

春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响

张胜全¹, 方保停^{1,2}, 王志敏^{1,*}, 周顺利¹, 张英华¹

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 河南省农业科学院小麦研究中心, 河南郑州 45000)

摘要: 为了明确华北严重缺水地区晚播冬小麦耗水规律及高产高效灌溉制度, 在大田条件下设置不灌水(W0)、1 水(W1, 拔节水)、2 水(W2, 拔节水 + 开花水)、3 水(W3, 起身水 + 孕穗水 + 开花水)和 4 水(W4, 起身水 + 孕穗水 + 开花水 + 灌浆水)等五种春季灌溉模式, 研究了不同灌溉模式下晚播冬小麦水分利用特征及产量形成特点。结果表明, 在晚播且免浇冬水条件下, 春季每增加 $750\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的灌溉水量则减少土壤水消耗量约 $440\text{ m}^3/\text{hm}^2$, 增加小麦总耗水量约 $230\text{m}^3/\text{hm}^2$; 从播种到拔节, 小麦阶段耗水强度低, 此生育阶段控制灌溉可显著降低总耗水量; 春季第一水推迟至拔节期可提高土壤水消耗量占总耗水量比例至 50%, 土壤水利用率增加; 开花前仅灌一次拔节水可基本满足拔节-开花期耗水需要, 其群体库容量与开花前灌起身水 + 孕穗水模式无显著差异, 且由于相对降低了开花期群体叶面积, 显著增加了群体粒叶比; 晚播密植条件下, 单位面积穗数是群体库容形成的主要贡献因素, 在保证大库容建成条件下, 灌浆期灌水会降低开花前贮藏物质向籽粒再转运比例, 而后期控水可显著提高开花前贮藏物质再转运比例和对库容填充的贡献率, 且较高的群体库源比增强了库对源的反馈促进作用, 使花后单位叶面积的物质生产能力提高, 这可补偿后期水分亏缺对叶片光合生产的不利影响。连续两年试验结果显示, 晚播密植条件下, 春季灌拔节水和开花水可以实现高产与水分高效利用的统一。

关键词: 冬小麦; 灌溉制度; 耗水特性; 源; 库

文章编号: 1000-0933(2009)04-2035-10 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Influence of different spring irrigation treatments on water use and yield formation of late-sowing winter wheat

ZHANG Sheng-Quan¹, FANG Bao-Ting^{1,2}, WANG Zhi-Min^{1,*}, ZHOU Shun-Li¹, ZHANG Ying-Hua¹

1 College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Wheat Research Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2035 ~ 2044.

Abstract: To clarify water consumption characteristics and optimal irrigation strategies for late-sowing winter wheat in seriously water-deficit North China Plain, five spring irrigation treatments, *i. e.*, W0 (no irrigation), W1 (irrigation at jointing stage), W2 (irrigation at jointing and anthesis), W3 (irrigation at double ridge, booting and anthesis), and W4 (irrigation at double ridge, booting, anthesis and filling stage), were applied in 2005-06 and 2006-07 to investigate the characteristics of water use and yield formation of late-sowing winter wheat under different spring irrigation treatments. The results showed that total water consumption (*TWC*) increased $230\text{ m}^3/\text{hm}^2$, and soil water consumption (*SWC*) decreased $440\text{ m}^3/\text{hm}^2$ with each additional irrigation ($750\text{m}^3/\text{hm}^2$) under the conditions of late-sowing and no winter irrigation. The water consumption rate was low from sowing to jointing, and restriction of irrigation during this stage reduced *TWC* significantly. When the first spring irrigation was postponed to jointing stage, the contribution of *SWC* to *TWC* was increased to 50%. Only one jointing irrigation before anthesis satisfied basic water requirement of wheat from jointing to anthesis, had no significantly different sink capacity compared with two irrigations (double ridge and booting) before anthesis, and

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2007BAD69B05); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10020); 国家自然科学基金资助项目(30771271)

收稿日期: 2008-09-13; 修订日期: 2008-12-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhimin206@263.net

improved ratio of total grain number to total leaf area significantly due to reduced leaf area at anthesis. Under late- and dense-sowing conditions, ear density was the main factor contributing to population sink capacity. With adequate sink capacity, irrigation at grain-filling led to less remobilization of carbohydrates accumulated before anthesis to grains, whereas restriction of irrigation after anthesis could significantly increase remobilization of carbohydrates accumulated before anthesis to grains and their contributions to grain filling. High sink/source ratio enhanced the feedback effect of sink to source, improved dry matter productivity per unit leaf area after anthesis significantly, and compensated for the adverse effect of water stress after anthesis on leaf photosynthesis. The two-year results showed that spring irrigations applied at jointing and anthesis stages could achieve high grain yield and high water use efficiency simultaneously for late- and dense- sowing winter wheat.

