

不同时期灌水对冬小麦干热风的防御效应

赵花荣¹,任三学¹,齐月²,田晓丽³

(1.中国气象科学研究院,北京 100081;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重点实验室,甘肃,兰州 730020;3.中国气象科学研究院(固城)生态环境与农业气象试验站,河北 保定 072656)

摘要:灾前灌水是防御灾害发生的有效措施,为掌握灌水的最佳发育期及适宜灌水量,在防雨棚和自然大田进行冬小麦抽穗期、开花期、灌浆初期灌水试验。结果表明:在开花期,灌水 100、150 mm 自然大田干热风穗的发生率比遮雨棚降低 31.77%、32.85%,而穗粒重自然大田比防雨棚提高 12.25%、5.45%;无论开花期还是抽穗~灌浆初期,灌水处理的千粒重均比对照大,防雨棚中随灌水时间推后千粒重逐渐增大,而自然大田以开花期灌水千粒重最大,为 47.664 g。灌水 100、150 mm 处理,灌水效率自然大田均比防雨棚高,且均以开花期灌水效率最高,为 $4.110 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,防雨棚灌水 150 mm 比灌水 100 mm 高约 $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,而自然大田受自然降水补给调节土壤水分,灌水 150 mm 比灌水 100 mm 低 $0.565 \sim 1.301 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。灌水对干热风防御效应效果自然大田较防雨棚更为显著,且以开花期灌水效应最为显著。

关键词:冬小麦;干热风;灌水时间;灌水量;灌水效率;产量

中图分类号:S424;S274 **文献标志码:**A

Defensive effect of irrigation at different stage on hot dry wind stress on winter wheat

ZHAO Hua-rong¹, REN San-xue¹, QI Yue², TIAN Xiao-li³

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. The Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration/Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster/Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou, Gansu 730020, China; 3. China Academy of Meteorological Sciences (Gucheng) Ecological Environment and Agro-meteorology Test Station, Baoding, Hebei 072656, China)

Abstract: Hot dry wind is one of the meteorological factors causing the annual fluctuation of wheat yield. Pre-disaster defense can effectively mitigate the damage caused by disasters. When the hot dry wind occurs, it will cause irreversible physiological harm to the wheat plant and the grain filling in the kernel, and the pre-disaster irrigation is an effective measure to prevent the occurrence of the disaster. In order to master the key development period of irrigation water and appropriate irrigation water, during the heading stage of winter wheat, flowering and milking, the irrigation of 100 mm and 150 mm were respectively tested in the waterproof canopy and natural field. The results showed that at the flowering stage, the incidence of hot dry air spikes and the grain weight per panicle of 100 mm and 150 mm irrigation fields were about 30% and 3% higher than that of the covered, which was 18.03% and 15.14% lower than that of the control. Regardless of the flowering stage or the heading-filling stage, the 1000-grain weight from the irrigation treatment was significantly greater than that of the control. In the rainproof shed, the 1000-grain weight gradually increased with increasing irrigation time, while the natural field had the largest 1000-grain weight in the flowering stage, which was 47.664 g. The irrigation efficiency was naturally higher than that of the rainproof shed, and the irrigation efficiency was the highest at the flowering stage, which was $4.110 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$.

收稿日期:2018-08-29

修回日期:2018-10-22

基金项目:甘肃省青年科技基金计划项目(17JR5RA344);甘肃省气象局气象科研项目(GSMAMs2018-13);国家自然科学基金项目(41505098,1775105,41775107);国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-2)

作者简介:赵花荣(1968-),女,甘肃文县人,工程师,主要从事应用气象试验研究。E-mail:656892rzz@163.com

通信作者:齐月(1988-),女,山东章丘人,助理研究员,主要从事气候变化及其对农业影响的研究。E-mail:goodqiyue@163.com

mm⁻¹. The irrigation efficiency of the rain shed irrigation of 150mm was about 0.2 g · m⁻² · mm⁻¹ higher than that with 100mm, while the natural field was regulated by natural precipitation to regulate soil moisture. The irrigation efficiency of irrigation of 150mm was 0.565~1.301 g · m⁻² · mm⁻¹ lower than that of 100mm. The effect of irrigation on the dry and hot air defense effect was obvious, and the natural field was more prominent than the canopy, and the effect was most significant in the flowering period. Therefore, the accurate climate prediction and agricultural meteorological service of hot dry wind should be paid attention to, and it can effectively defend and mitigate the loss of hot dry wind on the winter wheat before the disaster.

