

张健,张明,侯云鹏,等. 干旱胁迫对甘肃中部春小麦生理性状及灌水利用效率的影响[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 139-145, [ZHANG Jian, ZHANG Ming, HOU Yunpeng, et al. Effects of Drought Stress on Physiological Characteristics and Irrigation Water Use Efficiency of Spring Wheat in Central Gansu[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(1): 139-145], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0139

干旱胁迫对甘肃中部春小麦生理性状 及灌水利用效率的影响

张健¹, 张明¹, 侯云鹏¹, 王会蓉¹, 赵福年²

(1. 甘肃省定西市农业科学研究院, 甘肃 定西 743000;

2. 中国气象局定西干旱气象与生态环境野外试验基地, 甘肃 定西 743000)

摘要:为研究干旱胁迫对春小麦生长发育阶段生理性状和灌水利用效率的影响,以高产优质抗旱春小麦新品种‘定丰18号’和‘定丰19号’为材料,对其分蘖期到成熟期进行正常供水(WW)、轻度土壤干旱(MD)和重度土壤干旱(SD)3种不同水分处理,研究3种处理对小麦叶片水势、光合速率、籽粒灌浆速率、产量构成因素以及灌水利用效率的影响。结果表明,与WW处理比较,MD和SD处理显著降低了叶片水势($p < 0.05$),MD处理通过夜间恢复其叶片水势可达到正常水平,SD处理不能恢复;SD处理显著抑制了叶片光合作用,MD处理与WW处理无显著差异($p > 0.05$);与WW处理相比,MD处理籽粒灌浆速率、粒重、穗粒数、千粒重和产量显著增加,而SD处理则显著降低($p < 0.05$),不同处理间容重无显著差异($p > 0.05$)。两个不同小麦品种的两年试验结果基本一致,适度的水分亏缺有利于小麦增产,从而可提高其灌水利用效率。

关键词:春小麦;干旱胁迫;生理性状;产量构成因素;灌水利用效率

文章编号:1006-7639(2019)01-0139-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0139

中图分类号:P49

文献标志码:A

引言

随着全球气候变暖趋势的加剧,甘肃省极端高温天气明显增多,特别是在农业基础薄弱、生态环境脆弱、水资源匮乏的干旱半干旱区,气温升高、降水量减少,导致干旱灾害频繁发生、作物受旱面积扩大、产量下降严重,尤其对粮食作物的影响更为突出^[1-6]。小麦在生长发育阶段容易遭受各种非生物胁迫因素的影响,其中干旱胁迫是限制小麦丰产稳产的最主要因素之一^[7-9]。小麦对干旱胁迫的生理生化响应主要反映在分子水平、细胞水平和生理水平上,同时还因干旱程度和生育期的不同而不同。

干旱胁迫能够降低叶片相对含水量,引起保卫细胞渗透失水,致使保卫细胞气孔减小或者关闭,进而阻碍CO₂气体的进入,导致光合速率的降低,呼吸速率的增加;同时干旱胁迫能够抑制植物根系对

水分的吸收和向上运输,随着干旱胁迫程度的增加和时间的持续,导致叶片水势降低,叶片萎蔫甚至枯黄,分生组织细胞分裂和伸长减缓,植株茎节间变短,光合叶面积减少,干物质到根的分配量增加,根冠比增大,植株个体矮小,最终导致产量的减少^[10-12]。特别是在拔节期和灌浆期,干旱胁迫导致植株矮小、灌浆速率下降、籽粒重量减少、提前成熟,致使产量和收获指数降低^[13-14]。因此,研究干旱胁迫对春小麦生长发育阶段生理性状和产量构成因素的不利影响至关重要。

干旱胁迫已经成为限制全球作物生产的最主要因素之一,干旱胁迫导致的作物减产已经超过其他因素造成的减产总和,特别是在半干旱、干旱地区尤为明显^[15]。干旱胁迫对春小麦生长发育阶段以及产量形成的影响较为复杂,因作物品种、基因型类

收稿日期:2018-05-22; **改回日期:**2018-12-10

基金项目:干旱气象科学研究基金“不同干旱胁迫条件对半干旱区春小麦营养生长阶段影响的研究”(IAM201602)和甘肃省重大科技专项(17ZD2NA016-7)共同资助

