

拔节期水氮处理对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响

张笑培^{1,2}, 王和洲^{1,2}, 周新国^{1,2*}, 杨慎骄^{1,2}, 陈金平^{1,2}, 刘安能^{1,2}

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002;

2. 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 河南 商丘 476000)

摘要:【目的】探索黄淮地区冬小麦适宜水氮管理模式。【方法】通过田间小区试验,研究了不同灌水量(90 mm (W1)、60 mm (W2)、0 mm (W3))和施氮量(300 kg/hm² (N1)、225 kg/hm² (N2)、150 kg/hm² (N3))对冬小麦耗水特性、产量和水分利用效率的影响。【结果】灌水量从0增加到90 mm,冬小麦耗水量增加了67~106 mm,降水和土壤供水占耗水量的比例降低;随施氮量增加,冬小麦耗水量和土壤供水占耗水量的比例增加,降水所占比例降低。相同灌水条件下,灌水量和降水量占总耗水量比例随施氮量增加而降低;施氮量从150 kg/hm²增加到300 kg/hm²,土壤贮水量消耗占总耗水量的比例从1.6%~4.9%增加到8.3%~9.9%。拔节期灌水、追施氮肥提高了拔节—开花期、开花—成熟期阶段耗水量和平均日耗水强度;与W3N3处理相比,随灌水和施氮量的增加,拔节—成熟期的耗水量增加了7.4%~63.5%;增加灌水量降低了冬小麦水分利用效率、土壤水利用效率和灌溉水利用效率,提高了降水利用效率。在W1条件下,N1、N2处理的水分利用效率、降水利用效率和灌溉水利用效率分别比N3提高了18.18%~22.98%、24.66%~26.32%和24.68%~26.32%;在W2、W3条件下,水分利用效率、降水利用效率、灌溉水利用效率随施氮量的增加逐渐增加,土壤水利用效率随着施氮量增加逐渐减小。【结论】在试验条件下,综合考虑籽粒产量和水分利用效率,拔节期灌水90 mm、施氮225 kg/hm²和拔节期灌水60 mm、施氮300 kg/hm²为产量和水分利用效率兼优的灌溉施肥组合。

关键词: 冬小麦; 灌水; 氮肥; 水分利用效率

中图分类号:S152.7

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180278

张笑培,王和洲,周新国,等. 拔节期水氮处理对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12):19-26.

0 引言

黄淮海麦区适宜的光热资源为冬小麦的优质高产提供了得天独厚的自然生态环境,其冬小麦产量占全国总产量的50%以上,目前已发展成我国最大的优质原粮生产基地。但该区域人均水资源占有量仅为474 m³,是我国水资源相对贫乏的地区之一^[1-2]。冬小麦生育期降水量仅能满足冬小麦正常生长需求的25%~40%,加之降水过程与冬小麦需水过程不同步,为了获得较高的产量必须依靠灌溉^[3-4]。生产中不科学的水肥管理虽然获得较高的产量,但水肥利用效率不高,同时还导致氮素淋洗污染地下水水质,威胁农田生态环境及地下水安全^[5-6]。因此,采取适宜的水氮管理模式对于黄淮海地区冬小麦高产稳产及农业生态环境安全具有重要的现实意义。水分和氮素是影响作物生长以及产量形成的主要因素^[7],二者的单因素效应及交互效应共同决定了作物生长状况^[8]。土壤水分状况影响冬小麦的氮素吸收、运转和利用;适当增加氮肥可以补偿土壤水分不足^[9-10],施用氮肥可以缓解土壤水分胁迫对作物造成的不良影响,增强对土壤贮水的利用能力^[11]。在土壤含水率较低时,小麦水分利用效率随着施氮量的增加呈上升趋势^[12]。但在土壤含水率过低的情况下,增加氮肥施用量会加重干旱对小麦造成的不良影响,造成产量降低^[13-14]。小麦籽粒产量随着施氮量和土壤水分的增加而提高,但是当灌水施氮超过一定的范围,籽粒增产效果下降^[14-16]。作物灌水量、灌水时间和施氮量、施氮时期如何协调才能实现水肥高效利用,一直是农业科学研究的重点,但是由于农业生产

收稿日期:2018-05-15

基金项目:中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)资助项目(FIRI2016-18);公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077)

