0.8 g·kg⁻¹,全磷含量 0.7 g·kg⁻¹,全钾含量 17.8 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

小麦试验品种为“永春4号”,于2018年3月5日机械播种,行距 14 cm,播种密度为 400 万株·hm⁻²,前茬作物为玉米。采用传统灌溉模式灌溉(引水沟渠漫灌),施肥量、施肥方法、田间管理与大田常规方法一致。

由于宁夏当地灌溉用水不足,灌溉时间不确定性较强,基于此,本试验通过设置不同时期不灌水来模拟当地大田灌溉的局限性。本试验设 5 个干旱胁迫处理和 1 个对照处理。小麦全生育期灌溉 4 次,每次灌溉量为 900 m³·hm⁻²。时间设定为分蘖期(4月30日)、拔节期(5月8日)、开花-灌浆期(6月2日)和乳熟期(6月18日)4个时次。为使试验处理便于安排和记录,对各处理进行编号(表1),T0:4次灌水均不灌溉;T1:分蘖期不灌溉;T2:拔节期不灌溉;T3:开花-灌浆期不灌溉;T4:乳熟期不灌溉;CK:4次灌水均灌溉。小区设计采用随机排列方式,3次重复。小麦种子播种量 262.5 kg·hm⁻²,小区面积 7.7 m×7 m=53.9 m²。小区之间和小区四周与保护行之间埋压 1.2~1.4 m 深塑料膜防止侧渗,引水沟渠铺设防渗膜防止水分下渗。

表 1 小麦灌溉试验设计
Table 1 Experiment design of wheat irrigation

处理	灌水量(m ³ ·hm ⁻²)				
	分蘖期	拔节期	开花-灌浆期	乳熟期	总灌水量
T0	0	0	0	0	0
T1	0	900	900	900	2700
T2	900	0	900	900	2700
T3	900	900	0	900	2700
T4	900	900	900	0	2700
CK	900	900	900	900	3600

1.3 观测指标及方法

1.3.1 发育期观测 根据《农业气象观测规范》,观察和记载春小麦的播种期、出苗期、三叶期、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、乳熟期、成熟期。

1.3.2 土壤水分 采取土钻法取样,深度为 1 m,每隔 10 cm 取样一次,采用烘干称重法计算出土壤含水量,采用环刀法测田间持水量,土壤湿度=土壤含水量/田间持水量。分蘖期前 14 d 取土样 1 次,分蘖期后 5 d 左右取样 1 次相邻取样钻孔距离均大于 50 cm。

1.3.3 生长指标 每隔 5 d 左右,每个处理选取 15 株小麦,用直尺分别测定小麦叶长(从叶枕到叶尖的距离)和叶宽(叶面最宽处的距离),按照叶面积=叶长×叶宽×0.75 计算其面积;用直尺分别测定小麦株高(抽穗前,用直尺量从旗叶叶尖到茎基的距离,抽穗后,从穗顶端量到茎基的距离)。

1.3.4 叶片含水量及干物质积累量 根据《农业气象观测规范》,每处理各生育期选生长均匀一致叶片 10 片,从叶基部剪下,称量鲜重(初始鲜重),在 105 ℃ 下杀青 30 min 后,75 ℃ 下烘至恒重,称重并计算叶片含水量。叶片含水量=(初始鲜重-干重)/干重×100%。干物质积累量每处理各生育期选生长均匀一致植株 15 株,分茎、叶、鞘、穗等放入烘箱,105 ℃ 杀青,然后置于 75 ℃ 下烘至恒重,用电子天平称取干重。

1.3.5 产量构成因素 小麦成熟后,在小区内选取有代表性植株 30 株考种,考种项目包括穗长、穗粒重、穗数和千粒重。

1.4 数据分析

利用 Excel 2010 和 SPSS 统计分析数据和绘制图表,采用最小显著差数法(LSD)进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 小麦全生育期降水量及土壤湿度特征

土壤湿度受到降水量、灌溉补充量和田间蒸发量以及小麦的生理耗水等多方面的影响,是衡量小麦所受干旱程度的直接指标。土壤水分不足会抑制小麦生长发育、降低光合性能、影响物质运输、蛋白质合成等生理生化过程的顺利进行,继而导致产量下降。

