

测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦水分利用效率及灌浆动态的影响

张黛静, 杨逗逗, 马建辉, 王多多, 张艳艳, 郭雪妮, 李春喜

(河南师范大学 生命科学学院, 河南 新乡 453007)

摘要:为研究氮肥调控下测墒滴灌对冬小麦水分利用效率及灌浆动态的影响,通过2013-2015年的大田试验,在3个施氮水平($90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)下,于冬小麦的播前、拔节期及开花期通过测墒补灌至土壤相对含水量为田间持水量的75%,以全生育期0灌溉及漫灌作为对照,分析了滴灌对冬小麦耗水量、水分利用效率、产量及灌浆特性的影响.结果表明:在滴灌条件下,田间耗水量随滴灌次数的增加而增加,而土壤贮水和降水占总耗水量的比例显著下降,灌溉水所占比例明显提高.施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,滴灌底墒水、拔节水和开花水的籽粒产量最大,达到 $10109.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,WUE和IUE分别比漫灌显著提高50.52%和68.01%.在整个灌浆过程中,强势粒的灌浆速率均明显高于弱势粒,灌浆参数随施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势,测墒滴灌能有效增加冬小麦的终极生长量,并且提高平均灌浆速率,提升灌浆能力.综合看来,施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,测墒滴灌底墒水、拔节水和开花水的产量和水分利用率较高,籽粒的灌浆能力较强.

关键词:滴灌;冬小麦;水分利用效率;灌浆动态;产量

中图分类号:S512.1; S311

文献标志码:A

小麦是我国主要的粮食作物.作为我国冬小麦的主产区,华北平原地区约70%的降雨量集中在6-8月,小麦全生育期降雨量不足200 mm,仅占冬小麦耗水量的25%~30%^[1-2].因此,补充灌溉为该地区的主要灌溉模式^[3].近年来,水资源日益短缺,滴灌作为高效节水的农田灌溉方式,在新疆地区春小麦的节水高产研究中逐渐得到推广^[4-6],结果表明在干旱地区适宜的滴灌量能够保持土壤水分充足,提高春小麦群体光合速率、水分利用效率,并显著增加春小麦的产量^[7-8].目前,华北平原地区的冬小麦滴灌研究仍处于初级阶段,在该地区推广滴灌技术,有助于缓解农业水资源的压力,实现冬小麦生产的高效节水.

作物对适度的水分胁迫有一定的适应性,在小麦早期适度水分亏缺会改善群体结构,有利于增产,并提高水分利用效率^[9].华北平原冬小麦主推拔节期和开花期灌水,以达到节水高产栽培的目的^[10].拔节期和开花期灌水能显著提高土壤的贮水能力,尤其能加强对深层土壤水分的利用,对小麦产量、水分利用效率的提高至关重要^[11].测墒补灌能依据作物不同生长时期的耗水特性,通过测定不同土层质量含水量,计算出达到该土层目标含水量的补灌水量进行灌溉^[12],从而以最少的灌水量满足作物的生长需要.有研究表明,拔节期和开花期土壤灌溉至田间持水量的75%时,有益于小麦后期干物质转移,获得较高的籽粒产量^[13].

氮肥作为小麦高产的重要调控因素,与水分之间存在耦合作用.在小麦的生长过程中,适宜的水分、氮肥投入,能够促进水分和氮素的高效利用^[14].研究表明,增加施氮量可补偿由灌水不足导致的籽粒产量降低,但氮肥的过量使用,不利于花后干物质向籽粒的转移,最终造成产量的降低^[15].在小麦生长后期,适当的施氮量能维持植株较高的氮素水平,有利于提高小麦的光合效率并延缓叶片衰老^[16],促进小麦的灌浆进程,影响籽粒灌浆参数^[17],提高小麦产量和品质^[18].

目前通过测定土壤含水量,进行测墒滴灌条件下的冬小麦水分利用效率及籽粒灌浆动态的研究报道较少.本试验在冬小麦的拔节期、开花期测定0~100 cm土壤含水量,通过测墒滴灌至田间持水量的75%,研究

收稿日期:2016-10-20;修回日期:2016-12-20.

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划“粮食丰产科技工程”项目课题(2013BAD07B07;2013BAD07B14);河南省重点科技攻关项目河南省重点科技攻关计划项目(142102110056).

作者简介:张黛静(1974-),女,河南新乡人,河南师范大学副教授,博士,主要从事小麦栽培生理研究,E-mail:zdjdoi@163.com.

通信作者:李春喜(1964-),男,河南新乡人,河南师范大学教授,博士,从事小麦栽培生理研究,E-mail:13703731637@sina.com.

冬小麦水分利用效率及灌浆动态对不同氮肥水平的响应, 以为小麦节水高产高效的栽培技术提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2013-2014年和2014-2015年在河南师范大学小麦试验田(35°19'N, 113°54'E)进行, 该地区属于暖温带大陆性季风气候, 2013-2014、2014-2015年冬小麦生育期内降水量分别为132.80、146.60 mm. 土壤质地为中壤土, 土壤容重 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 供试土壤的田间持水量为重量含水量的24%, 土壤pH值约为7.6, 试验田播前土壤基本养分情况见表1.