作者简介:张笑培(1978-),女,副研究员,主要从事农业资源高效利用研究。E-mail: xiaopeihb@163.com

通信作者:周新国(1970-),男,研究员,主要从事农田排水技术研究。E-mail: frizhouxg@126.com

的区域差异使得研究结果未有统一的定论。科学合理的水氮管理模式需要综合考虑区域土壤特征、作物生育期、区域降水分布状况等综合因素^[17]。拔节期是冬小麦需水需肥的关键时期,并且在黄淮地区容易出现干旱现象^[3-4]。本研究以冬小麦为研究对象,重点研究不同水氮调控对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响,对促进黄淮麦区冬小麦优质高效绿色可持续生产具有重要的理论与现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2012年10月—2013年6月在河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站(E115°34',N34°35',海拔51 m)进行。试验区属暖温带亚湿润季风性气候,多年平均降水量和蒸发量分别为708和1 751 mm,降水主要集中在7—9月(占全年降水量的65%~75%),多年平均气温为13.9℃,无霜期为230 d。试验区土壤质地为轻黏质土质,0~100 cm土壤平均干体积质量为1.46 g/cm³,田间持水率为36.72%(体积含水率),耕层土壤有机质质量分数为9.8 g/kg,全氮质量分数为0.73 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾质量分数分别为91.8、3.46和55.2 mg/kg。试验期间地下水埋深大于3.0 m。

1.2 试验设计

冬小麦(品种为矮抗58)于2012年10月15日播种,2013年6月1日收获,播量187.5 kg/hm²,行距20 cm。前茬玉米收获后,秸秆全量还田,整地播种,磷肥和钾肥作基肥于冬小麦播种前1次性施入,氮肥(纯氮)播种前各处理统一施入150 kg/hm²,其余氮肥根据试验设计在拔节期追施。根据当地生产实际以及冬小麦需水规律和降水分布情况,冬小麦生育期内只灌拔节水,并结合灌溉进行施肥。其中灌水量设置3个水平,分别为W1(90 mm)、W2(60 mm)和W3(不灌溉);拔节期氮肥(纯氮)施用量设置3个水平,分别为N1(150 kg/hm²)、N2(75 kg/hm²)和N3(不追肥),2因素完全组合共9个处理(表1),各处理3次重复,共27个小区,小区面积为36 m²(3.6 m×10 m),相邻小区之间设置1.2 m宽的保护行。各处理播前土壤墒情和肥力处于同一水平,进入拔节期后,于2013年3月2日进行灌水施肥,灌水前按照试验设计施入氮肥(肥料为尿素,W3处理通过开小沟将氮肥施入麦田耕层土壤),施肥后立即进行灌溉,灌溉水源为地下水,利用涂塑软管将井水引入试验小区,各处理灌水量利用精度0.001 m³的水表计量。各处理灌水和施肥时间完全相同。小麦生育期划分:苗期—拔节期为播种到拔节前(包括播种一出苗、苗期、越冬期和返青期);拔节期—开花期为拔节开始到开花前(包括拔节期和孕穗期);开花期—成熟期为开花到收获(包括开花期、灌浆期和成熟期)。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤含水率

冬小麦生育期内采用烘干法分层(0~10、10~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm)测定0~100 cm土层土壤含水率,测定周期为5~7 d,灌水前后和降雨后加测。

1.3.2 收获考种、田间测产与耗水量计算

冬小麦成熟收获前,各小区随机取10株进行考种,测定株高、穗长、穗粒数、单穗质量、千粒质量、地上部干物质量等指标。

收获时各小区选取3个1 m²样方测产,以实收产量测算各处理产量。

各处理耗水量采用水量平衡公式计算,即:

$$ET_c=R+I-F+Q-S+\Delta W, \tag{1}$$

式中:ET_c为作物蒸发蒸腾量(mm);R为降水量(mm);I为灌水量(mm);F为地表径流量(mm);Q为地下水补给量(mm);S为深层渗漏量(mm);ΔW为土壤贮水量的变化量。

试验小区之间用田埂隔离,地表径流F取0;试验区地下水埋深大于3.0 m,因此,地下水补给量Q取0;田间土壤水分监测数据表明,试验期内,2013年5月26日以前,麦田60~100 cm土层土壤质量含水率一直低于饱和含水率,5月26日106 mm的降水导致农田土壤贮水量增加,雨后观测结果表明,60~100 cm土壤质

量含水率为18.13%~25.01%,低于土壤饱和含水率(0.295 1 g/g),试验期间没有产生深层渗漏,因此,深层渗漏量 S 取0。

土壤贮水量变化量计算式为:

$$\Delta W = W_i - W_{i+1} \quad (2)$$

式中: W_i 和 W_{i+1} 分别为第 i 个时段初和时段末的土壤贮水量(mm)。为方便水量平衡计算,将含水率换算为以mm为单位的土壤贮水量 W ,计算式为:

$$W = 10\theta \cdot \gamma \cdot H \quad (3)$$

式中: W 为土壤贮水量(mm); θ 为土壤质量含水率(g/g); γ 为土壤干体积质量(g/cm³); H 为土壤层次的厚度(cm)。

耗水模系数(CP)计算式^[17]为:

$$CP = ET_i / ET \times 100\% \quad (4)$$

式中: ET_i 和 ET 分别为冬小麦不同生育阶段耗水量和全生育期耗水量(mm)。

日耗水量(CD)计算式^[17]为:

$$CD = ET_i / n_i \quad (5)$$

式中: ET_i 为冬小麦不同生育阶段耗水量(mm); n_i 为相应生育阶段的历时(d)。

水分利用效率(WUE)计算式^[18]为:

$$WUE = Y / ET \quad (6)$$

式中: Y 为冬小麦籽粒产量(kg/hm²); ET 为冬小麦全生育期耗水量(mm)。

降水利用效率(WUE_p)计算式^[18]为:

$$WUE_p = Y / P \quad (7)$$

式中: Y 为冬小麦籽粒产量(kg/hm²); P 为冬小麦全生育期有效降水量(mm)。

土壤水分利用效率(WUE_s)计算式^[18]为:

$$WUE_s = Y / ET_s \quad (8)$$

式中: Y 为冬小麦籽粒产量(kg/hm²); ET_s 为冬小麦全生育期内农田土壤贮水消耗量(mm)。

灌溉水利用效率(WUE_i)计算式^[18]为:

$$WUE_i = Y / I \quad (9)$$

式中: Y 为冬小麦籽粒产量(kg/hm²); I 为冬小麦全生育期内灌溉量(mm)。

灌水效益(E)计算式^[13]为:

$$E = (Y - Y_0) / I \quad (10)$$

式中: Y 和 Y_0 分别为灌溉和不灌溉处理的冬小麦籽粒产量(kg/hm²); I 为灌溉处理冬小麦全生育期内灌溉量(mm)。

1.3.3 气象资料

通过商丘国家野外科学观测研究站的自动气象观测站连续监测试验期间的太阳辐射强度、气温、相对湿度、风速和降雨量等常规气象指标。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2010、SAS6.0软件对数据进行统计分析。采用LSD法比较差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对小麦耗水量及耗水来源构成的影响

表2给出了不同水氮处理条件下,冬小麦全生育期耗水量及耗水量来源构成。从表2可以看到,各处理冬小麦全生育期总耗水量介于287.19~413.63 mm之间,冬小麦全生育期耗水量均随着施氮量和灌水量的增加而增加。同一灌水条件下,冬小麦全生育期耗水量随着施氮量的增加呈递增趋势,以充分灌水处理为例,与拔节期不施氮的W1N3处理相比,W1N1处理和W1N2处理的耗水量分别增加了21.6和10.7 mm。与W1N3处理相比,W1N1和W1N2处理全生育期耗水量分别增加了5.52%和2.73%;与拔节期不施氮的W2N3处理相比,W2N1和W2N2处理全生育期耗水量分别增加了7.12%和5.11%;与拔节期不施氮的W3N3处理相比,W3N1和W3N2处理全生育期耗水量分别增加了7.25%和5.15%。同一施氮量条件下,冬小麦全生育

期耗水量随着灌水量的增加呈递增趋势。与不灌水的 W3N1、W3N2 和 W3N3 处理相比，W1N1、W1N2 和 W1N3 处理全生育期耗水量分别增加了 34.29%、33.35%和 36.49%，W2N1、W2N2 和 W2N3 处理全生育期耗水量分别增加了 23.24%、23.35%和 23.39%；进一步分析发现，追施氮肥的 N1、N2 处理耗水量与不追施氮肥的 N3 处理差异达到了显著水平。

表 2 不同水氮处理冬小麦耗水量

处理	总耗水量/mm	耗水来源/mm			比例/%		
		土壤贮水	降水	灌溉	土壤贮水	降水	灌溉
W1N1	413.63a	41.03a	282.6	90	9.92a	68.32h	21.76c
W1N2	402.69b	30.09bc	282.6	90	7.47e	70.18g	22.35b
W1N3	391.99c	19.39de	282.6	90	4.95g	72.09f	22.96a
W2N1	379.60d	37.00ab	282.6	60	9.75b	74.45e	15.81e
W2N2	372.49d	29.89bc	282.6	60	8.02d	75.87e	16.11e
W2N3	354.37e	11.77ef	282.6	60	3.32h	79.75d	16.93d
W3N1	308.02f	25.42cd	282.6	-	8.25c	91.75c	-
W3N2	301.97f	19.37de	282.6	-	6.41f	93.59b	-
W3N3	287.19g	4.59f	282.6	-	1.60i	98.40a	-

注 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 水平；下同。

冬小麦生育期耗水主要来源于降水、灌溉水和农田土壤贮水。图 1 给出冬小麦生长季试验区的降水量。从图 1 可以看出，冬小麦生育期内降水主要分布在开花一成熟期，占全生育期总降水量的 73.07%，苗期一拔节期、拔节期一开花期降水量分别占整个生育期降水量的 24.06%、2.87%，2013 年 3 月几乎无降水，灌水差异基本不受同期降水的影响。从表 2 可以看到，降水量占总耗水量的比例随灌水量和施氮量的增加逐渐降低，其中 W1N1 处理降水占总耗水量的比例最低，为 68.32%，W3N3 处理降水占总耗水量的比例最高，为 98.40%。灌溉水占总耗水量的比例随灌水量的增加呈递增趋势，同一灌水条件下随着施氮量的增加呈递减趋势，具体表现为：W2N1 处理<W2N2 处理<W2N3 处理<W1N1 处理<W1N2 处理<W1N3 处理，其中 W1N3 处理灌溉水占总耗水量的比例最高，为 22.96%，W2N1 处理灌溉水占总耗水量的比例最低，为 15.81%。土壤贮水消耗量及其所占比例随着灌水量和施氮量的增加呈增加趋势。表 3 给出了冬小麦播前(2012 年 10 月 12 日)和收获时(2013 年 5 月 30 日)各处理不同层次的土壤贮水量。