作者简介:张健(1978—),男,甘肃定西人,副研究员,主要从事小麦新品种选育及示范推广工作. E-mail: zj0932@126.com。

通信作者:张明(1968—),男,甘肃定西人,研究员,主要从事小麦新品种选育及示范推广工作. E-mail: 1351904022@qq.com。

型、胁迫程度不同而存在差异。前人主要研究干旱胁迫对春小麦拔节期和灌浆期叶片水势、光合速率、灌浆速率和产量的影响,对多个生育期连续性干旱胁迫研究报道较少。因此,本研究对位于干旱半干旱区的定西春小麦进行不同生育期连续干旱胁迫试验,探索干旱胁迫对春小麦生理性状、产量构成因素和灌水利用效率的影响,以期对春小麦抗旱育种和高效栽培管理技术提供理论依据。

1 试验与方法

1.1 试验设计及材料

试验于2016—2017年3—8月在中国气象局定西干旱气象与生态环境野外试验基地(35°32'N, 104°37'E,海拔1920 m)的现代日光智能温室进行,该地年平均气温6.7℃,年平均日照2500.1 h,年降水量400 mm,无霜期146 d,土壤类型为黄绵土,呈微碱性。试验地地势平整、肥力均匀,前茬作物为马铃薯。耕层土壤有机质含量13.6 g·kg⁻¹,速效氮含量25.86 mg·kg⁻¹,速效磷含量19.57 mg·kg⁻¹,速效钾含量156.37 mg·kg⁻¹。试验采用随机区组设计,3次重复,小区面积15 m²,每个小区种植15行,行长5 m,行距20 cm,种植密度525万粒·hm⁻²,人工手锄开沟播种。播种前一次性施足基肥N(300 kg·hm⁻²)、P₂O₅(375 kg·hm⁻²)、K₂O(225 kg·hm⁻²)。2016—2017年3月16日统一浇灌底墒水(900 m³·hm⁻²),3月20—21日播种,7月26日收获。全生育期内除不同处理需要定额喷灌外,其他田间管理措施相同,人工除草和喷药防治蚜虫,严格控制病虫草害。

试验供试品种为春小麦新品种定丰18号和定丰19号,由定西市农业科学研究院粮食作物研究室提供。这两个品种均为生产实践上大面积推广的丰产、稳产、优质和抗逆性强的抗旱新品种,具有典型的代表性。

本试验从春小麦分蘖期到成熟期,共设置3个水分处理,分别为正常供水(well watered, WW)、轻度土壤干旱(moderate soil drought, MD)和重度土壤干旱(severe soil drought, SD)。每个处理的土壤水势分别为-30~-20 kPa、-50~-40 kPa和-70~-60 kPa,其土壤含水量分别相当于0~20 cm土层田间持水量的75%~80%、60%~65%和45%~50%。不同处理的每个小区设置1.0 m水泥隔离带,防止水分侧漏渗透。试验中土壤干旱的划分标准主要依据预备试验中土壤干旱对小麦产量是否有显著影响。每个小区安装真空表式负压计(中国农科院南京土壤研究所生产,PC-09型一体

化压电式水势变送器)监测土壤水势,负压计陶土头埋设在离土表层15~20 cm处。每天06:00—07:00(北京时,下同)、12:00—13:00、17:00—18:00记录负压计读数,当读数达到设计阈值时,不同处理WW、MD和SD分别浇水120、90和60 L。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 群体动态及产量结构调查

在春小麦出苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期调查田间出苗率、分蘖数、叶龄、总茎数、株高;试验收获前调查穗长、小穗数、穗粒数、不孕小穗数、最多小穗粒数、有效穗;成熟期不同处理小区全区收获,自然晾晒至籽粒含水量为12.5%左右时,称重并计算产量,室内考种测定容重和千粒重。

1.2.2 叶片生理特性的测定

在春小麦分蘖期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期分别测定不同处理小区最上部展开叶片的水势和光合速率。在晴天06:00和11:00,采用压力室法(模型3000, Soil Moisture Equipment Corp, Santa Barbara, CA, USA)测定最上部展开叶片的水势,每个处理重复3次。在晴天09:00采用便携式光合测定仪(LI-6400, LI-COR公司, USA)测定最上部展开叶片的光合速率,每个处理重复3次,测定时大气CO₂浓度比例为360~390 μmol·mol⁻¹。

1.2.3 籽粒灌浆速率的测定

在开花期每个不同处理小区选择长势一致、同一天开花散粉的小麦穗子100个挂牌,标记开花日期。自开花后至成熟期,在每个不同处理小区,每隔5 d取已挂牌穗子10个,烘干后测定籽粒重量,按照Richards方程计算灌浆速率^[16]。公式如下:

$$W = A / (1 + Be^{-kt})^{1/N} \quad (1)$$

式中:W(mg)为籽粒重量;A(mg)为最终粒重,t(d)为开花后的时间,B、k和N为回归方程所确定的参数。

对方程(1)求导,得灌浆速率:

$$F = AkBe^{-kt} / N(1 + Be^{-kt})^{(N+1)/N}$$

定义活跃灌浆期为W由最终粒重A的5%(t₁)增加到95%(t₂)所经历的时间(t₂-t₁),这段时间内麦粒增加的重量除以灌浆活跃期(t₂-t₁)为平均籽粒灌浆速率F_{mean}。