根据永宁县气象局提供的降水量数据可以发现(表 2),2018 年度春小麦生长期间降水量和历年平均相比有很大下降,仅为历年平均的 51%,且 6 月灌

表 2 2018 年度春小麦全生育期降水量(mm)
Table 2 Precipitation during the whole growth period of spring wheat on 2018

月份	2018 年度生育期降水量	历年平均降水量
3	2.5	6.0
4	17.0	9.1
5	10.2	21.8
6	1.6	24.5
合计	31.3	61.4

浆期的降水仅为历年平均的 7%,如果此阶段不进行灌溉,对小麦的灌浆和产量具有很大的影响。

从图 1 可以发现,不同处理的土壤湿度具有不同的变化特征。根据国家标准《农业干旱等级》(GB/T 32136-2015),T0 处理全生育期不灌水,造成了分蘖期轻度干旱,拔节期及以后重度干旱的干旱过程。T1 处理分蘖期不灌水,使得 T1 处理分蘖期短暂轻度到中度干旱,抽穗期轻度干旱。T2 处理拔节期不灌水,使得 T2 处理拔节期开始土壤湿度不断下降,抽穗期轻度干旱,开花期短暂重度干旱。T3 处理开花-灌浆期不灌水,使 T3 处理抽穗期轻度干旱,灌浆期之后重度干旱。T4 处理乳熟期不灌水使得灌浆中后期短暂的重度干旱,CK 组除抽穗-开花期轻度干旱外,其余时期土壤湿度保持在正常水平。

2.2 不同时期干旱胁迫对春小麦发育期的影响

小麦生长发育主要受基因、植物体内碳、氮和激素等的控制,水分会影响细胞发育、激素分泌从而影响植物的生长生理过程,改变植物生长发育期。在干旱胁迫情况下,小麦生长首先受到抑制,绿色叶面积减小,光合产物减少,物质运输反应变慢,干旱也

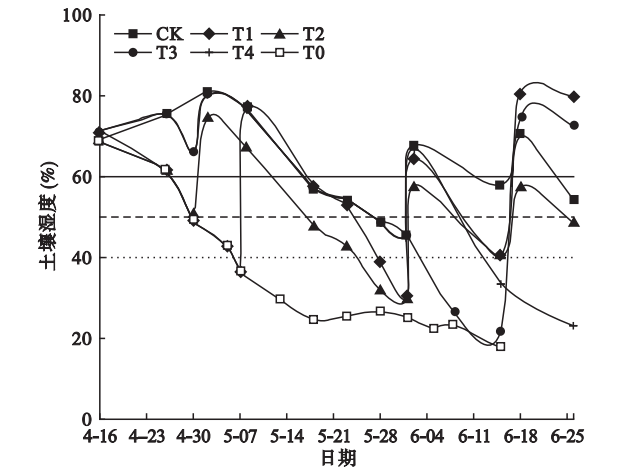


图 1 不同处理干旱过程中土壤湿度变化
Fig.1 Changes in soil moisture during different treatments of drought

会改变干物质在不同器官中的分配比例,对作物的生长发育进程有很大影响。特别在生殖生长时期,干旱能明显加速植株的衰老,加快作物的发育进程。

由表 3 可见,不同时期的干旱对小麦发育期有不同的影响,T0 处理发育期最短,与 CK 相比提前 11 d 成熟,孕穗期开始受干旱的影响使得发育期提前,乳熟期到成熟期受影响最大。T1、T2 处理主要从抽穗期开始发育期提前,而 T4 处理则因为乳熟期到成熟期未灌水,植株受到高温胁迫,加快了乳熟到成熟的生育进程,与 CK 相比,成熟期提前 1 d。