Keywords: winter wheat; hot dry wind; irrigation time; irrigation amount; irrigation efficiency; production

干热风是影响我国北方小麦稳产高产的主要农业气象灾害,对小麦的千粒重和产量影响较大,是引起年际间小麦产量波动的气象因子之一。我国防御干热风主要采用“躲”、“抗”、“防”、“改”4种综合技术措施,其中“防”是指干热风来临前采取灌水施肥等农技措施增强小麦抗御干热风的能力^[1],因此,在干热风发生的灌浆期,适时适量灌溉是防御和减轻干热风危害的有效措施之一。研究表明,灌溉可以增大小麦的灌浆速度、延长灌浆时间,提高千粒重,增加产量。灌浆水可改善小麦灌浆期的田间小气候,灌溉后2~3 d,中午14:00麦田活动面温度可降低1~2℃,5 cm地温平均偏低3~5℃,活动面相对湿度提高5%~10%。灌溉后小气候效应一般可以维持3~5 d,特别是干热风前3~5 d浇水,当干热风来临时,14:00穗部气温较未浇水麦田降低0.8~2.0℃,5 cm地温降低4℃左右,株间空气湿度提高5%~10%,千粒重增加1~2 g^[2-3]。黄淮海冬麦区是我国最大的小麦产区^[4],该区域灌浆期经常发生高温低湿型干热风^[1,5-10]。干热风的基本特征是:日最高气温≥30℃,14:00空气相对湿度≤30%,14:00风速3 m · s⁻¹,即“三个三”干热风指标^[1,7,10]。

在气候变暖背景下,未来干热风灾害发生的频率和范围可能增大^[10-15]。河北省冬小麦主要灌浆期在5月中旬至6月上旬,干热风对冬小麦籽粒灌浆、增重影响大,轻者减产10%左右,重者减产20%以上^[1,9,16-19]。由于冬小麦生长季处于华北平原冬春少雨的旱季,其降雨量仅占年降雨量的不足20%,且灌浆期多发生春末夏初旱,冬小麦生长发育和产量形成主要依靠灌溉。麦田管理中适时适量浇好灌浆水对防御干热风危害十分重要。本研究于2017年在冬小麦抽穗~灌浆期进行不同时期灌水对防御小麦干热风效应的田间试验,旨在揭示不同时间不同灌水量对防御干热风的减灾效应,为指导服务农业生产和防灾减灾提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验在中国气象科学研究院固城生态环境与农业气象试验站(简称固城站,39°08'N,115°40'E,海拔15.2 m)进行。试验场地的防雨棚和自然大田及气象观测场毗邻,气象环境条件和土壤质地、地下水位等一致,降雨时关上防雨棚,其它时间(包括夜间)防雨棚开放。该站位于华北平原北部高产农业区的典型代表性区域,地势平坦,土层深厚,试验场土壤类型为砂壤土,0~30 cm土层土壤平均全氮0.9753 g · kg⁻¹,全磷1.0196 g · kg⁻¹,全钾17.2624 g · kg⁻¹,pH值8.19。田间持水量平均为22.7%,凋萎湿度平均为5.0%,土壤容重平均为1.37 g · cm⁻³。该站年平均气温12.0℃,年降水量478.5 mm,年日照时数1 972.7 h,属暖温带季风大陆性气候区,降水季节分配不均,70%以上降水集中在夏季,冬小麦生长季占年降水量不足20%。

1.2 试验设计

冬小麦抽穗前各试验处理田间管理措施均一致,抽穗始期进行不同试验处理。为检验灌水在不同时间和不同灌水量处理下对干热风的防御效应以及自然降水对人工控制水分试验过程、效应的影响,试验设为2组:1组在大型可控式防雨棚,遮去自然降水,植株生长发育和穗部籽粒灌浆完全受人工灌水影响(试验小区为8 m²,2 m×4 m);2组在自然大田进行,受自然降水影响(大田试验区为6 m²,2 m×3 m),在抽穗期、开花期、灌浆初期分别设置4个处理,对照处理(抽穗开始不灌水)、高湿处理(即抽穗开始充足灌水,土壤相对湿度保持在90%以上)、灌水100 mm、灌水150 mm。每个处理设3个重复。试验设计见表1。试验于2017年冬小麦抽穗始期~成熟期进行。供试品种为郑麦98(半冬性),播种量37.5 g · m⁻²,播种行距25 cm。播种时施底肥75 g · m⁻²(磷酸二铵:N-P₂O₅-K₂O—18%-46%-0%,总养分≥64.0%)。拔节期灌水时追肥60.0 g · m⁻²(多肽尿素,含氮≥46.2%)。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	灌水量/mm Irrigation amount	灌水日期(m-d) Irrigation date	
对照处理 Control treatment	不灌水 No irrigation		
防雨棚 Rainproof shed	抽穗水 Heading water	100 04-25	
	开花水 Flowering water	150 04-25 100 05-03 150 05-03	
	灌浆(初)水 Grouting (primary) water	100 05-13 150 05-13	
	对照处理 Control treatment	不灌水 No irrigation	
自然大田 Natural field	高湿处理 High humidity treatment	充足灌水 Adequate irrigation	抽穗~成熟期 Heading~maturity Period
	抽穗水 Heading water	100	04-28
	开花水 Flowering water	150	04-28
	灌浆水 Grouting water	100	05-04
		150	05-04
		100	05-14