表1 供试土壤基础肥力

年份	试验区	有机质质量分数/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮质量分数/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷质量分数/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效氮质量分数/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2013-2014	低肥区	16.30	1.21	1.26	28.82
	中肥区	16.13	1.40	1.51	26.60
	高肥区	20.51	1.58	1.47	26.95
	CK	17.23	1.44	1.53	26.50
2014-2015	低肥区	13.81	1.66	1.45	28.47
	中肥区	13.71	1.61	1.30	23.32
	高肥区	17.38	1.71	1.37	28.55

1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 氮肥作为主区, 副区为滴灌处理. 2013-2014小麦生育年间播前共设置3个施氮水平(以纯氮计): (1) $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (低肥, D); (2) $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (中肥, Z); (3) $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (高肥, G), 拔节期均追施纯氮 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2014-2015小麦生育年间施氮设置为: (1) $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (D); (2) $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Z); (3) $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (G), 拔节期分别追施纯氮 0 、 90 、 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 两生育年内中肥区域总施氮均为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 每个施氮水平下, 以达到土壤相对含水量为田间持水量的75%为目标计算补灌量, 共设置4个滴灌处理: 底墒水(W0)、底墒水+拔节水(W1)、底墒水+开花水(W2)、底墒水+拔节水+开花水(W3), 对照为大水漫灌底墒水+拔节水+开花水(CK), 2014-2015年播前、拔节期测土壤相对含水量已达到田间持水量的75%, 未进行灌溉, 各处理灌水量如表2所示. 小区面积为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 共设置三个重复, 小区间设2m的隔水带防止侧渗, 采用滴灌装置进行灌水, 滴灌毛管间距75 cm(放置小麦行间), 漫灌采用常规管带灌溉.

播前底施 P_2O_5 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 供试品种为半冬性周麦22, 分别于2013年10月18日和2014年10月22日人工播种, 基本苗 $150 \times 10^4 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 行间距25 cm, 按照高产田进行常规田间管理, 2014年5月26日和2015年5月31日收获.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水量的计算

于小麦播前、越冬期、拔节期、开花期、灌浆期及收获后, 在小麦行间, 取0~100 cm土层的土壤, 每20 cm为一层装入铝盒, 称鲜质量, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重并称土壤干质量, 去掉铝盒中的干土, 称铝盒净质量, 并按下列供试计算土壤含水质量分数、土壤贮水量, 每个处理重复3次.

$$W_m = (m_i - m_s) / (m_s - m_a).$$

$$W_s = 0.1 \times W_m \times v \times h.$$

式中: W_m 为土壤的含水质量分数; m_i 为土壤鲜质量; m_s 为土壤干质量; m_a 为铝盒净质量; W_s 为土壤的贮水量; v 为土壤容质量分数; h 为土层深度.

1.3.2 水分利用效率的计算

$$E_T = P + I + \Delta W + K.$$

$$W_{UE} = Y/E_{ta}$$

$$I_{UE} = Y/I$$

$$P_{UE} = Y/P$$

式中: E_T 为阶段耗水量; P 为阶段降水量; I 为阶段灌水量; ΔW 为阶段土壤贮水变化量; K 为阶段地下水补给量,因试验区域地下水位超过 2.5 m, K 值忽略不计; W_{UE} 为产量水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); Y 为作物单位面积籽粒产量; E_{ta} 为全生育期耗水量; I_{UE} 为灌溉水利用率; Y 为籽粒产量; P_{UE} 降水利用效率.

表 2 冬小麦生育阶段不同水氮处理灌水量

年 份	处 理	底墒水量/mm	拔节水量/mm	开花水量/mm	总灌水量/mm
2013 - 2014	DW0	101.22	0.00	0.00	101.22
	DW1	101.22	54.44	0.00	155.66
	DW2	101.22	0.00	33.48	134.70
	DW3	101.22	54.44	13.68	169.34
	ZW0	101.68	0.00	0.00	101.68
	ZW1	101.68	71.12	0.00	172.80
	ZW2	101.68	0.00	22.35	124.03
	ZW3	101.68	71.12	10.76	183.56
	GW0	115.65	0.00	0.00	115.65
	GW1	115.65	56.35	0.00	172.00
	GW2	115.65	0.00	36.21	151.86
	GW3	115.65	56.35	11.70	183.70
	CK	132.50	115.00	77.51	325.01
	2014 - 2015	DW0	-	-	0.00
DW1		-	-	16.81	16.81
DCK		-	-	16.81	16.81
ZW0		-	-	0.00	0.00
ZW1		-	-	41.84	41.84
ZCK		-	-	41.84	41.84
GW0		-	-	0.00	0.00
GW1		-	-	53.44	53.44
GCK		-	-	53.44	53.44

1.3.3 灌浆动态的测定

小麦开花日选择生长整齐一致的植株单茎挂牌标记,于花后 6、13、21、28、35 d 取穗部强势粒(穗基部向上第 5~12 小穗的第 1、2 位籽粒)和弱势粒(穗基部向上第 5~12 小穗的第 3、4 位籽粒)各 100 粒,共 3 个重复,105 °C 杀青 30 min,85 °C 烘干至恒重,称重.参照朱庆森等^[19]和顾世梁等^[20]的方法,用 Richards 方程对籽粒灌浆动态进行拟合,并计算相关灌浆参数.

1.3.4 产量测定

成熟期从各小区选取 1 m 双行,单独收割,晾晒,脱粒,称重,计算籽粒产量.另外随机选取 30 杆单茎完整的植株考种.

1.4 数据统计与分析

使用 Excel 2010 对试验数据处理分析与作图,并用 SPSS 19.0 和 Duncan 多重比较法对试验数据进行统计分析,用 CVXPT-32 软件模拟灌浆过程,得出灌浆参数.