2.3 不同时期干旱胁迫对春小麦形态参数的影响
2.3.1 分蘖数 分蘖期是否灌水的小麦主茎及分蘖长势有明显的差异。T0 处理由于分蘖期干旱,土壤湿度下降到 50% 以下,主茎的高度、分蘖的高度以及分蘖成活数及分蘖率均低于 CK 组(表 4)。由此可知,当春小麦受到分蘖期干旱胁迫时,主茎数和分蘖数虽然不会减少,但因为干旱缺水,大部分分蘖均出现死亡或者退化的情况,CK 组分蘖成活率高达 100%,而 T0 处理分蘖成活率仅为 22%。

2.3.2 叶面积 叶面积能够反映作物的生长情况,

叶面积的大小决定了光合的有效面积,对植物的光合作用有很大的影响。从表 5 看出,各处理的叶面积变化均为先升高后下降,小麦生育前期叶面积增加较慢,后期叶面积减小快。分蘖期 T0、T1 处理的小麦与 CK 组小麦单株叶面积之间具有显著差异,T0 和 T1 处理小麦叶面积仅为 CK 组小麦叶面积的 72.8%和 75.0%。拔节期,T0、T2 处理叶面积和 CK 组叶面积间具有显著差异,T1 处理则由于复水与 CK 组叶面积没有显著性差异。抽穗期,前期干旱胁迫下的小麦(T0、T1、T2),叶面积已经开始出现慢慢变小的现象,分别仅为 CK 组叶面积的 69.7%、75.1%、69.1%,和 CK 组相比均呈现出显著性差异。灌浆期时,除了干旱引起的叶片变黄衰老外,小麦的正常发育周期和灌浆期的营养传输使得所有处理的叶面积均有不同程度的下降,CK 组与其他处理间均存在显著性差异。不同时期的干旱也对叶面积的最大值有不同的影响,T0 处理单株小麦叶面积最大值仅为 60.9 cm²,T1 处理单株小麦叶面积最大值为 71.3 cm²,T2 单株小麦叶面积最大值为 74.5 cm²,而 CK 处理单株小麦叶面积最大值达到 86.7 cm²。

表 3 不同时期干旱胁迫对春小麦发育期的影响
Table 3 Effects of drought stress on the development period of spring wheat in different periods

处理	播种	出苗	三叶	分蘖	拔节	孕穗	抽穗	开花	乳熟	成熟
CK	3-05	3-26	4-8	4-18	5-6	5-14	5-20	5-25	6-18	7-2
T1	3-05	3-26	4-8	4-18	5-6	5-13	5-17	5-24	6-16	7-1
T2	3-05	3-26	4-8	4-18	5-6	5-14	5-19	5-24	6-16	7-1
T3	3-05	3-26	4-8	4-18	5-6	5-14	5-20	5-25	6-17	7-1
T4	3-05	3-26	4-8	4-18	5-6	5-14	5-20	5-25	6-18	7-1
T0	3-05	3-26	4-8	4-18	5-6	5-11	5-16	5-23	6-12	6-21

表 4 干旱对春小麦分蘖数的影响
Table 4 Effects of drought on the number of spring wheat branches

处理	主茎数	主茎高 (cm)	分蘖高 (cm)	分蘖数	分蘖成 活数	分蘖死 亡数	分蘖消 亡数	分蘖率 (%)	分蘖成活率 (%)
CK	10.3	53.5	25.7	17	17	0	0	165	100
T0	16	43.2	21.2	22.5	5	10	7.5	140	22

表 5 不同干旱过程对春小麦单株叶面积的影响(cm²·株⁻¹)
Table 5 Effects of different drought processes on leaf area per plant of spring wheat

处理	分蘖期单株叶面积	拔节期单株叶面积	抽穗期单株叶面积	开花-灌浆期单株叶面积
CK	53.06±2.33 a	81.33±5.99 a	87.38±1.67 a	61.86±1.49 a
T1	39.82±2.23 b	71.33±3.23 ab	65.58±2.05 b	53.00±2.52 b
T2	—	62.22±3.94 b	60.38±2.47 b	44.57±2.20 c
T3	—			52.70±2.08 b
T4	—			
T0	38.65±2.45 b	58.00±4.85 b	60.88±2.52 b	26.89±1.49 d