1.2.4 灌水利用效率的测定

在小麦收获后计算不同处理的平均产量和生育期总灌水量,并进一步计算小麦的灌水利用效率,灌水利用效率=籽粒产量/灌水量。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对春小麦叶片水势的影响

图1为2016、2017年不同干旱处理定丰18号、定丰19号春小麦叶片水势变化。可以看出,2016、2017年定丰18号自分蘖期至成熟期,06:00叶片水势下降变化趋势较小,WW和MD处理之间无显著差异($p > 0.05$),叶片水势的变化趋势基本一致;与WW处理相比,SD处理的叶片水势下降明显,差异显著($p < 0.05$)。11:00叶片水势下降趋势明显,与WW处理比较,MD和SD处理的叶片水势均呈下降趋势,差异显著($p < 0.05$);但是MD处理下降幅度小于SD处理,SD处理尤其从灌浆期开始,下降幅度达到最大。从上述分析结果可知,与WW处理相比,MD和SD处理均显著降低定丰18号中午时段的叶片水势,而MD处理通过夜间恢复,叶片水势可以达到正常水平,SD处理则不能恢复。自分蘖期至成熟期,06:00和11:00定丰19号不同处理叶片水势的下降变化趋势与定丰18号一致,不同处理条件下两个品种间无显著差异($p > 0.05$)。

可见,与WW处理比较,MD和SD处理显著降低定丰18号和定丰19号的叶片水势,MD处理通过夜间能够恢复到正常水平,SD处理则不能恢复。

2.2 干旱胁迫对春小麦叶片光合速率的影响

图2为2016、2017年不同干旱处理下定丰18号、19号春小麦叶片光合速率。可以看出,2016、2017年在WW、MD和SD处理下,定丰18号叶片光合速率自分蘖期开始逐渐增大,到开花期时,光合速率均达到最大值,开花期后逐渐降低,直至成熟期时,光合速率均达到最小值。在分蘖期以后的各个生育期,WW和MD处理的光合速率无显著差异($p > 0.05$),而SD处理与WW处理差异显著($p < 0.05$)。说明MD处理对定丰18号叶片光合作用无影响,而SD处理则显著抑制叶片光合作用。在WW、MD和SD处理下,2016、2017年自分蘖期至成熟期,定丰19号叶片光合速率变化趋势与定丰18号是一致的。不同处理条件下两个品种间叶片光合速率没有达到显著差异($p > 0.05$)。