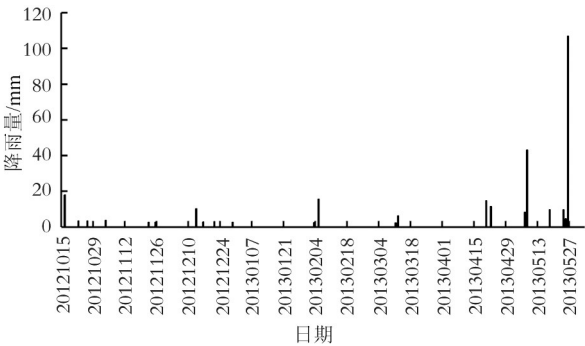


图 1 冬小麦生育期降雨量

表 3 播前和收获时不同层次土壤贮水量

		mm					
时期	处理	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
播前	W1N1	28.35ab	29.27a	60.72a	71.55a	78.19a	80.91a
	W1N2	28.68ab	2817a	59.18a	74.92a	74.80a	78.75a
	W1N3	28.85a	29.24a	60.48a	73.85a	76.85a	77.94a
	W2N1	27.72ab	28.36a	58.90a	70.91a	77.65a	81.16a
	W2N2	28.39ab	28.72a	59.48a	74.31a	76.47a	78.06a
	W2N3	28.38ab	28.18a	60.02a	72.06a	76.47a	78.67a
	W3N1	27.87ab	28.61a	60.28a	70.71a	74.85a	80.94a
	W3N2	27.85ab	28.57a	60.43a	72.32a	77.65a	80.42a
	W3N3	27.15b	28.34a	60.87a	74.94a	77.61a	77.76a
收获	W1N1	36.48a	33.83abc	61.04d	57.90e	65.41abc	53.29e
	W1N2	35.44ab	32.73bc	60.55d	70.10a	57.85f	57.74d
	W1N3	35.47ab	34.43ab	62.01c	66.06bc	61.89de	67.97b
	W2N1	33.19b	29.61d	60.51d	59.15de	60.53ef	64.71bc
	W2N2	33.73ab	32.60bc	60.21de	60.62d	63.09bcde	65.30bc
	W2N3	33.99ab	35.12a	64.99a	63.65c	66.33ab	67.94b
	W3N1	33.19b	32.18c	61.01d	65.86bc	64.24bcd	61.36cd
	W3N2	35.31ab	33.19abc	59.63e	69.33a	62.16cde	68.66b
	W3N3	35.29ab	33.16abc	63.96b	68.06ab	68.06a	73.53a

从表3可以看出,与播前土壤贮水量相比,收获时各处理0~20 cm土层的土壤贮水量均有不同程度增加,40~100 cm土层土壤贮水量均有不同程度降低。表层土壤贮水量增加是因为收获前期的5月26日强降雨引起的,深层土壤贮水量降低的主要原因是冬小麦根系吸水。就剖面土壤总贮水量而言,以W1N1处理土壤贮水消耗量最高,为41.03 mm,W3N3处理最小,为4.59 mm。就土壤贮水消耗量占总耗水量的比例而言,相同灌水量条件下均以N1处理最高,且与N2、N3处理差异达到显著水平。说明,在本试验条件下,适量增施氮肥有助于冬小麦对土壤贮水的吸收利用。

2.2 水氮对冬小麦生育阶段耗水量和特性的影响

表4给出了各处理不同生育阶段的阶段耗水量、日耗水量以及耗水模系数。从表4可以看出,W3处理冬小麦拔节期—开花期的阶段耗水量和耗水模系数均大于苗期—拔节期的,其他处理阶段耗水量、日耗水量和耗水模系数均表现为开花期—成熟期最高,苗期—拔节期最低。苗期—拔节期各处理未进行灌溉施肥,冬小麦阶段耗水主要来源于降水和土壤贮水,阶段降水量为68 mm,各处理的阶段耗水量和日耗水量处理间差异不显著。由于灌水和施肥的不同,导致各处理冬小麦全生育期耗水量存在不同程度差异,最终导致苗期—拔节期耗水模系数处理间存在不同程度差异,其中以低肥低水处理(W3N3)耗水模系数最大,这是因为该处理水分和养分不足导致冬小麦全生育期耗水量降低,最终阶段耗水模系数最高。经过拔节期灌溉和追施氮肥后,各处理间阶段耗水量、日耗水量差异逐渐显现。