同列数据后字母不同代表处理间差异显著(P<0.05)。下同。

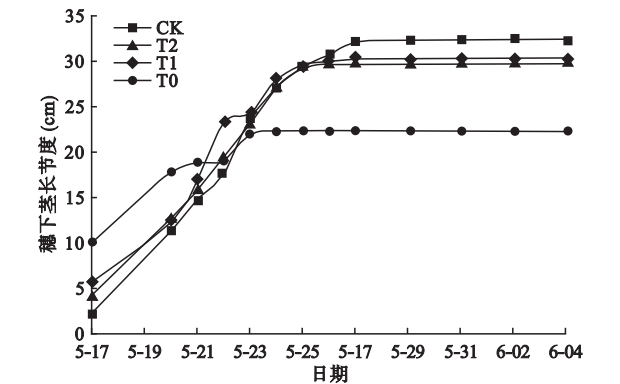


图2 不同干旱过程对穗下茎节长度的影响
Fig.2 Effects of different drought processes on the length of underarm stalk

2.3.3 穗下茎节 穗下茎节不仅能反映抽穗期小麦的生长发育情况,还对后续灌浆期的养分输送具有重要作用。从图2可以看出,T0处理小麦进入抽穗期较早,穗下茎节生长稳定较快,但由于水分亏缺,穗下茎节长度较短,于5月23日穗下茎节长度达到稳定。而CK组的小麦由于水分充足,穗下茎节生长速度较快,于5月28日达到稳定后和T0处理相比具有显著差异,T1、T2处理由于阶段性干旱,穗下茎节长度和CK组相比略有降低。

2.3.4 株高 各处理小麦株高在整个发育期内生长形势相似,分蘖期以前生长缓慢,灌浆期以后基本保持稳定(图3,表6)。分蘖期时,T0和T1处理土壤湿度低于正常水平,株高与对照组小麦株高具有显著性差异。到了拔节期,T0处理由于持续干旱土壤湿度下降到50%,株高生长缓慢为对照组株高的80.2%,与CK组有显著差异,T1处理由于分蘖期干旱时间较短,且拔节期复水,株高与对照组无显著性差异。T2处理此时干旱处理时间较短,土壤湿度仍保持60%以上,尚未与对照组出现显著性差异。抽穗期时,T0处理土壤湿度已下降到40%以下,株高与其他处理均呈现显著性差异,说明持续干旱对株高的影响很大,而T2处理由于持续的干旱土壤湿度下降到50%以下,与对照组呈现显著性差异,株高

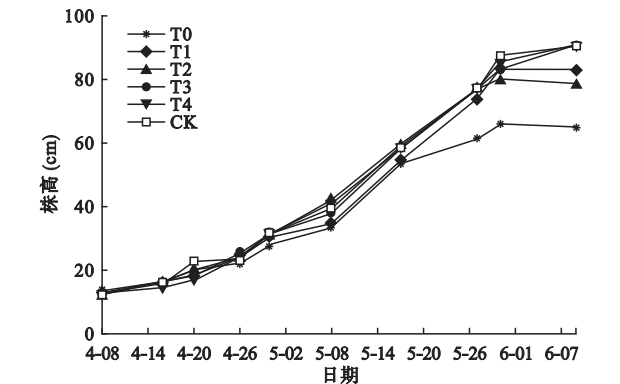


图3 不同干旱过程对春小麦株高的影响
Fig.3 Effects of different drought processes on plant height of spring wheat

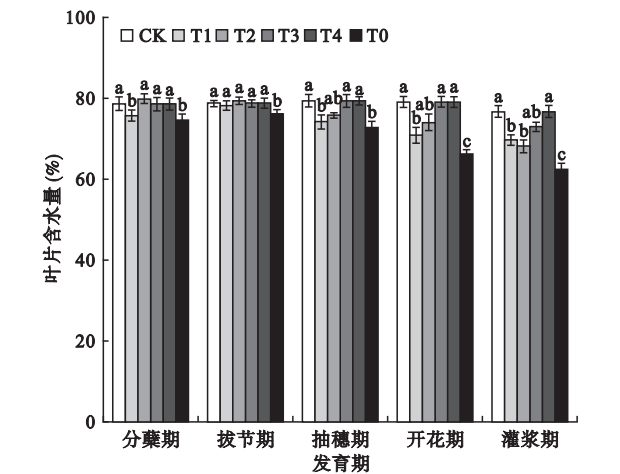


图4 不同干旱过程对春小麦叶片含水量的影响
Fig.4 Effects of different drought processes on water content of spring wheat leaves
图中字母不同代表处理间差异显著($P<0.05$)。