因此,与WW处理比较,MD处理对定丰18号和定丰19号叶片光合作用无显著影响,SD处理则显著抑制叶片光合作用。

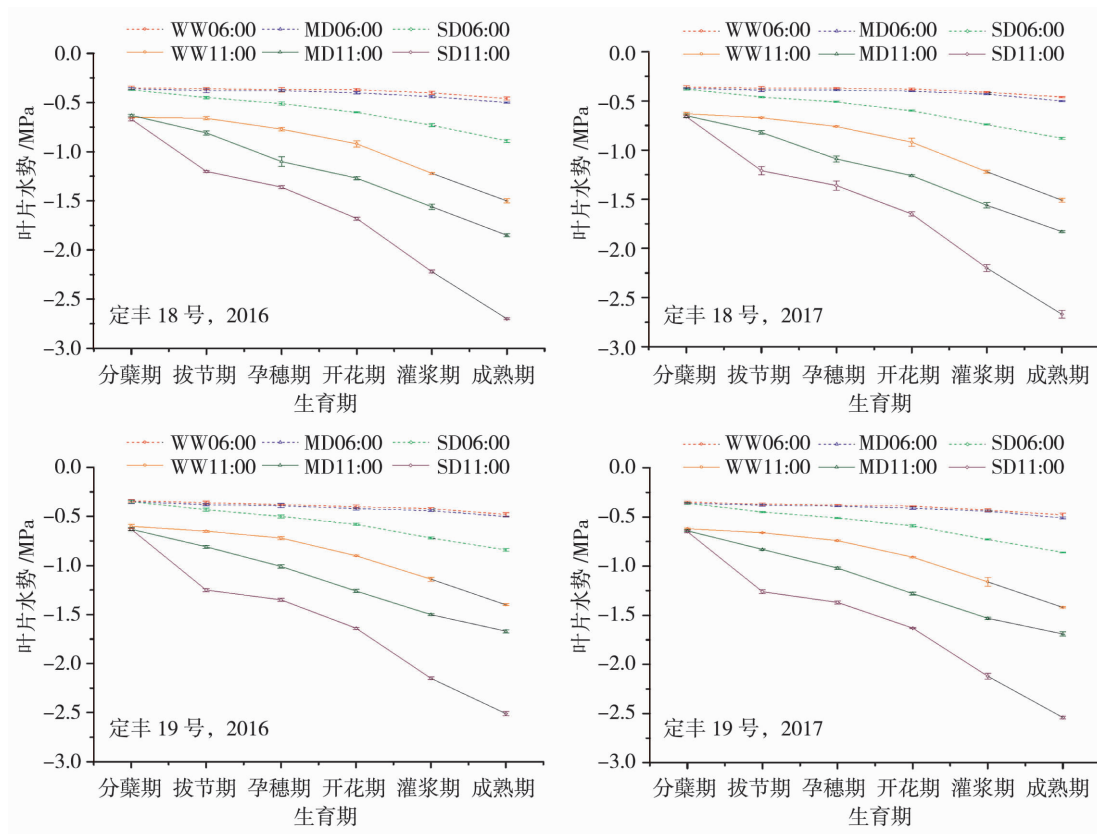


图1 2016、2017年不同干旱处理下定丰18号、定丰19号春小麦叶片水势
 Fig.1 The leaf water potential of spring wheat cultivars named Dingfeng 18, Dingfeng 19 under different drought treatments in 2016 and 2017

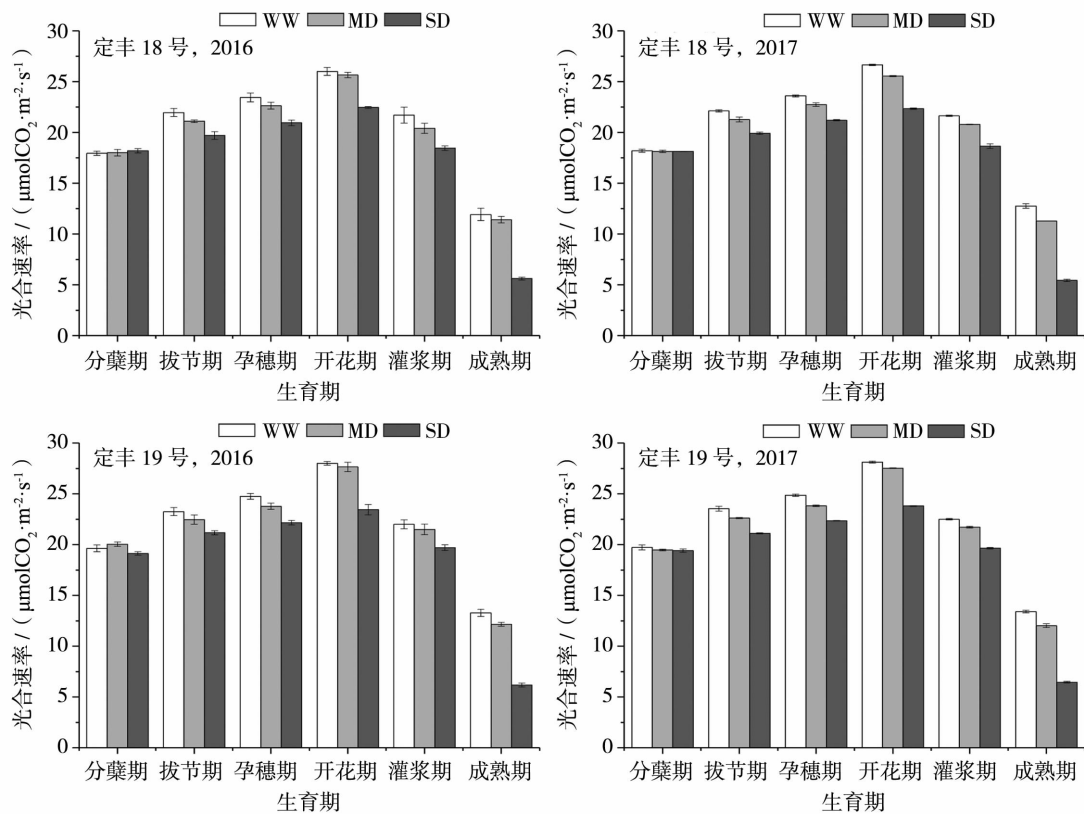


图2 2016、2017年不同干旱处理下定丰18号、定丰19号春小麦叶片光合速率

Fig. 2 The leaf photosynthetic rate of spring wheat cultivars named Dingfeng 18 and Dingfeng 19 under different drought treatments in 2016 and 2017