1.3 干热风发生的气象条件

2017年5月15日中央气象台发布预计17—19日华北黄淮地区持续晴热,日最高气温均达32℃以上,冬麦区将出现干热风天气。18—19日,河北中南部、河南北部部分地区最高气温达37℃左右,出现中到重度干热风天气,可能对冬小麦灌浆不利,导致冬小麦灌浆速率下降,降低籽粒重量。24日发布预计26—28日华北黄淮部分冬麦区可能出现轻度干热风天气。中国气象报、中国新闻网等多家媒体都做了报道,提醒做好干热风的“一喷三防”工作。从表2中固城站冬小麦干热风发生的气象条件看出:2017年5月16—21日温度、湿度、风速等气象条件,日最高气温均在30℃以上,期间5月18—20日出现了1次中度干热风天气过程,日最高气温33.7~35.5℃,日最小相对湿度24%~39%,日最大风速3.1~5.5 m·s⁻¹。之后5月24日至6月1日又经历了较长时间的晴晒干热天气过程,期间间断性达到了轻度干热风天气3 d,日最高气温33.0~33.7℃。该时段冬小麦正处于乳熟~黄熟(大田观测乳熟期5月20日)的籽粒灌浆时段,干热风危害致使冬小麦植株穗部颖壳及芒“青干”特征十分明显,叶片和茎秆绿色组织蒸散失水,快速变黄或“青干”,麦黄速度加快,表现出“青干逼熟”特征,2017年自然大田冬小麦成熟期6月8—9日,较多年平均提前4~5 d(固城站2000—2016年有观测记录冬小

麦成熟期平均6月13日)。冬小麦开花~灌浆期5月份降水量15.5 mm(主要是5月22日14.8 mm,5月3日0.3 mm,5月30日0.4 mm,其余时间无降水)。乳熟期出现降水补给调节自然大田土壤水分,缓解减轻小麦干热风危害程度。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 灌水量 灌水使用智能流量积算仪(精度0.00000 m³)定量控制。

1.4.2 土壤湿度 采用土钻法人工取土,烘干称重法计算土壤湿度,土壤相对湿度(%)=土壤重量含水率(%) / 田间持水量(用重量含水率%表示) × 100。

1.4.3 干热风穗发生率 干热风发生期,在试验小区采样1 m、1行小麦植株,挑选出干热风危害穗,统计样本中干热风危害穗、正常穗,计算干热风穗发生率(%)。干热风穗发生率(%)=干热风危害穗/总穗数×100%。

1.4.4 产量 成熟期在试验小区连续收取1 m²小麦植株样本,进行干热风危害穗和正常穗的穗粒重、千粒重等产量要素测定。

1.4.5 灌水效率 灌水效率=(处理籽粒重—对照籽粒重)/处理灌水量。籽粒重单位为g·m⁻²,灌水量单位为mm。

1.4.6 气象资料 使用固城站平行气象观测的温度、相对湿度、风速等气象要素资料。观测方法依据《地面气象观测规范》^[20]。

1.5 数据处理

利用Excel 2010和SPSS 18.0软件进行数据处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同时期灌水对冬小麦成熟期和干热风穗发生率的影响

从表3中看出,防雨棚和自然大田的对照处理冬小麦因水分胁迫6月2—3日达到成熟期,自然大田的高湿处理因土壤过湿成熟期推迟至6月11日。同一试验区不同灌水时间其成熟期一致,防雨棚在6月5日,自然大田在6月9日,但自然大田较防雨棚因自然降水补给调节,成熟期较防雨棚推迟4 d。从收获期土壤湿度看,对照处理已达到干旱,冬小麦植株受到干旱胁迫;高湿处理的土壤处于过湿状态。同一试验区不同灌水时间灌水量100、150 mm的土壤湿度差异不大,表明冬小麦收获期处于轻旱状态。

表 2 2017 年河北(固城站)冬小麦干热风发生的气象条件

Table 2 Meteorological conditions for the hot dry wind occurrence on winter wheat in Hebei (Gucheng Station) in 2017