和CK组相比降低5.6%。灌浆期时,CK组的小麦株高与其他处理的株高均存在显著性差异,与CK组相比,T0、T1、T2和T3处理小麦株高下降了24.4%、4.5%、8.4%和4.8%。

2.4 不同时期干旱胁迫对春小麦结构参数的影响

2.4.1 叶片含水量 叶片相对含水量是机理研究中反映植株水分盈亏程度的最佳指标,它直接反映作物生长发育各个时期的实际水分状况。从图4可

表6 不同干旱过程对春小麦株高的影响(cm)
Table 6 Effects of different drought processes on plant height of spring wheat

处理	分蘖期株高	拔节期株高	抽穗期株高	开花-灌浆期株高
CK	37.26±1.37 a	51.49±1.15 a	72.62±1.21 a	87.32±1.46 a
T1	32.19±1.01 b	47.21±1.23 a	71.13±1.70 ab	83.37±0.82 b
T2	38.33±1.52 a	46.70±1.40 a	67.16±0.89 b	80.04±0.89 c
T3	—	—	—	83.14±0.95 b
T4	—	—	—	—
T0	30.43±0.71 b	41.32±1.52 b	58.36±1.95 b	66.03±1.32 d

表 7 不同干旱过程对春小麦干物质分配占比的影响
Table 7 Effects of different drought processes on the ratio of dry matter distribution of spring wheat

生育期	处理	叶 占总重 (%)	鞘 占总重 (%)	茎 占总重 (%)	穗 占总重 (%)	总重 (g)
分蘖期	CK	54.18	45.82	—	—	0.44
	T1	49.03	50.97	—	—	0.41
	T0	46.43	53.57	—	—	0.39
拔节期	CK	34.58	27.23	38.20	—	0.97
	T1	27.85	29.88	42.28	—	0.89
	T2	38.47	25.73	35.80	—	0.79
	T0	27.97	36.18	35.85	—	0.90
抽穗期	CK	18.55	16.16	41.32	23.96	1.76
	T1	14.73	15.70	44.23	25.34	2.26
	T2	15.92	16.30	42.04	25.74	1.59
	T0	16.23	18.43	36.47	28.88	1.82
开花期	CK	15.55	14.16	40.88	29.42	2.08
	T1	12.72	13.38	42.69	31.21	2.43
	T2	12.85	14.13	40.79	32.23	1.87
	T0	10.43	13.97	35.94	39.66	2.18
灌浆期	CK	9.47	10.85	36.75	42.94	2.68
	T1	7.52	9.94	34.07	48.46	3.35
	T2	9.79	12.10	35.84	42.28	2.69
	T3	10.76	10.22	38.30	40.71	2.41
	T0	3.73	6.96	25.30		2.60

见,除了 CK 组之外,其余各处理叶片含水量随着生育进程的推进都存在不同的下降趋势。灌浆期时 T1、T2 和 T0 处理和 CK 组叶片含水率相比分别下降 9.3%、11% 和 19.6%。干旱处理的小麦在午时还会出现叶片卷曲的情况,干旱程度越重,叶片卷曲范围越大。主要是午时高温植株叶片蒸腾量大,失水较多。为减少水分散失,植株叶片卷曲,是一种生理性保护现象。植株受到的干旱程度越重,干旱持续时间越长,叶片含水率越低。

2.4.2 干物质分配 土壤水分状况会显著影响小麦光合产物的运输和分配。不同处理对干物质积累有不同的影响(表 7)。分蘖到拔节期,叶片所占比重较高,拔节到开花期茎占比较高,灌浆期之后穗占比最高。当小麦分蘖期受到干旱胁迫时,叶片所占