Key Words: winter wheat; irrigation strategies; water consumption characteristics; source; sink

华北地区是我国主要粮食产区,冬小麦-夏玉米一年两熟是该区主要种植模式。但该区水资源紧缺,冬小麦生长在旱季,是需要灌溉水最多的作物,约占总灌溉用水的 70%^[1],发展节水灌溉势在必行^[2,3]。近年来,该区以作物增产和周年资源集约化高效利用为目的,大力推行“双晚技术”(玉米适期晚收、小麦适期晚播),使得晚播冬小麦在该地区小麦生产中的地位越来越突出^[4]。研究证实,与适期播种相比,冬小麦适时晚播既可以延长前茬玉米的生育期^[5],又可减少冬小麦前期肥水消耗^[6];且因小麦冬前苗龄较小,有利安全越冬,也为免浇冬水创造了条件^[7],易于实现冬小麦的节水灌溉^[5,7]。以往研究表明,合理高效的灌溉制度能够优化小麦耗水结构,降低灌溉量及总耗水量,并能显著提高产量水平和水分利用效率^[8];而不合理的灌溉制度则会造成水资源的严重浪费^[9,10]。近年来关于晚播冬小麦的生育特点及高产技术已有大量报道,但对晚播小麦耗水特性及在免浇冬水条件下春季灌溉制度尚缺乏深入的研究。基于节水高产的要求,本试验研究了晚播条件下不同春季灌溉模式对冬小麦耗水及产量形成的影响,以期对晚播冬小麦节水栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验于 2005-06、2006-07 年在中国农业大学吴桥试验站进行。供试土壤为壤质底粘潮土,地力中等偏上,地下水位 9m。2005-06 生育期共降雨 109.5mm,2006-07 年共降雨 129.0mm,降雨分布见图 1。

1.2 试验处理

参照“冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术”^[7],2005-06 生长季,小麦播期为 2005 年 10 月 17 日,为典型晚播麦(该地区常规播种期为 10 月 5 日~10 日),基本苗 $6.0 \times 10^6/\text{hm}^2$,越冬叶龄 4.4,2006 年 6 月 9 日收获。试验在浇足底墒水的基础上,设置 4 种春季灌溉模式,包括春季不灌水(W0)、春季灌 1 水(W1,拔节期)、春季灌 2 水(W2,拔节期+开花期)和春季灌 4 水(W4,起身期+孕穗期+开花期+灌浆期),具体灌水时间见表 1。供试品种为石家庄 8 号,每处理 3 次重复,小区面积 60m^2 。每次灌水使用水表计量,灌溉定额 $750\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。施肥水平为:有机肥(50% 鸡粪+50% 土粪) $30\text{m}^3/\text{hm}^2$,磷酸二铵 $300\text{kg}/\text{hm}^2$,尿素 $225\text{kg}/\text{hm}^2$, K_2SO_4 $225\text{kg}/\text{hm}^2$, ZnSO_4 $22.5\text{kg}/\text{hm}^2$,均作底肥一次性施入,春季不再追肥。

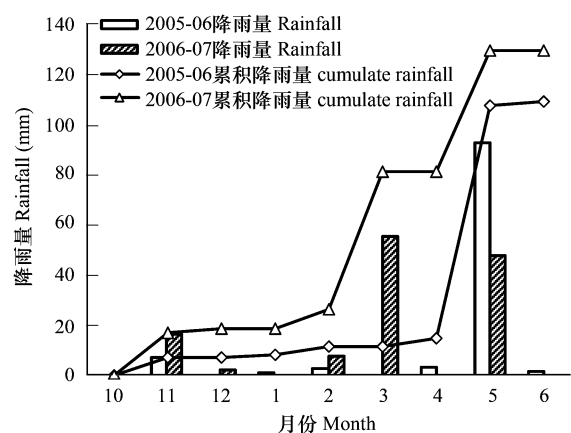


图 1 2005-07 冬小麦生育期降雨分布

Fig. 1 Rainfall distribution during winter wheat growing seasons in 2005-07

2006-07 生长季,小麦播期为 2006 年 10 月 21 日,基本苗 $8.2 \times 10^6/\text{hm}^2$,越冬叶龄 4.3,2007 年 6 月 10 日收获。在 2005-06 生长季的试验基础上,增加了春季灌 3 水(W3,起身期 + 孕穗期 + 开花期)灌溉模式,灌水时间见表 1,其余试验处理同 2005-06 生长季。每次灌水使用水表计量,灌溉定额 $750\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。供试品种为济麦 20,每处理 3 次重复,小区面积 60m^2 。施肥水平同 2005-06 生长季。