干热风天气时段 Hot dry wind weather periods	开花期~成熟期最高温度 Flowering period~maturity period maximum temperature/°C		$T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$		$T_{max} \geq 32^{\circ}\text{C}$		14:00 相对湿度 14:00 relative humidity /%	日最小相对湿度 Daily minimum relative humidity /%	14:00 最大风速 14:00 wind speed $/(m \cdot s^{-1})$	日最大风速 Daily maximum wind speed $/(m \cdot s^{-1})$	
	平均值 Average value	范围 Range	日期 Date	温度/°C Temperature	日期 Date	温度/°C Temperature					
05-16— 05-21	32.3	30.1~35.5	05-16	30.5			35	28	3.7	3.7	3.7
			05-17	30.3			49	42	2.5	3.2	3.8
			05-18	33.8	05-18	33.8	45	39	2.6	3.0	3.1
			05-19	35.5	05-19	35.5	36	24	3.9	4.0	5.5
			05-20	33.7	05-20	33.7	30	30	1.5	2.8	4.5
			05-21	30.1			56	49	2.9	3.1	5.5
05-24— 06-01	28.5	28.5~33.2	05-24	33.0	05-24	33.0	27	14	4.0	3.9	6.2
			05-25	29.2			46	31	4.6	6.0	6.5
			05-26	28.5			39	38	0.2	1.7	2.9
			05-27	31.7			50	42	1.6	2.3	5.3
			05-28	33.2	05-28	33.2	48	39	3.7	5.0	6.3
			05-29	27.2			46	35	5.5	7.2	9.0
			05-30	26.7			55	47	2.4	2.1	4.6
			05-31	33.7	05-31	33.7	34	32	5.7	5.4	5.8
			06-01	31.2			37	34	2.2	2.8	9.7

表 3 不同时期灌水对冬小麦干热风穗发生率、成熟期和土壤湿度的影响

Table 3 Effects of different time irrigation on the dry hot wind spike incidence, maturity and relative humidity of the soil of winter wheat

处理 Treatment	收获期土壤相对湿度/% Relative humidity of the soil during harvest		成熟期 Maturity (m-d)	干热风穗发生率/% Dry hot wind spike incidence		
	0-50 cm	0-100 cm				
对照处理 Control treatment	对照处理	37.9	47.7	06-02	81.34	
	防雨棚 Rainproof shed	抽穗水	36.9	51.1	06-05	64.67
		Heading water	44.6	54.3	06-05	59.63
		开花水	43.0	55.2	06-05	50.57
		Flowering water	43.9	58.0	06-05	47.55
		灌浆水	47.1	53.9	06-05	59.04
Grouting water	50.2	58.2	06-05	56.83		
自然大田 Natural field	对照处理	38.1	49.6	06-03	69.91	
	高湿处理	105.7	107.4	06-11	1.55	
	抽穗水	46.2	55.2	06-09	26.83	
		Heading water	52.2	56.2	06-09	21.14
		开花水	57.0	68.4	06-09	7.37
		Flowering water	59.6	68.4	06-09	3.27
		灌浆水	49.8	63.3	06-09	9.77
Grouting water	51.4	63.7	06-09	7.74		

注:表中试验观测、测定资料均为处理平均值,下同。

Note: The experimental observations and measured data are the average values of treatment in the table, the same below.

同一灌水时间,无论是 100 mm 灌水量还是 150 mm 灌水量,防雨棚的干热风穗发生率显著高于自然大田,并且灌浆水>开花水>抽穗水(见表 2),随着灌水时间推后差值增大,可以看出自然降水的补

充对干热风穗发生率具有调节作用。遮雨棚各处理灌水量 100 mm 抽穗水、开花水、灌浆水干热风穗发生率分别为 64.67%、50.57%、59.04%,比对照处理降低 16.67%、30.77%、22.30%;灌水量 150mm 抽

穗水、开花水、灌浆水干热风穗发生率分别为 59.63%、47.55%、56.83%，比对照处理降低 21.71%、33.79%、24.51%。自然大田各处理灌水量 100 mm 抽穗水、开花水、灌浆水干热风穗发生率分别为 26.83%、7.37%、9.77%，比对照处理降低 43.08%、62.54%、60.14%；灌水量 150 mm 抽穗水、开花水、灌浆水干热风穗发生率分别为 21.14%、3.27%、7.74%，比对照处理降低 48.77%、66.64%、62.17%。

因此，抽穗~灌浆期灌水对干热风危害的防御效应十分明显，且自然大田比防雨棚效应更显著。自然大田和防雨棚两组试验开花期灌水比抽穗期、灌浆初期灌水效应均显著，灌浆初期灌水比抽穗期相对明显。大水漫灌（灌水量 100 mm）条件下，继续加大灌水量（灌水量由 100 mm 增加到 150 mm）能够降低干热风穗发生率，但对干热风危害防御效应的提高并不显著，且随灌水时间推后效应下降。