比重下降 6.61%,叶鞘所占的比重升高 8.95%。抽穗期之前,干旱处理的小麦干物质重低于 CK 组,抽穗期后,由于干旱处理小麦提前抽穗,部分处理(T0 和 T1)小麦总重高于 CK 组,其中 T1 处理小麦总重升高幅度较大,说明小麦前期干旱后复水使土壤湿度恢复正常水平后对小麦干物质积累有促进作用。

2.4.3 产量构成因素 水分在小麦生长发育和器官建成中具有十分重要的作用。因而,干旱胁迫必然对小麦的主要农艺性状产生影响。从表 8 可以看出,除了 T1 处理,其余干旱处理均会使小麦的穗长降低,和 CK 组产生显著性差异。T1 处理会使穗粒数增多,T2 和 T0 处理则会使穗粒数减少,和 CK 组相比分别下降 4.9% 和 9.6%。T1、T2 和 T0 处理均会导致穗数减少,与 CK 组小麦穗数存在显著性差异,分别降低 20.8%、13.6% 和 43.4%。而开花期以后的干旱(T3 和 T4)的小麦穗数则与 CK 组小麦穗数无显著性差异。不同时期的干旱对千粒重也有不同的影响。T1 处理显著增加小麦千粒重,T0 和 T3 处理使千粒重显著降低,特别是 T3 处理,下降幅度最大为 17.4%,T2 和 T4 处理与 CK 组相比千粒重无显著性差异。

3 讨论

3.1 不同时期干旱胁迫对春小麦生育期的影响

研究发现,不同时期干旱对小麦形态结构及生育期有不同的影响。干旱主要影响抽穗、开花和灌浆期的长短。全生育期持续干旱对小麦生育期影响较大,和 CK 组相比生育期缩短 11 d,与李丽(2012)研究结论较为一致。李丽(2012)研究发现,随着水分胁迫的增强,冬小麦生育天数逐渐缩短。当小麦遭受干旱时,干旱对小麦生长发育影响首先是小麦叶片,土壤湿度下降导致叶片含水量下降,叶面积下降(王纪华等,2001),叶片发生卷曲,使得光合作用受到影响,干物质分配转运比例发生改变,株高变矮,茎节长度变短,最终影响到小麦产量及产量构成要素。

表 8 不同干旱过程对春小麦产量构成要素的影响
Table 8 Effects of different drought processes on yield components of spring wheat

处理	穗长 (cm)	穗粒数	穗数 (穗 · m ⁻¹)	千粒重 (g)
CK	10.39±0.14 a	35.03±1.17 ab	87.68±3.15 a	42.61±0.19 b
T1	10.39±0.12 a	38.27±1.80 a	70.33±1.20 b	44.63±0.27 a
T2	9.43±0.16 cd	33.27±1.31 b	76.67±3.48 b	41.07±0.23 c
T3	9.89±0.18 b	36.63±1.22 ab	79.33±2.73 ab	35.21±0.39 e
T4	9.10±0.16 d	34.90±1.51 ab	84.00±2.00 ab	42.14±0.19 b
T0	9.78±0.16 bc	31.67±1.20 b	49.67±2.67 c	37.50±0.15 d

3.2 不同时期干旱胁迫对春小麦形态参数的影响

分析不同时期干旱对春小麦形态参数影响发现,分蘖期干旱导致土壤湿度低于正常水平,虽然主茎数和分蘖数不会减少,但分蘖会因为缺水退化死亡。分蘖期和拔节期干旱会使穗下茎节显著下降,并导致叶面积和株高显著下降。灌浆期时叶片会提前变黄衰老,这与杨静敬等(2013)的研究较为一致。杨静敬等(2013)发现,苗期和拔节期水分亏缺会影响株高和叶面积的增长,抽穗期和灌浆期干旱会加速叶面积指数下降。主要原因是土壤湿度下降导致植株体内水分缺失,影响细胞分裂,从而导致株高和叶面积显著下降(成雪峰等,2005)。通过分析比较,与CK组相比,不同生育阶段干旱对叶面积影响大小为 $T_0 > T_1 > T_2 > T_3$,对株高影响大小为 $T_0 > T_2 > T_1 > T_3$,除了全生育期干旱外,分蘖期缺水对叶面积影响最大,拔节期缺水对株高影响最大。