表4 不同水氮处理小麦不同生育阶段消耗量及耗水模系数

编号	处理	苗期—拔节期			拔节期—开花期			开花期—成熟期		
		ET/mm	CD/(mm·d ⁻¹)	CP/%	ET/mm	CD/(mm·d ⁻¹)	CP/%	ET/mm	CD/(mm·d ⁻¹)	CP/%
T1	W1N1	90.05a	0.62a	21.77e	153.09a	3.64a	37.01a	170.49a	4.06a	41.22c
T2	W1N2	91.58a	0.63a	22.74de	142.88b	3.40b	35.48bc	168.23a	4.01a	41.78c
T3	W1N3	89.68a	0.62a	22.88de	139.63c	3.32c	35.62b	162.67b	3.87b	41.50c
T4	W2N1	87.89a	0.61a	23.15d	134.47d	3.20d	35.43bc	157.23c	3.74c	41.42c
T5	W2N2	88.08a	0.61a	23.65d	129.18e	3.08e	34.68c	155.24c	3.70c	41.68c
T6	W2N3	91.28a	0.63a	25.76c	123.72f	2.95f	34.91bc	139.37e	3.32e	39.33d
T7	W3N1	88.79a	0.61a	28.82b	65.73g	1.56g	21.34d	153.51c	3.65c	49.84a
T8	W3N2	89.53a	0.62a	29.65b	63.50g	1.51g	21.03d	148.93d	3.55d	49.32a
T9	W3N3	89.33a	0.62a	31.10a	60.49h	1.44h	21.06d	137.37e	3.27e	47.83b

注 ET_i代表阶段耗水量,CD代表阶段日平均耗水量,CP代表耗水模系数。*苗期—拔节期,从播种到拔节前(包括播种—出苗、苗期、越冬期和返青期);拔节—开花期,从拔节开始到开花前(包括拔节期和孕穗期);开花—成熟期,从开花到收获(包括开花期、灌浆期和成熟期)。

拔节期—开花期阶段耗水量、日耗水量以W1N1处理最高,W3N3处理最低。相同氮肥条件下,不同灌水处理阶段耗水量差异显著($P<0.05$),随着灌水量的增加耗水量逐渐增加;相同灌水条件下,耗水量随着施氮量的增加而增加。拔节期—开花期降雨量仅为8.10 mm,经过灌溉和追肥处理后,处理间差异显著,说明该阶段是冬小麦灌水施肥关键时期。

在开花期—成熟期冬小麦阶段耗水量、日耗水量和耗水模系数均最高,分别为137.27~170.49 mm、3.27~4.06 mm/d和39.33%~49.84%。同一灌水条件下,冬小麦阶段耗水量和日平均耗水量均随着施氮量的增加呈递增趋势,方差分析结果表明,N1、N2处理间差异不显著,与N3处理的差异均达到了显著水平。说明开花期—成熟期耗水量较大,对小麦生长具有重要影响。灌溉和施肥均有助于作物耗水量增加,随灌水和施氮量的增加,拔节期—成熟期阶段耗水量比W3N3处理增加了7.4%~63.5%。本试验条件下,开花期—成熟期阶段降水量高达206.5 mm,占全生育期降水量的73.07%,其中5月26日降雨为106.7 mm,处于冬小麦腊熟期,主要起到补充土壤水分的作用。

2.3 水氮处理对冬小麦水分利用效率的影响

表5给出了不同水氮处理灌水、施氮及水氮交互效应对冬小麦产量、水分利用效率、降水利用效率、土壤水利利用效率和灌溉水利利用效率。从表5可以看出,冬小麦籽粒产量随着灌水量和施氮量的增加而增加,冬小麦籽粒产量以W1N2处理最高,但与W1N1处理、W2N1处理差异不显著。同一灌水条件下,冬小麦籽粒产量随着施氮量的增加而增加,且N1、N2处理籽粒产量显著高于N3处理($P<0.05$);除W1N1处理与W1N2处理差异不显著外,同一灌水条件下不同氮肥处理间差异显著($P<0.05$)。同一施氮条件下,冬小麦籽粒产量除处理W1N1处理略高于W2N1处理外(但差异不显著),其余处理冬小麦籽粒产量均随灌水量增加而增加,且处理间差异显著。表明灌水和追施氮肥能够显著提高冬小麦籽粒产量。