2.2 不同时期灌水对冬小麦穗粒重的影响

干热风对小麦的危害是“热害”和“干害”综合作用的结果，而防御方法的预期效果归结起来就两

方面：一是改善农田小气候，降温增湿；二是增强小麦抵御干热风能力。灌溉是防御干旱和干热风的有效措施，通过灌溉增加土壤和大气中的湿度来调节农田中的水热状况，改善农田小气候，达到预防和减轻干热风危害的目的。如徐州农业气象试验站遇到干热风时灌溉麦田观测湿度变化，与对照相比，灌溉使 5~15 cm 地温低 5℃，地上 20~50 cm 最高温度低 1℃~3℃，14:00 相对湿度增加 3%~5%，植株间高温低湿时间缩短 1~2 h 和 1~4 h，从而使地温与地面温度大幅度下降，调节了小麦植株体内的温度^[1]。干热风发生会阻滞冬小麦籽粒灌浆进程，严重时导致灌浆停止，直接造成冬小麦穗粒重和千粒重减小，籽粒瘪秕。表 4 反映了不同灌水时间对冬小麦干热风穗粒重的影响。从表中看出，防雨棚和自然大田试验干热风发生均造成穗粒重减小。但自然大田受到降水补给，调节土壤水分，各处理其干热风穗的穗粒重较正常穗减产均比防雨棚处理小。

表 4 不同时期灌水对冬小麦干热风穗粒重的影响

Table 4 The effects of different irrigation time on the grain weight of hot dry spikes of winter wheat

处理 Treatment	灌水量/mm Irrigation amount	正常穗粒重 Normal grain weight per spike /(g·穗 ⁻¹)	干热风穗粒重 Grain weight per spike of hot dry wind /(g·穗 ⁻¹)	干热风穗较正 常穗减产率 Yield reduction of hot dry spike compared with normal panicle/%		
防雨棚 Rainproof shed	对照处理 Control treatment	不灌水 No irrigation	1.481b	0.981e	-33.76ab	
	抽穗水 Heading water	100	1.796a	1.010e	-43.76a	
		150	1.915a	1.073d	-43.97a	
	开花水 Flowering water	差值 D-value	0.119	0.063		
		100	1.880a	1.354b	-27.98b	
	灌浆水 Milking water	150	2.036a	1.546a	-24.07b	
		差值 D-value	0.156	0.192		
	自然大田 Natural field	对照处理 Control treatment	不灌水 No irrigation	1.984b	1.457e	-26.56a
		高湿处理 High humidity	充足灌水 Adequate irrigation	2.399a	2.127ab	-11.34b
			100	2.410a	1.946cd	-19.25ab
抽穗水 Heading water		150	2.500a	2.089abc	-16.44ab	
		差值 D-value	0.090	0.143		
开花水 Flowering water		100	2.309a	2.112ab	-8.53b	
		150	2.479a	2.196a	-11.42b	
灌浆水 Milking water		差值 D-value	0.170	0.084		
		100	2.369a	1.999bcd	-15.62ab	
		150	2.405a	1.849d	-23.12a	
	差值 D-value	0.036	-0.150			

注：不同字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters mean significant difference at $P < 0.05$ level.

不同灌水时期处理中,防雨棚和自然大田减产率分别为抽穗水>灌浆水>开花水,开花水处理减产率略小于高湿处理减产率,防雨棚和自然大田开花期灌水减产最小。防雨棚和自然大田试验区的 3 个灌水时期:灌水 100 mm 与 150 mm 减产率差异较小,但灌水 150 mm 的正常穗和干热风穗粒重均比灌水 100 mm 大。只有自然大田 150 mm 灌浆水灌水处理干热风穗粒重比 100 mm 灌水处理干热风穗粒重小,原因可能因灌水时间晚,并且灌水多,部分穗出现了贪青晚熟,收获期受高温天气影响致其“青干逼熟”,表现特征:植株茎秆、叶片及穗部颖壳和芒失水“青干”。

从图 1 中可看出防雨棚和自然大田试验区不同灌水时间灌水 100、150 mm 及对照处理干热风穗粒重均以开花水的最大,且除自然大田灌浆水 150 mm 比 100 mm 偏小外,其他灌水 150 mm 比灌水 100 mm 的干热风穗粒重大。由于灌水时间及灌水量对冬小麦开花、授粉、灌浆速率等生理过程影响的差异,从防雨棚和自然大田在冬小麦不同生理期不同灌水量干热风穗粒重差值反映出不同灌水处理对干热风防御效应不同。

2.3 不同时期灌水对冬小麦千粒重的影响

从抽穗~灌浆初期不同灌水时间的千粒重可以看出(表 5),防雨棚和自然大田 2 个试验区灌水处理较其对照处理千粒重均明显提高,灌水 150 mm 较 100 mm 提高显著。以灌水 100 mm 为例,防雨棚