3.3 不同时期干旱胁迫对春小麦结构参数的影响

研究发现,干旱会影响小麦干物质的积累和分配(谷艳芳等,2010;李彦彬等,2018),当小麦前期遭受干旱,土壤湿度低于正常水平时,叶片所占比重下降6.6%,叶鞘所占的比重升高9.0%。而分蘖期遭受轻度干旱时,小麦在复水后会出现补偿效应,弥补干旱期间减小的干物质积累(刘丽平等,2012; Borrell *et al.*, 2014)。可能原因是,作物在经历轻微干旱后复水,叶片净光合速率恢复能力强,短时间内甚至会超过正常植株(蔡福等,2017)。干物质的积累最终影响到产量构成因素,全生育期持续干旱下穗长、穗数、穗粒数和千粒重都会显著降低,分别降低5.9%、43.4%、9.6%和7.6%。分蘖期轻微干旱会显著降低小麦穗数,但显著提高小麦穗粒数和千粒重(张伟杨等,2016),与CK组相比分别增加9.2%和4.7%。张伟杨等(2016)通过盆栽冬小麦试验研究发现,轻度干旱显著增加小麦每穗粒数和千粒重,和本文结论相似。其原因可能是,一定程度的水分胁迫会显著提高小麦的物质转移效率和对籽粒的贡献率(张作为等,2016)。拔节期干旱显著降低小麦穗长和穗数,穗粒数和千粒重无明显影响,与田中伟等(2018)研究结论一致。

本研究分析了不同时期小麦形态结构参数以及生物量对不同时期干旱的响应变化,能准确把握小麦在不同时期遭受不同程度干旱时的形态特征,更好判断和掌握干旱发生、持续、缓解、解除等过程,对干旱的监测、预警、评估与预防、具有较好的指示意

义。本文仅对小麦形态结构指标进行了分析,今后需要加强从春小麦受干旱胁迫后的生理生化响应过程揭示春小麦对不同时期干旱胁迫的响应机制的研究。

4 结 论

干旱胁迫会影响小麦生长发育,导致分蘖死亡、穗下茎节长度降低、叶面积和株高下降。干旱还影响春小麦干物质的积累和分配,当分蘖期及拔节期遭受干旱时,叶鞘干重叶片占干物质总量的比重下降,叶鞘占干物质总量的比重上升。全生育期持续干旱会导致各产量构成因素均显著下降。

参考文献

- 蔡福,米娜,季瑞鹏,等. 2017. 关键生育阶段持续干旱对东北春玉米光合特性的影响. 生态学杂志, **36**(6): 1578-1589.
- 成雪峰,柴守玺. 2005. 水分供应对春小麦农艺性状和生理指标的影响. 甘肃农业大学学报, **40**(6): 750-756.
- 党根友,魏亦勤,李红霞,等. 2013. 灌水对不同春小麦品种产量形成及水分利用效率的影响. 麦类作物学报, **33**(3): 530-538.
- 邓振镛,王强,张强,等. 2010. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施. 生态学报, **30**(22): 6278-6288.
- 高丽华,孙书洪. 2014. 不同时期水分胁迫对冬小麦产量及形态指标的影响研究. 节水灌溉, (7): 1-3.
- 谷艳芳,丁圣彦,高志英,等. 2012. 干旱和复水对冬小麦光合产物分配格局的影响. 中国工程科学, **14**(3): 59-64.
- 韩凯虹,张继宗,王伟婧,等. 2015. 水分胁迫及复水对华北旱区甜菜生长及品质的影响. 灌溉排水学报, **34**(4): 61-66.
- 乐章燕,廖荣伟,刘晶森,等. 2014. 水分胁迫对华北平原冬小麦地上部分及产量的影响. 气象与环境学报, **30**(6): 120-124.
- 李菲,张明军,李小飞,等. 2013. 1962—2011年来宁夏不同等级降水的变化特征. 生态学杂志, **32**(8): 2154-2162.
- 李丽. 2012. 土壤水分对冬小麦生理生态特征影响的试验研究(硕士学位论文). 南京:南京信息工程大学.
- 李彦彬,朱亚南,李道西,等. 2018. 阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响. 灌溉排水学报, **37**(8): 76-82.
- 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等. 2012. 阶段性干旱及复水对小麦光合特性和产量的影响. 生态学杂志, **31**(11): 2797-2803.
- 刘培,蔡焕杰,王健. 2010. 土壤水分胁迫对冬小麦生长发育、物质分配及产量构成的影响. 农业现代化研究, **31**(3): 331-333.
- 倪胜利,李兴茂,王亚翠,等. 2018. 旱后复水对冬小麦生长