表 1 不同灌水处理灌溉时间(2005-07)

Table 1 Irrigation time in various treatments

时间 Time	处理 Treatments	起身水 Raising	拔节水 Jointing	孕穗水 Booting	开花水 Anthesis	灌浆水 Milking
2006-07	W4	23/3	—	23/4	11/5	22/5
	W3	23/3	—	23/4	11/5	—
	W2	—	10/4	—	11/5	—
	W1	—	10/4	—	—	—
	W0	—	—	—	—	—
2005-06	W4	27/3	—	22/4	9/5	21/5
	W2	—	13/4	—	9/5	—
	W1	—	13/4	—	—	—
	W0	—	—	—	—	—

1.3 测定内容与方法

1.3.1 土壤蒸散总量测定

在小麦各生育时期,以 20cm 为一层采用烘干法测定 2m 土体内土壤含水量,采用土壤水分平衡法计算土壤水分蒸散总量(ET)。

ET 按如下公式计算^[10]:

$$ET = SWD + P + I - D + Wg - R$$

式中,SWD 为生育期土壤水分变化量,P 为降雨量,I 为灌溉量,D 为灌溉后土壤水向下层流动量,受土壤结构和灌水量影响, $D = \alpha I$, α 为转换系数,土质为粘土且单次灌水量 $> 700\text{m}^3/\text{hm}^2$ 时, α 取 0.1,本试验 α 取 0.1;Wg 为深层地下水利用量,当地下水位低于 4m 以下时,Wg 可以忽略,R 为地表径流,本试验地地下水位 9m,且无地表径流,Wg 和 R 均可忽略。

$$\text{水分利用效率 } WUE = \frac{Y_i}{ET_i}$$

式中, Y_i 和 ET_i 为灌水水平为 i 的产量水平和土壤水分蒸散总量

$$\text{水分边际效应 } ME = \frac{(Y_i - Y_d)}{(ET_i - ET_d)}$$

式中, Y_d 和 ET_d 为灌溉量为 0 的产量水平和土壤水分蒸散总量。

1.3.2 群体结构考察

于开花期,从各试验小区选取 $2\text{cm} \times 50\text{cm}$ 典型样段考察,按照不同叶位采用长宽系数法测定绿叶面积。小麦成熟时,从各试验小区选取 $2\text{cm} \times 50\text{cm}$ 典型样段进行常规考种,并计算群体粒叶比(包括粒数叶比和粒重叶比)。

计算公式如下:

$$\text{粒数叶比(粒}/\text{cm}^2) = \text{单位土地面积上总结实粒数}/\text{开花期相同土地面积上总叶面积}$$

$$\text{粒重叶比(mg}/\text{cm}^2) = \text{单位土地面积上总结实粒重}/\text{开花期相同土地面积上总叶面积}$$

1.3.3 干物质积累及转运测定

于小麦各生育时期,从各试验小区选取 $2\text{cm} \times 50\text{cm}$ 典型样段植株,分为叶片、茎鞘、穗 3 部分, 105°C 杀青 30min, 70°C 烘干至恒重,称取重量,计算干物质积累量。小麦成熟时,从各小区选取 3m^2 典型样点,单独收割,晾晒,脱粒测产。按如下公式计算花前贮藏物质转运率及对产量贡献率:

开花前贮藏物质转移率(%) = (营养器官开花前干物重 - 成熟期干物重) / 开花期干物重 × 100

开花前贮藏物质贡献率(%) = (营养器官开花前干物重 - 成熟期干物重) / 粒重 × 100

1.3.4 数据统计分析

试验数据使用 SPSS13.0 和 Excel2003 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水分利用分析

2.1.1 不同灌溉模式对冬小麦耗水及其组成的影响

表 2 为冬小麦生育期耗水组成及水分利用特征。试验结果表明,随灌溉次数和灌溉量的增加,冬小麦总耗水量呈增加趋势。回归分析表明,冬小麦总耗水量(y)与灌溉量(x)呈正相关关系($y = 0.3067x + 4391.3$, $R^2 = 0.975^{**}$)。

冬小麦耗水量由降水、灌溉水和土壤供水 3 部分组成。研究表明,灌水次数越多,灌水总量越大,作物耗水量越大^[8,11,12],而土壤耗水则显著减少^[13,14]。本试验表明:在晚播密植条件下,小麦总耗水量与春季灌溉量呈正相关($r = 0.975^{**}$),与土壤水消耗量呈负相关($r = -0.943^{*}$),灌溉水及土壤水的消耗亦呈负相关关系($r = -0.993^{**}$),以 W0 为对照, W4、W3、W2、W1 处理土壤水消耗分别减少 43.9%、41.0%、23.8% 和 9.6%,由回归方程 $y = 3101.3 - 0.5933x$ 推算,每增加 $750\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的灌溉水,约减少 $440\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的土壤水消耗。