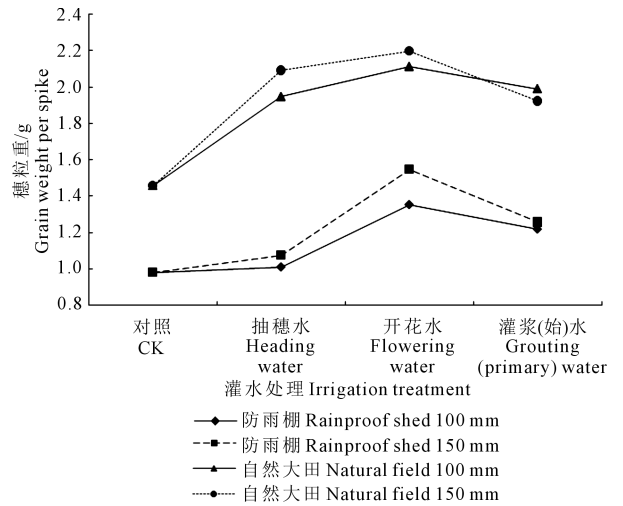


图 1 不同时期灌水对冬小麦干热风穗粒重的影响

Fig.1 Effects of different irrigation time on the grain weight of hot dry spikes of winter wheat

表 5 不同时期灌水对冬小麦千粒重、灌水效率的影响

Table 5 Effects of different irrigation time on the thousand seed weight and irrigation efficiency of winter wheat

处理 Treatment	灌水量/mm Irrigation amount	千粒重/g Thousand seed weight	灌水效率(g·m ⁻² ·mm ⁻¹) Irrigation efficiency
对照处理 Control treatment	不灌水 No irrigation	32.900d	-
防雨棚 Rainproof shed	抽穗水 Heading water	100 33.022d	1.219bc
	150 37.530b	1.198bc	
	差值 D-value	4.508	-0.021
	100 34.685c	1.740ab	
	开花水 Flowering water	150 37.746b	1.988a
	差值 D-value	3.061	0.248
灌浆(初)水 Milking (primary) water	100 38.671a	1.072c	
	150 39.167a	1.247bc	
	差值 D-value	0.496	0.175
	对照处理 Control treatment	不灌水 No irrigation	34.991e
高湿处理 High humidity treatment	充足灌水 Adequate irrigation	47.532a	-
	100 41.196d	2.886b	
	150 43.797c	2.321c	
	差值 D-value	2.601	-0.565
	100 46.415b	4.110a	
	150 47.664a	2.809b	
自然大田 Natural field	差值 D-value	1.249	-1.301
	100 45.713b	2.942b	
	150 46.174b	2.180c	
	差值 D-value	0.461	-0.762

抽穗水、开花水和灌浆水千粒重分别提高 0.122、1.785 g 和 5.771 g；自然大田抽穗水、开花水和灌浆水千粒重分别提高：6.205、11.424 g 和 10.722 g；自然大田较防雨棚提高更为明显。自然大田开花期灌水 150 mm 千粒重最高，为 47.664 g，与高湿处理的千粒重 47.532 g 相近。

防雨棚和自然大田抽穗期、开花期、灌浆初期不同时期灌水对千粒重的影响效应表现不同。防雨棚不同灌水量千粒重均随灌水时间延后增大，开花期较抽穗期分别增大 1.663、0.216 g，灌浆初期较开花期分别增大 3.986、1.421 g。但自然大田由于受降水补给调节的影响，千粒重变化和防雨棚不同，抽穗期、开花期、灌浆初期不同灌水量都以开花水千粒重最大，灌浆初期次之，抽穗期最小。

防雨棚和自然大田灌水 150 mm 均比 100 mm 千粒重大，抽穗期、开花期、灌浆初期灌水防雨棚分别大 4.508、3.061、0.496 g；自然大田分别高 2.601、1.249、0.461 g。从千粒重上反映出抽穗~灌浆初期灌水在开花期浇灌防御干热风效应更为显著。

2.4 不同时期灌水对灌水效率的影响

从图 2 和表 5 防雨棚和自然大田灌水效率可以看出，其灌水 100、150 mm 均以开花期最高，灌水 100、150 mm 防雨棚分别为 1.740、1.988 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ；自然大田分别为 4.110、2.809 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

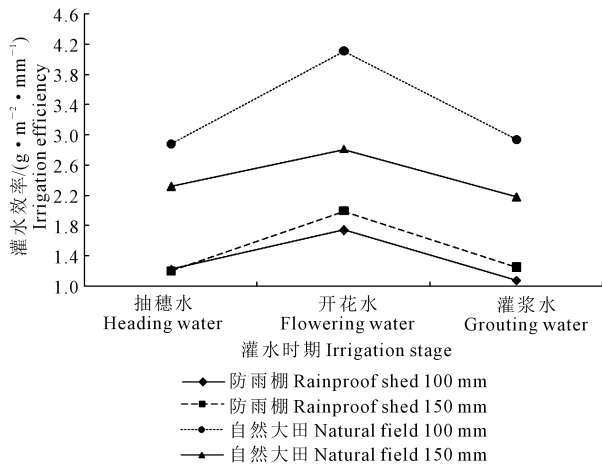


图 2 不同时期灌水对冬小麦灌水效率的影响

Fig.2 Effects of different irrigation time on irrigation efficiency of winter wheat