2 结果分析

2.1 测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦不同生育阶段耗水量的影响

由表3可知,两个生长季的数据均表明,小麦从播种-越冬期阶段耗水量最小,随着施氮量的增加耗水量逐渐增强,且差异显著($P < 0.05$).越冬-拔节期低肥区耗水量最大,并显著高于中肥、高肥区($P < 0.05$).拔节-开花期,2013-2014年度,漫灌(CK)耗水量最高,比ZW3增加58.12%,显著高于各滴灌处理($P < 0.05$).开花-成熟期,同一氮肥水平下,两年度耗水量均表现出W0低于其他处理.冬小麦整个生育期随补灌水的减少耗水量逐渐减少,各处理耗水量高峰期在冬小麦拔节期和开花期,且各滴灌处理的耗水量显著低于其他处理,说明滴灌能有效降低耗水量、减少土壤水分的无效蒸发及深层渗透.

表3 不同水氮处理冬小麦生育阶段耗水量特征

年份	处理	阶段耗水量/mm				总耗水量/mm
		播种-越冬	越冬-拔节	拔节-开花	开花-成熟	
2013-2014	DW0	22.71 ± 2.56d	97.43 ± 2.56b	47.89 ± 9.93e	36.70 ± 6.36g	204.72 ± 2.79j
	DW1	22.71 ± 2.56d	97.43 ± 2.56b	83.15 ± 7.47d	69.30 ± 4.61e	272.59 ± 1.76ef
	DW2	22.71 ± 2.56d	97.43 ± 2.56b	54.85 ± 2.20e	82.95 ± 2.80cd	257.93 ± 3.40fg
	DW3	22.71 ± 2.56d	97.43 ± 2.56b	82.26 ± 6.82d	93.33 ± 6.12b	295.72 ± 5.42de
	ZW0	33.71 ± 6.25c	97.56 ± 6.25b	32.91 ± 2.68f	49.16 ± 1.61f	216.34 ± 0.54ij
	ZW1	33.71 ± 6.25c	97.56 ± 6.25b	97.25 ± 5.91c	63.65 ± 3.98e	295.17 ± 2.04de
	ZW2	33.71 ± 6.25c	97.56 ± 6.25b	50.59 ± 5.07e	66.06 ± 4.62e	250.91 ± 4.18gh
	ZW3	33.71 ± 6.25c	97.56 ± 6.25b	113.18 ± 4.03b	73.50 ± 5.35de	320.95 ± 6.66bc
	GW0	52.42 ± 7.00b	92.48 ± 7.00b	51.66 ± 2.70de	40.96 ± 2.36fg	237.53 ± 2.01hi
	GW1	52.42 ± 7.00b	92.48 ± 7.00b	75.83 ± 1.69d	86.86 ± 2.05bc	307.59 ± 2.41cd
	GW2	52.42 ± 7.00b	92.48 ± 7.00b	54.65 ± 4.44e	94.41 ± 3.11b	293.96 ± 1.77de
	GW3	52.42 ± 7.00b	92.48 ± 7.00b	78.32 ± 2.70d	108.37 ± 4.25a	331.58 ± 5.80ab
	CK	64.92 ± 5.34a	105.58 ± 4.47a	178.96 ± 3.58a	132.17 ± 2.79a	481.63 ± 3.76a
2014-2015	DW0	4.68 ± 0.56c	95.62 ± 4.53a	18.99 ± 1.45c	79.21 ± 2.50i	198.50 ± 1.94d
	DW1	4.68 ± 0.56c	95.62 ± 4.53a	18.99 ± 1.45c	123.16 ± 4.07d	242.45 ± 3.02cd
	DCK	4.68 ± 0.56c	95.62 ± 4.53a	18.99 ± 1.45c	98.51 ± 4.91f	217.80 ± 4.14d
	ZW0	21.02 ± 1.90b	79.68 ± 3.11c	40.51 ± 4.90a	83.41 ± 5.24g	224.78 ± 4.06cd
	ZW1	21.02 ± 1.90b	79.68 ± 3.11c	40.51 ± 4.90a	117.63 ± 3.60e	259.00 ± 6.45bc
	ZCK	21.02 ± 1.90b	79.68 ± 3.11c	40.51 ± 4.90a	147.55 ± 4.15b	288.92 ± 5.12ab
	GW0	25.40 ± 3.54a	86.41 ± 3.01b	37.29 ± 3.53b	80.92 ± 3.30h	229.99 ± 5.34cd
	GW1	25.40 ± 3.54a	86.41 ± 3.01b	37.29 ± 3.53b	128.12 ± 4.85c	277.19 ± 2.59ab
	GCK	25.40 ± 3.54a	86.41 ± 3.01b	37.29 ± 3.53b	149.17 ± 4.57a	298.23 ± 4.50a

注:各列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同.

2.2 测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦产量和水分利用效率的影响

由表4可知,随着施氮量的增加,产量呈先增加后降低的趋势.2013-2014年度以ZW3处理的产量最高,为10109.79 kg·hm⁻²,同一氮素水平下,不同滴灌处理的产量表现为W3 > W2 > W1 > W0,差异达到显著水平($P < 0.05$);2014-2015年度,以ZW1滴灌处理的产量最高,为9519.76 kg·hm⁻²,相同氮素水平下,产量均呈现W1 > W0 > CK,且差异达到显著水平($P < 0.05$).