2.3 干旱胁迫对小麦籽粒灌浆速率的影响

表1列出2016、2017年不同干旱处理下定丰18号、19号春小麦籽粒灌浆速率。可以看出,在2016年,与WW处理比较,在MD和SD处理时,定丰18号和定丰19号的平均灌浆速率、最大灌浆速率、粒重均达到显著差异($p < 0.05$),SD处理差异更明显。可见同一品种不同处理间达到显著差异($p < 0.05$),而品种之间差异不显著($p > 0.05$)。2017年试验结果与2016年基本一致。MD处理有利于加快定丰18号和定丰19号籽粒灌浆进程,从而导致小麦平均灌浆速率和最大灌浆速率的增大,进而致使粒重增大,而SD处理则相反。说明小麦遭受轻度的土壤干旱,能够增加籽粒粒重,进而提高产量。

2.4 干旱胁迫对小麦产量性状的影响

表2列出2016、2017年3种干旱处理下两种春小麦产量性状。由表2可知,在2016年,与WW处理比较,在MD和SD处理时,定丰18号和定丰19号的小穗数、穗长均达到显著差异($p < 0.05$),SD处理较MD处理下降更明显;穗粒数和千粒重也达到显著差异($p < 0.05$),MD处理较WW处理显著

增加,SD处理较WW处理显著下降。可见同一品种不同处理间均达到显著差异($p < 0.05$),而品种之间差异不显著($p > 0.05$)。容重各处理基本保持一致,不同处理之间无显著差异($p > 0.05$),但品种之间差异显著($p < 0.05$)。2017年试验结果与2016年基本一致。说明轻度土壤干旱能够增加穗粒数和千粒重,降低小穗数和穗长,而重度土壤干旱则使这些指标均降低。说明轻度土壤干旱条件下增加的穗粒数和千粒重能够使小麦产量提高。

2.5 干旱胁迫对小麦灌水利用效率的影响

表3列出3种干旱处理下不同品种春小麦灌水量、产量和灌水利用效率,在2016年,与WW处理比较,在MD和SD处理时,定丰18号和定丰19号的产量和灌水利用效率均达到显著差异($p < 0.05$);MD处理的产量和灌水利用效率较WW处理显著增加,SD处理的产量较WW处理显著下降,灌水利用效率却显著提高;可见,不同处理间产量和灌水利用效率均差异显著($p < 0.05$)。2017年试验结果与2016年基本一致。与WW处理相比,2016、2017年MD处理下定丰18号的产量分别增加9.65%和7.41%,灌水利用效率分别提高45.83%和43.09%;

表 1 2016、2017 年不同干旱处理下定丰 18 号、定丰 19 号春小麦籽粒灌浆速率

Tab.1 The grain - filling rates of spring wheat cultivars named Dingfeng 18 and Dingfeng 19 under different drought treatments in 2016, 2017

品种	处理	平均灌浆速率/(mg · d ⁻¹)		最大灌浆速率/(mg · d ⁻¹)		粒重/mg	
		2016 年	2017 年	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年
定丰 18 号	WW	1.76 ± 0.0208	1.78 ± 0.0153	2.79 ± 0.0252	2.81 ± 0.0153	43.52 ± 0.1400	43.86 ± 0.3984
	MD	1.85 ± 0.0153	1.86 ± 0.0058	2.85 ± 0.0252	2.88 ± 0.0058	46.09 ± 0.1970	46.34 ± 0.4501
	SD	1.63 ± 0.0116	1.65 ± 0.0058	2.65 ± 0.0252	2.67 ± 0.0200	39.46 ± 0.2194	39.45 ± 0.2656
定丰 19 号	WW	1.79 ± 0.0116	1.83 ± 0.0116	2.91 ± 0.0451	2.95 ± 0.0153	44.47 ± 0.1850	44.75 ± 0.3904
	MD	1.86 ± 0.0153	1.89 ± 0.0153	3.02 ± 0.0400	3.06 ± 0.0436	47.11 ± 0.3659	47.26 ± 0.7314
	SD	1.66 ± 0.0252	1.68 ± 0.0306	2.73 ± 0.0153	2.76 ± 0.0153	40.05 ± 0.1801	40.50 ± 0.5397

表 2 2016、2017 年 3 种干旱处理下定丰 18 号、定丰 19 号春小麦产量性状

Tab.2 The yield components of spring wheat cultivars named Dingfeng 18 and Dingfeng 19 under three drought treatments in 2016, 2017