比较灌水 100 mm 与 150 mm 的差异，防雨棚 150 mm 较 100 mm 灌水效率高，抽穗期基本相同，开花期高 0.248 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，灌浆初期高 0.175 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ；但自然大田 150 mm 较 100 mm 灌水效率却低，抽穗期低 0.565 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，开花期低 1.301 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，灌浆期低 0.762 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

mm^{-1} 。防雨棚和自然大田差值均为开花期最大。比较灌水 100、150 mm 的灌水效率自然大田均比防雨棚大。主要由于自然大田受自然降水补给调节土壤水分，灌水多增产效应反而降低，而防雨棚遮去降水，完全依赖灌水补充土壤水分，灌水多有利于增产。

3 结论与讨论

气候变暖背景下，因气候和天气异常引发的自然灾害尤其其气象灾害更加频繁严重。干热风是一种偶发性的农业气象灾害，且有地域性危害的特征，干热风一旦发生对小麦植株及穗部籽粒灌浆造成不可逆的生理性伤害。防御灾害的重点是提高干热风发生的中短期气候预测的精准度、早期预警及气象为农业跟踪服务，做到天气预报信息传播到农村农民。减轻灾害的关键应是灾前防御。目前，农田管理措施中适时适量灌水是防御干热风有效方法之一。在冬小麦抽穗~灌浆初期的灌水试验发现：灌水能显著降低干热风穗发生率，防雨棚灌水 100 mm 降低 16.67%~30.77%，灌水 150 mm 降低 21.71%~33.79%；自然大田较防雨棚更为显著，灌水 100 mm 降低 43.08%~62.54%，灌水 150 mm 降低 48.77%~66.64%；防雨棚和自然大田均是开花期灌水降低干热风穗发生率效应最显著，灌浆初期灌水比抽穗期相对明显。

分析收获期田间取样测定产量得出：防雨棚和自然大田在抽穗~灌浆初期灌水的正常穗和干热风穗穗粒重均高于对照处理，以开花期灌水的干热风穗穗粒重最大，同高湿处理基本接近。但干热风穗穗粒重比正常穗穗粒重减产，防雨棚减产 24.07%~43.97%，自然大田减产 8.53%~23.12%。因自然大田受降水补给调节土壤水分，其干热风穗穗粒重较正常穗减产比防雨棚处理小，对照处理减产率偏小 7.20%，不同灌水时期减产率偏小 10.42%~27.53%。与干热风穗发生率的灌水效应相同，防雨棚和自然大田穗粒重减产率开花期灌水最小。但防雨棚和自然大田灌水的千粒重都比对照处理大，不同点是防雨棚随灌水时间推后千粒重逐渐增大，而自然大田开花期灌水的千粒重最大。

已有研究较多关注农业措施减轻干热风危害麦田植株的表观特征以及农田小气候效应，通过调查测产等方法取得不同程度干热风灾害造成的减产程度，实施防御措施后对千粒重、穗粒重等产量要素提高或减轻损失的田间平均结果，而我们在试验研究中把干热风危害穗和正常穗进行标记，取样分析不同时期灌水的干热风穗发生率，并通过产量

分析分别测定出干热风危害穗和正常穗的千粒重、穗粒重等产量要素,更为明晰地得出灾前灌水防御干热风的效应,尤其提出开花期灌水防御干热风效应最为显著,把对自然灾害防灾减灾工作中的"预、抗、减、救"提前到预防的前期环节,改变只注重干热风发生前或灾害中,通过灌水减轻干热风灾害损失的农业减灾措施及灾后灾损评估。

灌水效率自然大田比防雨棚高,且都是开花期灌水最大,灌水 100、150 mm 防雨棚分别是 1.740、1.988 $g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$,自然大田分别是 4.110、2.809 $g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$ 。不同的是防雨棚灌水 150 mm 比 100 mm 高,而自然大田灌水 150 mm 比 100 mm 却低。说明大田农业生产有自然降水补给调节土壤水分,灌水多水分利用效率反而降低。因此,面临华北平原水资源紧缺,地下水严重超采,水位下降已出现多处地下水漏斗的严峻生态环境问题,农业用水占 70% 以上,农业灌溉依靠抽取地下水且仍然采用大水漫灌的传统模式,水分利用效率低,亟待推行限制开采地下水,科技指导节水灌溉,推行节水农业。

参考文献:

- [1] 北方小麦干热风科研协作组. 小麦干热风[M]. 北京:气象出版社, 1988: 256-257.
- [2] 杨玉栋, 崔超. 小麦生长后期干热风的防御技巧[J]. 农机科技推广, 2010, (6): 55-55.
- [3] 张志红, 成林, 李书玲, 等. 我国小麦干热风灾害研究进展[J]. 气象与环境科学, 2013, 36(2): 72-76.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 国家统计数据库-年度数据-农业(2011) [EB/OL]. [2013-7-5]. [http://219.235.129.58/re-portYear-](http://219.235.129.58/re-portYear-Browse.do)

Browse.do.