2013-2014年小麦生长季,不同氮肥调控下的各滴灌处理WUE和IUE均较漫灌(CK)显著提高($P < 0.05$).ZW2处理WUE和IUE最大,分别比漫灌(CK)提高83.12%、136.51%,差异显著($P < 0.05$).ZW3处理WUE和IUE比漫灌(CK)分别提高50.52%、68.01%.ZW3处理的WUE较ZW2降低17.80%,产量显著

提高 5.14%。2014 - 2015 年小麦生长季,滴灌(W1)处理在不同氮肥调控下的产量均高于漫灌(CK)处理,且 WUE 和 IUE 均比 CK 高。ZW1 的产量比 ZW0 增加 55.86%,且 WUE 提升 73.9%,差异显著($P < 0.05$)。

表 4 不同水氮处理下冬小麦的水分利用效率

年份	处理	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌溉水量/ mm	灌溉水利用率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	降水量/ mm	降水利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
2013 - 2014	DW0	6553.94 ± 40l	101.22	64.75 ± 0.68e	132.8	49.35 ± 0.25j	32.01 ± 0.20cd
	DW1	8709.95 ± 90.19i	155.66	55.95 ± 0.77g	132.8	65.59 ± 0.55g	31.95 ± 0.33cd
	DW2	8826.41 ± 100h	134.71	65.52 ± 0.44e	132.8	66.46 ± 0.61f	34.22 ± 0.39b
	DW3	9060.06 ± 80.83g	169.34	53.50 ± 0.50h	132.8	68.22 ± 0.50e	30.64 ± 0.27def
	ZW0	7531.30 ± 80.83j	101.68	74.40 ± 0.52b	132.8	56.71 ± 0.50h	34.81 ± 0.37b
	ZW1	9519.29 ± 32.15e	172.80	55.23 ± 0.20g	132.8	71.68 ± 0.20c	32.25 ± 0.11c
	ZW2	9615.81 ± 41.96c	124.03	77.81 ± 0.46a	132.8	72.41 ± 0.26c	38.32 ± 0.17a
	ZW3	10 109.79 ± 20.82a	183.57	55.21 ± 1.00g	132.8	76.13 ± 0.13a	31.50 ± 0.06cde
	GW0	7400.37 ± 5.51k	115.65	73.11 ± 0.69c	132.8	55.73 ± 0.04i	31.16 ± 0.02cdef
	GW1	9200.26 ± 21.52f	172.00	58.39 ± 0.44f	132.8	69.28 ± 0.13d	29.91 ± 0.07f
	GW2	9551.71 ± 45.09d	151.85	69.50 ± 1.00 d	132.8	71.93 ± 0.28c	32.49 ± 0.15c
	GW3	9992.13 ± 90.19b	183.71	59.03 ± 0.31f	132.8	75.24 ± 0.55b	30.13 ± 0.27ef
CK	10 079.56 ± 37.86b	307.50	32.78 ± 0.12i	132.8	75.90 ± 0.23ab	20.93 ± 0.08g	
2014 - 2015	DW0	8634.32 ± 55.71c	0.00	-	146.60	58.90 ± 0.38c	43.50 ± 0.28a
	DW1	9134.57 ± 69.50b	16.81	543.45 ± 4.14a	146.60	62.31 ± 0.47b	37.68 ± 0.29c
	DCK	8204.10 ± 77.01e	16.81	488.10 ± 4.58b	146.60	55.96 ± 0.53e	37.67 ± 0.35c
	ZW0	8729.36 ± 95.44c	0.00	-	146.60	59.55 ± 0.65c	38.86 ± 0.42b
	ZW1	9519.76 ± 55.71a	41.84	227.53 ± 1.33c	146.60	64.94 ± 0.38a	36.78 ± 0.22d
	ZCK	6108.05 ± 63.87g	41.84	145.99 ± 1.53e	146.60	41.66 ± 0.44g	21.15 ± 0.22g
	GW0	6688.34 ± 82.65f	0.00	-	146.60	45.62 ± 0.56f	29.08 ± 0.36f
	GW1	8454.23 ± 42.74d	53.44	158.21 ± 0.8d	146.60	57.67 ± 0.29d	30.50 ± 0.15e
GCK	5912.96 ± 55.03h	53.44	110.65 ± 1.03f	146.60	40.33 ± 0.38h	19.82 ± 0.18h	

2.3 测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦籽粒灌浆特征的影响

2.3.1 籽粒灌浆参数

采用 Richards 方程对小麦强势粒、弱势粒的百粒重与花后天数的关系进行拟合,得出如表 5 所示的灌浆参数。从表 5 中可知, R^2 均在 0.99 以上,拟合度好。两年数据显示,终极生长量(A)随着施氮量的增加基本呈先增后减趋势。2013 - 2014 生长季,同一氮肥调控下,W2 处理的最大灌浆速率(V_{\max})和平均灌浆速率(V_{mean})均高于 W3 处理。2014 - 2015 生长季,强势粒的 A、灌浆速率最大时的生长量(W_{\max})、 V_{\max} 及 V_{mean} 均高于弱势粒。对于高肥处理,滴灌(W1)条件下强势粒的活跃生长期(D)比漫灌(CK)延长 4.34 d。在低肥、中肥氮肥水平下,W1 处理的 V_{mean} 相比 CK 处理分别高出 3.07%、27.18%,并且 W1 处理的 V_{\max} 、 W_{\max} 均高于其他灌溉方式。同一氮肥调控下,W1 处理下的强势粒、弱势粒的终极生长量(A)高于 CK 处理,说明滴灌处理下小麦的灌浆能力较高,优于漫灌处理。