年 份	品种	处理	小穗数/个	穗粒数/粒	穗长/cm	千粒重/g	容重/(g · L ⁻¹)
2016 年	定丰 18 号	WW	15.51 ± 0.1114	51.21 ± 0.1343	9.52 ± 0.1274	43.22 ± 0.1601	817.86 ± 1.3672
		MD	14.47 ± 0.1856	52.73 ± 0.2969	8.18 ± 0.1060	45.60 ± 0.2031	814.77 ± 0.9771
		SD	12.74 ± 0.2558	47.12 ± 0.1007	7.49 ± 0.1179	39.95 ± 0.1124	813.32 ± 1.3339
	定丰 19 号	WW	16.06 ± 0.0902	51.33 ± 0.1947	9.65 ± 0.1250	44.36 ± 0.0907	785.46 ± 1.8031
		MD	14.97 ± 0.1308	53.20 ± 0.2079	8.15 ± 0.0651	46.70 ± 0.1114	784.98 ± 1.1515
		SD	13.35 ± 0.0833	47.09 ± 0.1375	7.59 ± 0.1168	40.40 ± 0.1947	783.02 ± 1.8878
2017 年	定丰 18 号	WW	15.85 ± 0.1779	51.43 ± 0.0819	9.65 ± 0.1300	43.37 ± 0.1721	819.47 ± 2.559
		MD	14.72 ± 0.1877	52.86 ± 0.1767	8.26 ± 0.0907	45.68 ± 0.3821	815.85 ± 4.090
		SD	12.86 ± 0.1474	47.28 ± 0.1570	7.63 ± 0.1609	40.13 ± 0.0971	814.28 ± 2.888
	定丰 19 号	WW	16.25 ± 0.0929	51.69 ± 0.1652	9.87 ± 0.2108	44.52 ± 0.1552	786.36 ± 2.592
		MD	15.14 ± 0.1320	53.54 ± 0.1137	8.35 ± 0.0874	46.85 ± 0.0874	785.62 ± 1.237
		SD	13.45 ± 0.0929	47.34 ± 0.1150	7.78 ± 0.0851	40.76 ± 0.0964	783.97 ± 3.503

表 3 2016、2017 年 3 种干旱处理下定丰 18 号、定丰 19 号春小麦灌水量、产量和灌水利用效率

Tab.3 The irrigation amount, yield and irrigation water use efficiency of spring wheat cultivars named Dingfeng 18 and Dingfeng 19 under three drought treatments in 2016, 2017

品种	处理	灌水量/L	产量/g		灌水利用效率/(g · kg ⁻¹)	
			2016 年	2017 年	2016 年	2017 年
定丰 18 号	WW	7200	8626.63 ± 146.42	8852.82 ± 107.22	1.20 ± 0.0208	1.23 ± 0.0153
	MD	5400	9459.18 ± 73.99	9508.76 ± 63.83	1.75 ± 0.0100	1.76 ± 0.0100
	SD	3600	5207.84 ± 46.19	5260.50 ± 51.20	1.45 ± 0.0153	1.46 ± 0.0153
定丰 19 号	WW	7200	8770.18 ± 79.26	8898.28 ± 58.91	1.22 ± 0.0100	1.24 ± 0.0058
	MD	5400	9511.39 ± 160.31	9625.68 ± 61.78	1.76 ± 0.0265	1.78 ± 0.0100
	SD	3600	5214.34 ± 132.12	5295.86 ± 39.52	1.45 ± 0.0361	1.47 ± 0.0100

定丰 19 号产量分别增加 8.45% 和 8.17%, 灌水利用效率分别提高 44.26% 和 43.55%。SD 处理下定丰 18 号的产量分别降低 39.63% 和 40.58%, 灌水利用效率分别提高 20.83% 和 18.70%; 定丰 19 号产量分别降低 40.54% 和 40.48%, 灌水利用效率分别提高 18.85% 和 18.55%。说明轻度土壤干旱均有利于小麦产量和灌水利用效率提高, 而重度土壤干旱虽然显著降低了产量, 却提高了灌水利用效率。

3 结论和讨论

以春小麦新品种定丰 18 号、定丰 19 号为试验材料, 从分蘖期到成熟期进行 3 种不同干旱胁迫处理, 通过研究干旱胁迫对春小麦叶片水势、光合速率、籽粒灌浆速率、产量构成因素以及灌水利用效率的影响, 认为 MD 缩短籽粒灌浆进程, 增大籽粒灌浆速率, 增加粒重、穗粒数、千粒重和产量, 提高灌水利用效率; SD 虽然能够显著提高灌水利用效率, 但是显著降低籽粒灌浆速率、粒重、穗粒数和千粒重, 导致小麦产量严重减产。