- [5] 赵俊芳, 赵艳霞, 郭建平, 等. 过去 50 年黄淮海地区冬小麦干热风发生的时空演变规律[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2815-2825.
- [6] 成林, 张志红, 常军. 近 47 年来河南省冬小麦干热风灾害的变化分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 456-460.
- [7] 中华人民共和国气象行业标准. QX/T82-2007. 小麦干热风灾害等级[S]. 北京:气象出版社, 2007.
- [8] 陈怀亮, 邹春辉, 付祥建, 等. 河南省小麦干热风发生规律研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 59-64.
- [9] 史印山, 尤凤春, 魏瑞江, 等. 河北省干热风对小麦千粒重影响分析[J]. 气象科技, 2007, 35(5): 699-702.
- [10] 邓振镛, 张强, 倾继祖, 等. 气候暖干化对中国北方干热风的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 664-671.
- [11] IPCC. Synthesis report of the IPCC fourth assessment re-port 2007 [EB/OL]. [2013-7-5]. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm.
- [12] 邓振镛, 王强, 张强, 等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278-6288.
- [13] 郭定荣, 刘建栋, 刘玲, 等. 近 50 年华北平原干热风时空分布特征[J]. 自然灾害学报, 2012, (05): 167-172.
- [14] 杨霏云, 朱玉洁, 刘伟昌. 华北冬麦区干热风发生规律及风险区划[J]. 自然灾害学报, 2013, (03): 112-121.
- [15] 李香颜, 张金平, 陈敏. 基于 GIS 的河南省冬小麦干热风风险评估及区划[J]. 自然灾害学报, 2017, (03): 063-70.
- [16] 时风云, 徐文国, 吴建河, 等. 濮阳近 40 年干热风特征和成因分析及防御[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 251-254.
- [17] 张建军, 崔宝琪, 李晶晶. 小麦干热风的危害与防御措施[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(14): 238-239.
- [18] 赵娜, 刘赞. 我国小麦干热风危害及其防御措施研究[J]. 农业灾害研究, 2011, (2): 68-73.
- [19] 郭晓丽. 干热风对小麦的危害及防御措施[J]. 现代农业科技, 2011, (4): 308-308.
- [20] 中国气象局. 地面气象观测规范[S]. 北京:气象出版社, 2003: 35-53.

(上接第 50 页)

- [19] Kell B. Wilson, Paul J. Hanson, Patrick J. Mulholland, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, (106): 153-168.
- [20] Allen S J, Grime V L. Measurements of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 75(1): 23-41.
- [21] 刘浩, 孙景生, 段爱旺, 等. 温室滴灌条件下番茄植株茎流变化规律试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 77-82.
- [22] 任乐, 罗新兰, 李天来, 等. 日光温室温度对番茄叶面积扩展的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(9): 2610-2612.
- [23] 冯新灵, 张群芳. 作物群体的消光系数问题[J]. 绵阳农专学报, 1987, 13(1): 44-48.
- [24] Monteith J L, Unsworth M H. Principles of environmental physics (2nd ed.) [M]. London: Edward Arnold, 1990.
- [25] 贺康宁, 田阳, 张光灿. 刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 251-258.
- [26] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤—植物—大气连续体水分传输理

论及其应用[M]. 北京:水利水电出版社, 1994.

- [27] Goudriaan J, Van Laar H H. Modelling potential crop growth processes: Textbook with exercises [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [28] Pollet S, Bleyaert P, Lemeur R. Application of the Penman-Monteith model to calculate the evapotranspiration of head LETTUCE (*Lactuca sativa* L. var. capitata) in glasshouse condition [J]. Acta Hort, 2000, 519: 151-161.
- [29] Stanghellini C. Vapour balance [M]. Wageningen: Wageningen Pers, 1995.
- [30] Campbell G. An introduction to environmental biophysics [M]. New York: Springer-Verlag, 1977.
- [31] Yang X, Ducharme K M, McAvoy R J, et al. Effect of aerial conditions on heat and mass exchange between plants and air in greenhouse [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 225-229.
- [32] R.de Graaf, J.van den Ende. Transpiration and evapotranspiration of the glasshouse crops [J]. Acta Horticultu-rae, 1981, 119: 147-158.