2.3.2 灌浆动态

2013 - 2014 年冬小麦的粒重变化如图 1 中左图所示,不同处理籽粒千粒质量在开花后缓慢增加,开花后 13 ~ 25 d 千粒质量迅速增加,花后 25 d 之后增加又趋于缓慢。其中 ZW2 千粒质量最大,为 55.53 g,比 ZW0, ZW1, ZW3 的千粒质量分别增加了 4.17、5.29、8.80 g,方差分析表明,ZW2 与 ZW0, ZW1, ZW3 几个处理间千粒质量差异达显著水平($P < 0.05$)。在低肥区和高肥区分别表现为 DW2 和 GW2 千粒重最大。

2014 - 2015 年冬小麦生长季,滴灌和氮肥调控下冬小麦花后 0 ~ 34 d 强势粒、弱势粒粒质量的动态变化

如图1右图所示.随着籽粒灌浆的进行,小麦强势籽粒和弱势籽粒的粒重均逐步增加.不同处理条件下,灌浆前期粒重均增长缓慢,在花后13~27 d粒重出现一个快速增加期,花后27 d之后粒重的增加又趋于缓慢,花后粒重呈现出“慢-快-慢”的增长趋势.ZW1处理的强势粒在灌浆34 d时百粒重达6.11 g,分别比DW1、GW1处理高2.84%、3.10%.同一氮肥调控下,W1、CK处理的强弱势粒粒重均高于W0处理,说明在开花期补灌水能够延缓植株的衰老,有利于营养物质向籽粒的转移积累.

表5 不同水氮处理下冬小麦灌浆参数

年份	处理	粒位	参数								
			R^2	A	B	k	N	D/d	$W_{max}/$ ($g \cdot 100$ kernel $^{-1}$)	$V_{max}/$ ($g \cdot 100$ kernel $^{-1} \cdot d^{-1}$)	$V_{mean}/$ ($g \cdot 100$ kernel $^{-1} \cdot d^{-1}$)
2013-2014	DW0	W	0.998 69	5.70	1.92	0.15	0.61	35.14	2.61	0.24	0.16
	DW1	W	0.993 81	5.27	3.18	0.18	0.89	31.43	2.58	0.25	0.17
	DW2	W	0.997 47	5.39	5.76	0.27	1.79	28.26	3.04	0.29	0.19
	DW3	W	0.998 17	4.94	8.94	0.40	2.79	23.88	3.07	0.32	0.21
	ZW0	W	0.994 73	6.23	0.40	0.11	0.23	41.78	2.53	0.22	0.15
	ZW1	W	0.999 12	5.03	17.30	0.67	6.56	25.61	3.70	0.33	0.20
	ZW2	W	0.999 20	5.70	6.35	0.28	2.25	30.58	3.38	0.29	0.19
	ZW3	W	0.998 72	4.67	6.50	0.26	3.20	40.01	2.98	0.18	0.12
	GW0	W	0.997 27	4.68	0.26	0.53	4.60	24.86	3.22	0.30	0.19
	GW1	W	0.997 67	5.23	7.45	0.30	2.56	30.06	3.19	0.27	0.17
	GW2	W	0.998 99	5.85	4.08	0.20	1.22	32.45	3.04	0.27	0.18
	GW3	W	0.996 13	4.05	14.55	0.67	5.17	21.30	2.85	0.31	0.19
2014-2015	DW0	S	0.996 72	5.84	6.39	0.30	2.43	29.96	3.52	0.30	0.19
		I	0.997 45	5.47	3.48	0.19	1.03	31.53	2.75	0.26	0.17
	DW1	S	0.997 26	6.01	8.13	0.34	3.14	30.14	3.82	0.31	0.20
		I	0.998 41	5.07	20.58	0.83	7.65	23.37	3.82	0.37	0.22
	DCK	S	0.998 51	5.99	6.43	0.29	2.41	30.94	3.60	0.30	0.19
		I	0.998 49	5.68	5.53	0.24	1.85	32.69	3.22	0.26	0.17
	ZW0	S	0.999 73	6.53	1.34	0.13	0.47	38.14	2.88	0.25	0.17
		I	0.998 47	5.86	0.53	0.12	0.23	37.85	2.39	0.23	0.15
	ZW1	S	0.999 80	6.24	8.18	0.32	2.68	28.95	3.84	0.34	0.22
		I	0.999 93	5.59	5.20	0.21	1.51	32.67	3.04	0.26	0.17
	ZCK	S	0.999 89	6.23	2.92	0.16	0.86	36.73	3.03	0.25	0.17
		I	0.999 99	5.43	4.12	0.20	1.04	30.91	2.74	0.26	0.18
	GW0	S	0.999 77	5.66	8.79	0.38	3.36	28.34	3.65	0.32	0.20
		I	0.999 53	4.87	9.67	0.43	3.28	24.79	3.13	0.31	0.20
	GW1	S	0.999 94	6.49	2.43	0.15	0.70	35.49	3.05	0.27	0.18
		I	0.999 78	6.01	1.22	0.12	0.33	38.37	2.53	0.23	0.16
	GCK	S	0.997 71	6.10	7.10	0.29	2.57	31.15	3.72	0.31	0.20
		I	0.997 64	5.35	12.43	0.48	4.05	25.24	3.59	0.34	0.21

注:W:全穗粒;S:强势粒;I:弱势粒; R^2 :相关系数;A:终极生长量;B:初级参数;k:生长速率参数;N:形状参数;D:活跃生长期; W_{max} :灌浆速率最大时的生长量; V_{max} :最大灌浆速率; V_{mean} :平均灌浆速率.