表5 不同水氮处理冬小麦水分利用效率

编号	处理	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	WUE/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	WUE _s / (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	WUE _p / (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	WUE _t / (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	灌水效益/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
T1	W1N1	6828.34a	16.51b	166.43f	24.16a	75.87d	6.48c
T2	W1N2	6919.02a	17.18b	229.96cde	24.48a	76.88d	21.38a
T3	W1N3	5476.61de	13.97d	282.48c	19.38de	60.85e	14.52b
T4	W2N1	6463.99ab	17.03b	174.72ef	22.87ab	107.73a	3.64c
T5	W2N2	5884.63cd	15.80bc	196.89def	20.82cd	98.08b	14.83b
T6	W2N3	5158.59ef	14.56cd	438.12b	18.25ef	85.98c	16.47ab
T7	W3N1	6245.31bc	20.28a	245.70cd	22.10bc	-	-
T8	W3N2	4994.58f	16.54b	257.84cd	17.67f	-	-
T9	W3N3	4170.21g	14.52cd	908.67a	14.76g	-	-
F值	W	56.84**	7.98**	135.92**	56.75**	341.94**	3.08
	N	89.25**	48.02**	294.44**	89.18**	62.03**	31.98**
	W×N	6.13**	7.68**	77.47**	6.11**	4.89**	3.05

注 *表示在0.05水平下差异显著;**表示在0.01水平下差异显著;WUE、WUE_s、WUE_p和WUE_t分别代表水分利用效率、土壤水分利用效率、降水利用效率和灌溉水利用效率。

同一灌水条件下,随着施氮量的增加,W1处理水分利用效率呈先增加后降低的趋势,W2和W3处理水分利用效率随施氮量的增加逐渐增加:W1N1、W1N2处理的水分利用效率比W1N3处理提高了18.18%和22.98%;W2N1处理的水分利用效率比W2N3处理提高了16.98%;W3N1处理的水分利用效率比W3N3处理提高了39.63%。土壤水分利用效率随着施氮量的增加而逐渐降低,在W1条件下,N2、N3处理显著高于N1处理,但N2、N3处理间无显著差异;在W2、W3条件下,N3处理显著高于N1、N2处理,但N1、N2处理间差异不显著。降水利用效率随着施氮量和灌水量的增加呈现逐渐增加趋势,W1N1、W1N2处理的降水利用效率比W1N3处理提高了24.66%和26.32%。W1N1、W1N2和W2N1处理较高,3个处理间差异不显著。灌水利用效率随施氮量的增加逐渐增加,随灌水量的增加逐渐减小:以W2N1处理最高,较不追施氮肥W2N3处理增加25.31%,且差异达到显著水平;W1条件下,W1N1、W1N2处理较不施氮的W1N3处理增加了24.68%和26.34%,W1N2处理与W1N3处理差异显著,但是与W1N1处理差异不显著。灌水效益在W1条件下,W1N2处理灌水效益最高,W1N1处理灌水效益最低;在W2条件下,W2N3处理最高,但与W3N2处理差异不显著,且均高于W2N1处理,说明过量追施氮肥会降低灌水效益。

3 讨论

水分、氮肥及二者交互作用对于作物产量形成具有重要影响。随着灌水量增加,作物总耗水量增多。作物耗水主要由生育期内有效自然降水、灌溉水和农田土壤贮水3部分组成^[13]。由于作物生育期降水特点、灌水量及灌水次数等因素的差异,作物耗水来源比例也略有不同。本研究结果表明,降水、灌溉水和农田土壤贮水分别占冬小麦全生育期耗水量的68.32%~98.40%、0~22.96%和1.60%~9.92%。冬小麦拔节期降水量较少,拔节期适宜灌水能够保证冬小麦拔节期及生育后期生长需要,不同灌水处理间差异较为明显。本研究结果表明,随着灌水量的增加,作物耗水量增加,降水和土壤贮水占冬小麦总耗水量的比例呈降低趋势,灌水占总耗水量的比例呈增加趋势,与侯翠翠等^[13]的研究结果基本一致。氮肥可以促进作物根系和植株生长,增强作物吸收水分和养分的能力。本试验条件下作物耗水量随着拔节期追施氮肥量而增加,降水量和灌水量占耗水量的比例降低,土壤水占耗水量的比例增加,说明施氮提高了作物对土壤贮水的利用能力,降低了对灌水和降水的依赖。

本研究结果表明,开花期一成熟期耗水量和耗水模系数均最高,补充灌溉条件下,拔节期一开花期的耗水量高于苗期一拔节期的,而雨养条件下,拔节期一开花期的耗水量低于苗期一拔节期的。这是因为拔节期降水量仅8 mm,雨养条件下农田水分不足,土壤贮水不能满足作物正常生长需求,导致耗水量减少。不同处理的籽粒产量结果的说明开花一成熟期是冬小麦耗水的主要阶段。与不灌水处理相比,拔节期灌溉、追施氮肥补充了麦田根区土壤水分和养分,有利于冬小麦对水分和养分的吸收利用,从而增加了拔节期一开花期、开花期一成熟期阶段耗水量和平均日耗水量,而且增加量随灌水和施氮量的增加呈递增趋势。本试验年度,苗期一拔节期、拔节期一开花期、开花期一成熟期阶段降水量分别为68、8.10和206.5 mm,冬小麦生育前期降雨量较少,后期降雨量较大。冬小麦在苗期一拔节期耗水量主要来源于土壤贮水和降水,在阶