MD 和 SD 均显著降低 11:00 的叶片水势, 然而 MD 能够通过夜间恢复, SD 则不能; SD 显著降低各生育期的叶片光合速率, MD 则与正常供水无显著差异。因此, 在 MD 处理下, 叶片水势在 06:00 恢复到正常水平, 以确保光合作用的正常进行, 而 SD 时叶片水势在 06:00 不能恢复, 进而抑制了光合作用, 导致光合速率的显著降低。这与张伟杨等^[17]以高产小麦品种扬麦 16 和宁麦 13 为材料进行试验得到的结果一致。

灌浆期是小麦籽粒产量形成的关键时期, 也是对水分需求非常敏感的时期, 其灌浆时间和灌浆速率决定了最终粒重和产量。干旱胁迫对小麦籽粒灌浆有显著影响, 众多学者认为干旱胁迫能够显著降低小麦、玉米、水稻的灌浆速率, 然而也有部分学者认为适度或中度的干旱胁迫能够显著加快光合产物向籽粒的输出转运, 从而提高籽粒灌浆速率和粒重^[18-21]。本研究结果表明, 与 WW 处理相比, MD 处理显著增加了定丰 18 号、定丰 19 号籽粒的灌浆速率和最终粒重, 从而增加产量。张伟杨等^[22]认为 MD 显著增加了弱势籽粒的灌浆速率和粒重, 强势籽粒则无显著差异。通过测定籽粒多胺含量, 结果表明 MD 能够增加小麦籽粒中亚精胺 (Spd)、精胺 (Spm) 含量以及亚精胺与腐胺比值 (Spd/Put) 和精胺与腐胺比值 (Spm/Put), 进而促进籽粒灌浆, 增加粒重。杨建昌等^[23]认为 MD 能够增加小麦籽粒中脱落酸 (ABA) 的含量, 降低乙烯前体 (ACC) 和乙烯

(ETH) 的含量, 从而提高灌浆速率; SD 能够同时增加小麦籽粒中脱落酸 (ABA)、乙烯前体 (ACC) 和乙烯 (ETH) 的含量, 从而降低灌浆速率。马召朋等^[24]认为干旱胁迫显著提高了小麦不同器官可溶性碳水化合物 (WSC) 含量, 促进了花前 WSC 转运, 缩短了小麦灌浆进程, 增加了灌浆速率和粒重, 但是抗旱品种和水肥敏感型品种之间有较大差异。本研究以高产优质抗旱新品种定丰 18 号和定丰 19 号为材料, 其灌浆速率和粒重在两个品种之间无显著差异, 说明干旱胁迫对抗旱品种的影响较小, 对水肥敏感型品种影响较大。但是, 小麦籽粒内源激素参与干旱胁迫对小麦灌浆速率和粒重影响的调控机制仍不清楚, 还需进一步研究。大多数学者认为在禾谷类作物灌浆期适度土壤干旱可以增加籽粒灌浆速率、粒重和产量, 这对农业实际应用生产有着非常重要的意义。但是, 本研究认为在小麦分蘖期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期、成熟期都进行 MD 也能增加籽粒灌浆速率、粒重和产量, 同时提高小麦生育期灌水利用效率, 这对节约农业水资源和农业可持续发展具有重大意义, 特别是对干旱半干旱区小麦高效栽培技术具有现实的指导意义。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 张宇, 王素萍, 冯建英. 2017 年全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 331-338.
- [3] 王有恒, 谭丹, 赵红岩. 近 50 a 来甘肃省极端高温事件变化特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 410-414.
- [4] 雷俊, 赵福年, 张红兵, 等. 半干旱区不同颜色覆膜对春小麦生长和产量的影响[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 561-567.
- [5] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80-94.
- [6] 吴普特, 赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 1-6.
- [7] YANG W B, YIN Y P, LI Y P, et al. Interactions between polyamines and ethylene during grain filling in wheat grown under water deficit conditions[J]. Plant Growth Regulation, 2014, 72(2): 189-201.
- [8] SHAO H B, CHU L Y, JALEEL C A, et al. Understanding water deficit stress - induced changes in the basic metabolism of higher plants biotechnologically and sustainably improving agriculture and the ecoenvironment in arid regions of the globe[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2009, 29(2): 131-151.
- [9] 王志强, 梁威威, 范雯雯, 等. 不同土壤肥力下冬小麦春季干旱的复水补偿效应[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1628-1636.
- [10] ZHOU J, WANG X, JIAO Y, et al. Global genome expression a-