图2表示不同处理条件下冬小麦灌浆速率的动态变化.

2013-2014年花后20~25 d时冬小麦灌浆速率达到最大,其中灌浆速率最大值出现在ZW3处理中,为

3.04 mg · 粒⁻¹ · d⁻¹. 在中肥区和高肥区,花后 0~5 d 灌浆速率差异不明显,略大于低肥区,中肥区花后 20~25 d 时,灌浆速率迅速增加,达到最大值.花后 25 d 后各个处理灌浆速率均迅速降低,这是后期植株衰老,干物质转移变慢造成的.由图 2 右图可知,不同处理在花后 20~27 d 冬小麦强、弱勢籽粒的灌浆速率均达到最大,其中强势粒灌浆速率最大值出现在 ZW1 处理,弱勢粒出现在 DW1 处理,说明开花水期补灌水对小麦的灌浆有利.

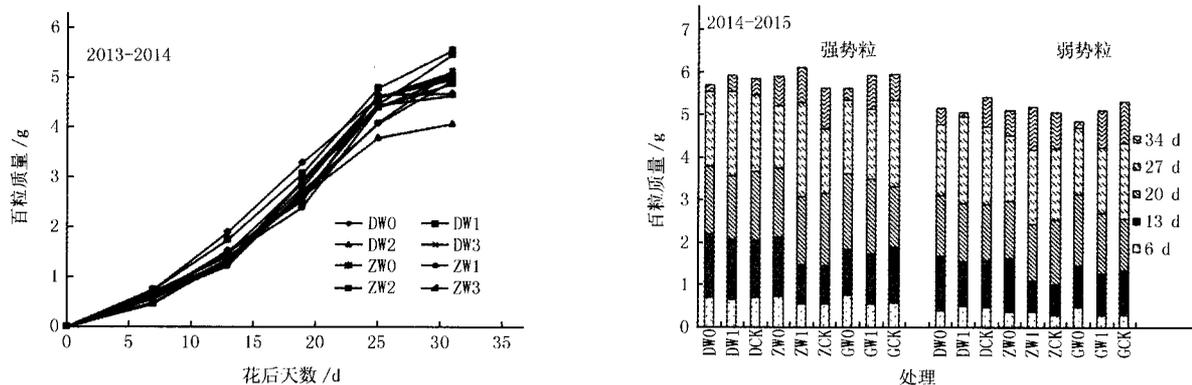


图 1 不同水氮处理条件下冬小麦籽粒灌浆动态

3 讨论

在水资源问题日益严重的华北平原地区,高效节水灌溉逐步得到重视.作为一种先进的节水灌溉技术,滴灌在小麦栽培中得到不断的推广^[21].滴灌能够将水分和养分均匀持续的运送到植株的根部,最大限度降低土壤水分渗透和农业水浪费的现象^[22].通过测墒补灌能够减少灌溉水的无效蒸腾与下渗,进一步节约灌溉用水,提高水分利用效率^[23].韩占江^[1]的研究表明,适宜的灌水量,使冬小麦在灌浆末期仍保持较高的灌浆速率和净光合速率,有利于籽粒的增重,实现了节水高产.本研究在冬小麦的拔节期和开花期,通过测定土壤相对含水量,以达到田间持水量的 75% 为目标,对不同的氮肥区域进行滴灌处理.结果表明,在 240 kg · hm⁻² 的施氮水平下,滴灌底墒水、拔节水和开花水的 WUE 和 IUE,分别比漫灌显著提高 50.52% 和 68.01%,能够减少土壤水分的无效蒸发,提高土壤保墒能力,在节约灌溉用水的基础上实现小麦的稳产.

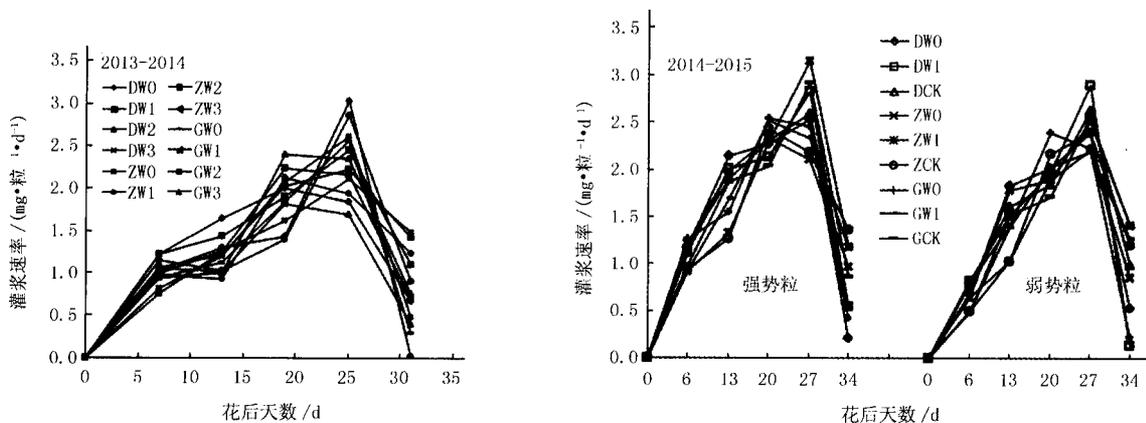


图 2 不同水氮处理条件下冬小麦籽粒灌浆速率的动态变化

段文学等^[24]的研究发现,施氮量对阶段耗水量和耗水比例有一定影响,增加施氮量后,返青-开花阶段小麦阶段耗水量和耗水比例均增大,耗水高峰前移.闫永鑫等^[25]研究拔节期水分胁迫-复水对冬小麦生理影响的结果表明,在拔节期轻度干旱胁迫可以降低冬小麦耗水量,有利于提高作物的抗旱性能,从而提高冬