段降雨量较少的情况下,阶段耗水量较少。拔节期进行水肥处理后,各处理间耗水量差异增大,而且耗水来源也有所不同,其中雨养处理的土壤水分消耗主要来源于降水和土壤贮水,而灌水处理的水分消耗除了降水和土壤贮水外,还有灌溉水,但从土壤贮水量变化来看,灌溉和施肥有利于冬小麦对土壤贮水的消耗,特别是深层土壤贮水,与 W3N3 处理相比, W1N1 处理 60~100 cm 土层土壤贮水消耗量增加了 106.76%。说明,补充灌溉和适量增施氮肥有利于冬小麦对深层土壤水分的利用。

已有研究结果表明,在一定的范围内,作物产量随着灌水量的增加而增加,但过量的灌水会降低作物产量和水分利用效率^[17]。研究结果表明,随着灌水量的增加,冬小麦水分利用效率、土壤水利用效率、灌溉水利用效率降低,降水利用效率增加。随着施氮量的增加,在 W1 条件下,水分利用效率、降水利用效率、灌水利用效率和灌水效益均表现为先增加后降低;在 W2、W3 条件下,水分利用效率、降水利用效率、灌水利用效率逐渐增加。土壤水利用效率随着施氮量的增加逐渐减小。说明在本试验条件下,一定范围内增施氮肥能够降低作物耗水量,提高冬小麦对降水的利用比例,降低对灌溉水的利用比例,但超过一定的范围,水分利用效率不再增加,甚至降低。

拔节期是冬小麦水分敏感期,拔节期灌水可以有效促进分蘖二级分化,提高分蘖成穗率和穗粒数^[19]。拔节期追施氮肥可促进小花两极分化,有效提高穗粒数^[20]。通过合理的水氮管理措施,能够提高冬小麦穗数、穗粒数和千粒质量,最终实现作物高产^[21-22]。试验结果表明,冬小麦籽粒产量随着拔节期灌水量的增加而增加,高水分处理条件下随着氮肥增加呈先增加后降低的趋势,中、低水分处理条件下随着施氮量的增加逐渐增加。说明适宜的灌水、追施氮肥对提高冬小麦籽粒产量具有积极作用。

作物耗水特性和水分利用效率受作物及品种特性的制约,同时也受到农业土壤因素、降雨、土壤水分等多种因素共同影响。本试验仅分析了拔节期水氮处理对冬小麦生育期耗水特性和水分利用效率,没有考虑不同施氮和灌水时间、次数等因素,后期继续在这方面进行更为深入完善的研究,以期为当地建立系统完善的冬小麦水氮管理模式提供依据。

4 结 论

1)冬小麦总耗水量均随着施氮量和灌水量的增加而增加。相同灌水条件下,与不追施氮肥的 W3N3 处理相比,随着氮肥用量的增加,灌水量和降水量占冬小麦全生育期耗水量的比例分别降低了 1.91%~6.65%和 0.61%~1.2%,土壤贮水消耗占冬小麦全生育期耗水量的比例增加了 2.52%~6.65%。说明增施氮肥和增加灌溉量有利于作物对土壤贮水的消耗。

2)拔节期灌溉、追施氮肥提高了拔节期—开花期、开花期—成熟期阶段耗水量和日耗水量,随灌水和施氮量的增加拔节期—成熟期阶段耗水量增加了 7.4%~63.5%。

3)在试验条件下,由于拔节期—开花期降水量较少,拔节期的灌水、追肥促进了作物生长,增加了作物对水分的消耗,最终籽粒产量提高。随着灌水量的增加,冬小麦水分利用效率、土壤水利用效率、灌溉水利用效率降低,降水利用效率增加。随着施氮量的增加,在 W1 条件下,水分利用效率、降水利用效率和灌水利用效率随施氮量的增加分别提高了 18.18%~22.98%、24.66%~26.32%和 24.68%~26.34%;在 W2、W3 条件下,水分利用效率、降水利用效率、灌水利用效率随施氮量的增加呈递增趋势。土壤水利用效率随着施氮量的增加呈递减趋势。

4)试验条件下,高水中肥(W1N2:灌水量为 90 mm,施氮量为 225 kg/hm²)和中水高肥(W2N1:灌水量为 60 mm,施氮量为 300 kg/hm²)模式可在保持高产的条件下提高水肥利用效率,实现高产高效目标。

参考文献:

- [1] 王婧,逢焕成,任天志,等.黄淮海地区主栽作物水分供需平衡分析[J].灌溉排水学报,2010,29(5):106-109.
- [2] MENG Qingfeng, SUN Qinqing, CHEN Xinping, et al. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2012, 146(1): 93-102.
- [3] 徐建文,居辉,刘勤,等.黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].生态学报,2014,34(2):460-470.
- [4] 胡实,莫兴国,林忠辉.冬小麦种植区域的可能变化对黄淮海地区农业水资源盈亏的影响[J].地理研究,2017,36(5):861-871.
- [5] YANG Xiaolin, CHEN Yuanquan, PACENKA Steven, et al. Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 428-438.
- [6] 裴宏伟,沈彦俊,刘昌明.华北平原典型农田氮素与水分循环[J].应用生态学报,2015,26(1):283-296.