- analysis of rice in response to drought and high – salinity stresses in shoot, flag leaf, and panicle[J]. *Plant Molecular Biology*, 2007, 63(5):591 – 608.
- [11] AKRAM M. Growth and yield components of wheat under water stress of different growth stages[J]. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 2011, 36(36):455 – 468.
- [12] 汪本福, 黄金鹏, 杨晓龙, 等. 干旱胁迫抑制作物光合作用机理研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(23):5628 – 5632.
- [13] 赵鸿, 李凤民, 熊友才, 等. 土壤干旱对作物生长发育过程及产量的影响研究进展[J]. *干旱气象*, 2008, 26(3):67 – 71.
- [14] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 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[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1):171 – 177.
- [15] HASANUZZAMAN M, HOSSAIN M A, TEIXEIRADASILVA J A, et al. Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress: antioxidant defense is a key factor[M]. BANDI V, SHANKER A K, SHANKER C, et al. *Crop stress and its management: perspectives and strategies*. The Netherlands: Springer, 2012:261 – 315.
- [16] RICHARDS F J. A flexible growth functions for empirical use[J]. *Exp Bot*, 1959, 10(2):290 – 301.
- [17] 张伟杨, 钱希昉, 李银银, 等. 土壤干旱对小麦生理性状和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(4):491 – 500.
- [18] 王维, 张建华, 杨建昌, 等. 适度土壤干旱对贪青小麦茎鞘贮藏性糖运转及籽粒充实的影响[J]. *作物学报*, 2004, 30(10):1019 – 1025.
- [19] 王征宏. 干旱对小麦灌浆期物质转运的调控[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.
- [20] 王永平, 刘杨, 卢海军, 等. 水分胁迫对夏玉米籽粒灌浆的影响及其与内源激素的关系[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(4):28 – 32.
- [21] 李翠, 赵伟洁, 刘瑞, 等. 水分胁迫对糜子物质运转和籽粒灌浆特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1):20 – 27.
- [22] 张伟杨, 徐云姬, 钱希昉, 等. 小麦籽粒游离多胺对土壤干旱的响应及其与籽粒灌浆的关系[J]. *作物学报*, 2016, 42(6):860 – 872.
- [23] 杨建昌, 朱庆森, 王志琴, 等. 亚种间杂交稻光合特性及物质积累与运转的研究[J]. *作物学报*, 1997, 23(4):385 – 392.
- [24] 马召朋, 栗孟飞, 杨德龙, 等. 不同水分条件下冬小麦灌浆期茎叶可溶性碳水化合物积累转运与籽粒灌浆的关系[J]. *草业学报*, 2014, 23(4):68 – 78.

Effects of Drought Stress on Physiological Characteristics and Irrigation Water Use Efficiency of Spring Wheat in Central Gansu

ZHANG Jian¹, ZHANG Ming¹, HOU Yunpeng¹,

WANG Huirong¹, ZHAO Funian²

(1. *Dingxi Institute of Agricultural Sciences of Gansu Province, Dingxi 743000, Gansu, China;*

2. *Dingxi Arid Meteorological and Ecological Environment Field Experimental Station, China Meteorological Administration, Dingxi 743000, Gansu, China)*

Abstract: In order to study the effect of drought stress on physiological characteristics and irrigation water use efficiency during growth and development period, the high – yielding, high – quality and drought – resistant new varieties of spring wheat named ‘Dingfeng 18’ and ‘Dingfeng 19’ were used as materials. Well watered (WW), moderate soil drought (MD) and severe soil drought (SD) from the tillering stage to maturity stage were treated to study their effects on wheat leaf water potential, photosynthetic rate, grain filling rate, yield components and irrigation water use efficiency. The results show that compared with WW treatment, the leaf water potential significantly reduced ($p < 0.05$) under MD and SD treatment, and it reached normal level through night recovery under MD treatment, but it could not restore under SD treatment. The photosynthesis of leaves was significantly inhibited under SD treatment, there was no significant difference in photosynthesis of leaves between MD and WW treatments ($p > 0.05$). Compared with WW treatment grain filling rate, grain weight, grain number, 1000 – grain weight and yield significantly increased under MD treatment and significantly decreased under SD treatment. There was no significant difference in the bulk weight between different treatments ($p > 0.05$). Two years experiments results of the two different varieties were basically consistent. Moderate water deficit was beneficial to increase wheat yield, thus improving irrigation water use efficiency.

Key words: spring wheat; drought stress; physiological characteristics; yield components; irrigation water use efficiency