小麦的水分利用效率. 在本研究中,滴灌和漫灌处理冬小麦的耗水量均在拔节期和开花期出现峰值,各滴灌处理的耗水量显著低于漫灌. 开花水降低了后期小麦对深层土壤水分的消耗,拔节水和开花水对满足小麦耗水需求起关键作用. 在滴灌条件下,田间耗水量随滴灌水次数的增加而增加,而降水占总耗水量的比例显著下降,灌溉水所占比例明显提高,与前人研究结果一致^[26].

目前的农业生产中,以过量施氮和灌溉的方式提高农作物产量的现象依然普遍,而这样不合理的栽培方式,不仅导致水氮利用效率降低,也使得农作物产量下降^[8,27]. 栗丽等^[28]的研究表明,施氮量在 $0 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,冬小麦籽粒产量和氮收获指数随施氮量增加而增加,超过 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随施氮量增加产量增幅不大. 陈静等^[29]对免耕冬小麦的研究表明,滴灌措施较常规漫灌,水分利用效率和小麦籽粒产量显著提高了57.46%和21.13%. 本研究中,施氮量在 $0 \sim 350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施氮范围内,籽粒产量先增加后略有降低,施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,滴灌底墒水、拔节水和开花水的籽粒产量最大,达到 $10\ 109.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于漫灌处理.

籽粒灌浆作为小麦产量形成的最终过程,可以将小麦的品种特性及环境条件所产生的效应集中体现出来^[30]. 本研究表明,灌浆参数随施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势,在同一氮素水平下,测墒滴灌能有效增加冬小麦的终极生长量,并且提高平均灌浆速率. 在整个灌浆过程中,强势粒的灌浆速率均明显高于弱勢粒,与徐莹等^[17]的研究结果类似. 蔡庆生^[31]、刘培等^[32]等研究表明,灌浆速率对小麦籽粒粒重的形成起决定性作用,与灌浆持续时间无显著性关系,而张凯等^[33]认为,灌浆速率与灌浆过程持续天数均与粒重呈显著正相关. 本研究中,滴灌模式下的冬小麦平均灌浆速率及最大灌浆速率在低、中氮肥区均高于漫灌处理,且最终粒重明显高于其他处理,灌浆能力得到明显提升.

4 结 论

本研究表明,在同一氮肥水平调控下,滴灌能够显著降低冬小麦对土壤贮水量的消耗比例,提高灌溉水利用率和水分利用率;测墒滴灌处理下,适宜的施氮量在小麦生长后期能延缓叶片衰老,延迟灌浆时间,提高冬小麦的籽粒灌浆能力,籽粒充实饱满以保证高产. 综合来看,施氮量在 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,滴灌底墒水、拔节水和开花水处理的产量最高,达到 $10\ 109.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,水分利用率和灌溉水利用率也提高50.52%~68.01%,达到了节水高产的目的.

参 考 文 献

- [1] 韩占江,于振文,王东,等. 测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2010,36(3):457-465.
- [2] Derbala A, Sourell H, Evcim U, et al. Development and evaluation of mobile drip irrigation with center pivot machine[C]//Proceedings 8th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture. Turkey: Faculty of Agriculture, 2002:290-296.
- [3] FANG Quanzhao, Ma L, Green T R, et al. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1102-1116.
- [4] 蒋桂英,魏建军,刘萍,等. 滴灌春小麦生长发育与水分利用效率的研究[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(6):50-54.
- [5] WANG Jiandong, GONG Shihong, XU Di, et al. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain [J]. Irrigation Science, 2013, 31: 1025-1037.
- [6] 聂紫瑾,陈源泉,张建设,等. 黑龙江流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J]. 作物学报,2013,39(9):1687-1692.
- [7] 王冀川,高山,徐雅丽,等. 不同滴灌量对南疆春小麦光合特征和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4):42-48.
- [8] 张涛,马富裕,郑重,等. 滴灌条件下水氮耦合对春小麦光合特性及产量的影响[J]. 西北农业学报,2010(6):69-73.
- [9] 张永平,王志敏,王璞,等. 冬小麦节水高产栽培群体光合特征[J]. 中国农业科学,2003,36(10):1143-1149.
- [10] LI Quanqi, DONG Baodi, QIAO Yunzhou, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1676-1682.
- [11] MA Shouchen, LI Fengming, YANG Shenjiao, et al. Effects of root pruning on non-hydraulic root-sourced signal, drought tolerance and water use efficiency of winter wheat [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(6): 989-998.
- [12] WANG Dong, YU Zhenwen, White P J. The effect of supplemental irrigation after jointing on leaf senescence and grain filling in wheat [J]. Field Crops Research, 2013, 151: 35-44.
- [13] 刘月兰,于振文,张永丽,等. 拔节期和开花期不同土层深度测墒补灌对北方小麦旗叶叶绿体超微结构和荧光特性的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(14):2751-2761.