- [7] 李正鹏,宋明丹,冯浩. 水氮耦合下冬小麦LAI与株高的动态特征及其与产量的关系[J]. 农业工程学报,2017,33(4):195-202.
- [8] 秦姗姗,侯宗建,吴忠东,等. 水氮耦合对冬小麦氮素吸收及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(5):440-447.
- [9] 杜娟娟,李粉婵. 不同灌水及施肥措施对冬小麦生长及产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(9):30-34.
- [10] 张珂珂,周苏玖,张嫚,等. 减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(3):863-872.
- [11] 郑雪娇,张永丽,吴复学,等. 测墒补灌条件下施氮量对冬小麦耗水特性和水氮利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(10):1 358-1 363.
- [12] 金修宽,马茂亭,赵同科,等. 测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、氮素利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(7):1 334-1 344.
- [13] 侯翠翠,冯伟,李世莹,等. 不同水氮处理对小麦耗水特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(4):699-704.
- [14] 张黛静,杨逗逗,马建辉,等. 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[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(1):47-55.
- [15] 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):1 367-1 373.
- [16] 马建辉,齐冰玉,姜丽娜,等. 拔节期追氮对冬小麦不同穗粒位籽粒特性的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(3):125-132.
- [17] 黄玲,杨文平,胡喜巧,等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):168-174.
- [18] 张永丽,于振文,郑成岩,等. 不同灌水处理对强筋小麦济麦20耗水特性和籽粒淀粉组分积累的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(12):4 218-4 227.
- [19] 宋兆云,赵阳,王东,等. 拔节期补灌对两种土壤质地冬小麦旗叶衰老特性和籽粒产量的影响[J]. 作物学报,2016,42(12):1 834-1 843.
- [20] 姜丽娜,张凯,宋飞,等. 拔节期追氮对冬小麦产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(4):716-721.
- [21] 高振晓,蔡焕杰,李世瑶,等. 泾惠渠灌区冬小麦适宜灌溉模式研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(5):18-22.
- [22] 张环. 覆盖种植方式和施氮对甘肃庆阳冬小麦产量和水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(10):1-6.

Combined Impact of Irrigation and Nitrogen Application at the Jointing Stage on Water Consumption and Water Use Efficiency of Winter Wheat

ZHANG Xiaopei^{1,2}, WANG Hezhou^{1,2}, ZHOU Xinguo^{1,2*}, YANG Shenjiao^{1,2}, CHEN Jinping^{1,2}, LIU Anneng^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu, Shangqiu 476000, China)

Abstract: 【Objective】 Water consumption and its use efficiency by crops depend on a variety of biotic and abiotic factors and the purpose of this paper is to experimentally study how they are affected by combined application of water and nitrogen at the jointing stage of winter wheat. 【Method】 The experiment was carried out in a field considering of three irrigation treatments: 90 mm (W1), 60 mm (W2), no irrigation (W3); and three nitrogen applications: 300 kg/hm² (N1), 225 kg/hm² (N2) and 150 kg/hm² (N3). 【Result】 When the amount of irrigation increased from 0 to 90 mm, the overall water consumption increased from 67 mm to 106 mm with the contribution of precipitation and soil water decreasing while of the irrigation increasing. Increasing nitrogen fertilizer application reduced the contribution of irrigation and precipitation to water consumption, with the difference compensated from soil water which increased from 1.6%~4.9% to 8.3%~9.9% as the nitrogen fertilizer increased from 150 kg/hm² to 300 kg/hm². Irrigation and fertilization at the jointing stage increased water consumption at the jointing-maturing stage by 7.4%~63.5%. The overall water use efficiency, soil water use efficiency and irrigation water use efficiency decreased as the amount of irrigation increased, but increased with nitrogen fertilizer. For example, in W1, the above three water use efficiencies increased by 18.18%~22.98%, 24.66%~26.32% and 24.68%~26.34% respectively as the N fertilizer increased; these also applied to W2 and W3 except soil water whose use efficiency decreased with the increase in fertilizer application. 【Conclusion】 We conclude from our experiment that 90 mm of irrigation together with 225 kg/hm² of nitrogen fertilization, or 60 mm of irrigation and 300 kg/hm² of nitrogen fertilization at the jointing stage is the optimal combination to achieve high yield and in the meantime improve water use efficiency.

Key words: winter wheat; water use efficiency; irrigation; nitrogen

责任编辑:陆红飞