- 发育及水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, **37**(11): 22–27.
- 田中伟, 王妮妮, 李怡香, 等. 2018. 分蘖期和拔节期干旱对小麦主茎和分蘖穗粒形成的影响. 麦类作物学报, **38**(6): 734–741.
- 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 2001. 土壤水分对小麦叶片含水量及生理功能的影响. 麦类作物学报, **21**(4): 42–47.
- 肖晶晶, 霍治国, 金志凤, 等. 2012. 冬小麦节水灌溉气象等级指标. 生态学杂志, **31**(10): 2521–2528.
- 姚宁, 宋利兵, 刘健, 等. 2015. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响. 中国农业科学, **48**(12): 2379–2389.
- 杨静敬, 路振广, 张玉顺, 等. 2013. 水分亏缺对冬小麦生长发育及产量影响的试验研究. 灌溉排水学报, **32**(1): 116–120.
- 于振文, 岳寿松, 沈成国, 等. 1995. 高产低定额灌溉对冬小麦旗叶衰老的影响. 作物学报, **21**(4): 503–508.
- 袁蕊, 李萍, 胡晓雪, 等. 2016. 干旱胁迫对小麦生理特性及产量的影响. 山西农业科学, **44**(10): 1446–1449.
- 张伟杨, 钱希旸, 李银银, 等. 2016. 土壤干旱对小麦生理性状和产量的影响. 麦类作物学报, **36**(4): 491–500.
- 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 2017. 生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响. 干旱地区农业研究, **35**(1): 171–177.
- 张作为, 史海滨, 李仙岳, 等. 2016. 限量灌溉对河套灌区间作小麦干物质转移与灌浆特征的影响. 生态学杂志, **35**(2): 415–422.
- Borrell AK, Oosterom EJV, Mullet JE, *et al.* 2014. Stay-green alleles individually enhance grain yield in sorghum under drought by modifying canopy development and water uptake patterns. *New Phytologist*, **203**: 817–830.
- Kazan K, Lyons R. 2016. The link between flowering time and stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, **67**: 47–60.
- Li H, Jiang D, Wollenweber B, *et al.* 2010. Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, **33**: 267–275.
- Pradhan GP, Prasad PVV, Fritz AK, *et al.* 2012. Effects of drought and high temperature stress on synthetic hexaploid wheat. *Functional Plant Biology*, **39**: 190–198.
- Wang X, Cai J, Liu FL, *et al.* 2014. Multiple heat priming enhances thermo-tolerance to a later high temperature stress via improving subcellular antioxidant activities in wheat seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, **74**: 185–192.
- Xu Z, Zhou G, Shimizu H. 2009. Are plant growth and photosynthesis limited by pre-drought following rewatering in grass. *Journal of Experimental Botany*, **60**: 3737–3749.
- Zivcak M, Brestic M, Balatova Z, *et al.* 2013. Photosynthetic electron transport and specific photoprotective responses in wheat leaves under drought stress. *Photosynthesis Research*, **117**: 529–546.

作者简介 王琛,男,1995年生,硕士研究生,主要研究方向为农业气象学。E-mail: wchenmail@163.com

责任编辑 李凤芹