- [14] 高亚军,郑险峰,李世清,等. 农田秸秆覆盖条件下冬小麦增产的水氮条件[J]. 农业工程学报,2008,24(1):55-59.
- [15] 王小燕,郑成岩,于振文,等. 水氮互作对小麦土壤水分利用和茎中果聚糖含量的影响[J]. 应用生态学报,2009(8):1876-1882.
- [16] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京:中国农业出版社,1996:547-548.
- [17] 孟兆江,孙景生,段爱旺,等. 调亏灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆特征及其模拟模型[J]. 农业工程学报,2010,26(1):18-23.
- [18] 张英华,张琪,徐学欣,等. 适宜微喷灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报,2016,32(5):88-95.
- [19] 朱庆森,曹显祖,骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析[J]. 作物学报,1988,14(3):182-193.
- [20] 顾世梁,朱庆森,杨建昌,等. 不同水稻材料籽粒灌浆特性的分析[J]. 作物学报,2001,27(1):7-14.
- [21] 张娜,张永强,唐江华,等. 滴灌带配置方式对冬小麦生长及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(6):1197-1201.
- [22] Skaggs T H, Trout T J, Rothfuss Y. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6):1886-1896.
- [23] Olga S Walsh, Klatt A R, Solie J B, et al. Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Precision Agriculture, 2013, 14(3):343-356.
- [24] 段文学,于振文,张永丽,等. 施氮量对旱地小麦耗水特性和产量的影响[J]. 作物学报,2012,38(9):1657-1664.
- [25] 闫永奎,郝卫平,梅旭荣,等. 拔节期水分胁迫-复水对冬小麦干物质积累和水分利用率的影响[J]. 中国农业气象,2011,32(2):190-195.
- [26] 薛丽华,胡锐,赛力汗,等. 滴灌量对冬小麦耗水特性和干物质积累分配的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(1):78-83.
- [27] 刘世全,曹红霞,张建青,等. 不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(7):1362-1371.
- [28] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(5):1367-1373.
- [29] 陈静,王迎春,李虎,等. 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(10):1966-1975.
- [30] 张娜,张永强,仵妮平,等. 滴灌量对冬小麦籽粒灌浆特性的影响研究[J]. 水土保持研究,2015,22(5):271-275.
- [31] 蔡庆生,吴兆苏. 小麦籽粒生长各阶段干物质积累量与粒重的关系[J]. 南京农业大学学报,1993,16(1):27-32.
- [32] 刘培,蔡焕杰,王健. 土壤水分胁迫下冬小麦籽粒灌浆特性的研究[J]. 节水灌溉,2010,(1):1-4.
- [33] 张凯,任健,全胜利,等. 土壤水分调控对冬小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. 麦类作物学报,2006,26(5):122-125.

Effect of Drip Irrigation and Nitrogen Regulation on WUE and Grain Filling of Winter Wheat Based on Soil Moisture Measurement

Zhang Daijing, Yang Doudou, Ma Jianhui, Wang Duoduo, Zhang Yanyan, Guo Xueni, Li Chunxi

(College of life science, Henan Normal University, Xixiang 453000, China)

Abstract: This study aimed to determine a reasonable irrigation scheduling for high yield and water use efficiency (WUE) of winter wheat. A field experiment was carried out with the cultivar of Zhoumai 22 in the Northern Henan province during 2013–2015. Two-factor split plot design was arranged with three replications. The main plots were subjected to the nitrogen regimes, which were applied at three levels: 90 kg·hm⁻²(D), 240 kg·hm⁻²(Z), and 350 kg·hm⁻²(G). The subplots consisted of four drip irrigation treatments: drip irrigation at sowing stage (W0), drip irrigation at sowing and jointing stage (W1); drip irrigation at sowing and anthesis stage (W2); drip irrigation at sowing, jointing and anthesis stage (W3). Surface irrigation at sowing, jointing and anthesis stage (CK) under the nitrogen application 240 kg·hm⁻² were used as the control group. The target relatively soil moisture content was controlled as 75% after measuring 0–100 cm soil moisture. The results showed; Drip irrigation and fertilization treatments significantly hewe effects on the water requirement regularity of winter wheat. The water consumption of drip irrigation was significantly lower than that of CK. The water consumption increased with irrigation times under drip irrigation, and the proportion of soil water storage and precipitation in total water consumption reduced significantly, whereas the proportion of irrigation water obviously increased. The yield increased first then declined with the increased of N application. The yield reached peak of 10 109.79 kg·hm⁻² with 240 kg·hm⁻² N application and W3, and the WUE and IUE significantly increased by 50.52% and 68.01% respectively compared with CK. The WUE and IUE reached peak with 240 kg·hm⁻² N application and W2, significantly increased by 83.12% and 136.51% respectively compared with CK, but the yield was slightly lower than that of CK. The filling rate of superior grains was obviously higher than that of inferior grains, and the grain filling parameters firstly increased, then decreased with the increase of nitrogen-application. Comprehensively, drip irrigation at sowing, jointing and anthesis stage based on soil moisture measurement at N application rate of 240 kg·hm⁻² realized high yield, high WUE, and high grain-filling capacity.

Keywords: drip irrigation; winter wheat; water use efficiency; grain filling; yield