从各生育阶段耗水来看(表 2),在晚播条件下,越冬前苗龄较小,播种至越冬期间植株蒸腾量较低,耗水主要是地表蒸发,阶段耗水量较少,这个时期的耗水量仅占全生育期的 8.9% ~ 10.6%。入冬-起身气温低,土壤蒸发耗水是耗水的主要部分,此阶段耗水多为无效耗水,约占全生育期耗水的 12.5% ~ 14.8%。起身期灌水显著增加了起身-拔节阶段的水分消耗(主要是灌溉水消耗),因此, W4、W3 处理在播种-拔节阶段总耗水量较其它处理增加 $241.3\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。拔节-开花阶段的耗水量,各处理之间差异不显著,但以不浇水处理(W0)最高,且浇拔节水处理(W1、W2)高于浇起身水 + 孕穗水处理(W3、W4),这说明此阶段耗水结构中土壤水消耗比例较大,在拔节前控制灌溉的基础上,拔节期单次灌溉基本可满足拔节期-开花期小麦生长发育的耗水需要,同时又减少了灌水总量和灌水次数。开花-成熟期的阶段耗水量随灌水量增加而增加, W2、W3、W4 处理之间差异不显著,但均显著高于 W1、W0 处理。

表 2 不同处理耗水及其组成(2006-07)

Table 2 The water consumption and their compositions in various treatments

处理 Treatments	总耗水 ET (m^3/hm^2)	耗水组成 WSC					
		灌溉水 I (m^3/hm^2)	(%)	降水 P (m^3/hm^2)	(%)	土壤水 SWU (m^3/hm^2)	(%)
W4	5154.0a	2400	41.9	1290.0	25.0	1704.0c	33.1
W3	4962.1a	2100	38.1	1290.0	26.0	1782.1c	35.9
W2	4820.6b	1350	25.2	1290.0	26.8	2315.5b	48.0
W1	4714.2b	750	14.3	1290.0	27.4	2749.2ab	58.3
W0	4330.0c	0	0	1290.0	30.0	3040.0a	70.0
处理 Treatments	总耗水 ET (m^3/hm^2)	阶段耗水 GPC (m^3/hm^2)					
		播种-冬前 Sowing-Over wintering	冬前-起身 Over wintering -Raising	起身-拔节 Raising -jointing stage	拔节-开花 Jointing stage -anthesis	开花-成熟 Anthesis -maturity	
W4	5154.0a	458.7a	642.9a	925.1a	1282.7a	1844.6a	
W3	4962.1a	458.7a	642.9a	925.1a	1282.7a	1652.7a	
W2	4820.6b	458.7a	642.9a	683.8b	1386.9a	1648.3a	
W1	4714.2b	458.7a	642.9a	683.8b	1386.9a	1541.9b	
W0	4330.0c	458.7a	642.9a	683.8b	1428.9a	1115.6c	

ET , evapotranspiration; WSC , water resource composition; GPC , growth period composition; I , irrigation; P , precipitation; SWU , soil water use

表中不同小写字母表示 5% 水平的差异显著性,下同 Tables with the same small letter are not significant at 5% level respectively, the same below

2.1.2 不同灌溉模式对土壤水利用的影响

由表 2 可知,随灌水量增加,2m 土体内的土壤水消耗量显著下降,也即灌溉会降低土壤贮水的消耗。土壤水消耗量占全生育期总耗水量的比例, W4、W3、W2、W1、W0 处理分别为 33.1%、35.9%、48.1%、58.3%、70%。

从不同生育时期土壤水分含量来看(图 2),拔节期与播种前比较,各灌溉模式 0~100cm 土层含水量均下降,而以 W2、W1、W0 处理下降幅度较大,W3、W4 处理下降幅度较小;各处理 100cm 以下土层的含水量无明显变化。说明拔节前小麦主要消耗 0~100cm 土层水分,而拔节前灌溉会降低此层土壤贮水的利用。到开花期,各处理上层土壤水含量继续下降,W3、W4 处理耗水层次达到 120~140cm, W2、W1、W0 处理耗水层次达到 160~180cm。到成熟期,各处理各土层含水量均下降,尤其 W2、W1、W0 处理 140cm 以下土层含水量下降最为明显。全生育期土壤含水量的变化,呈现出灌水量越少土壤耗水层越深、各层(尤其是下层)土壤含水量下降幅度越大的趋势。

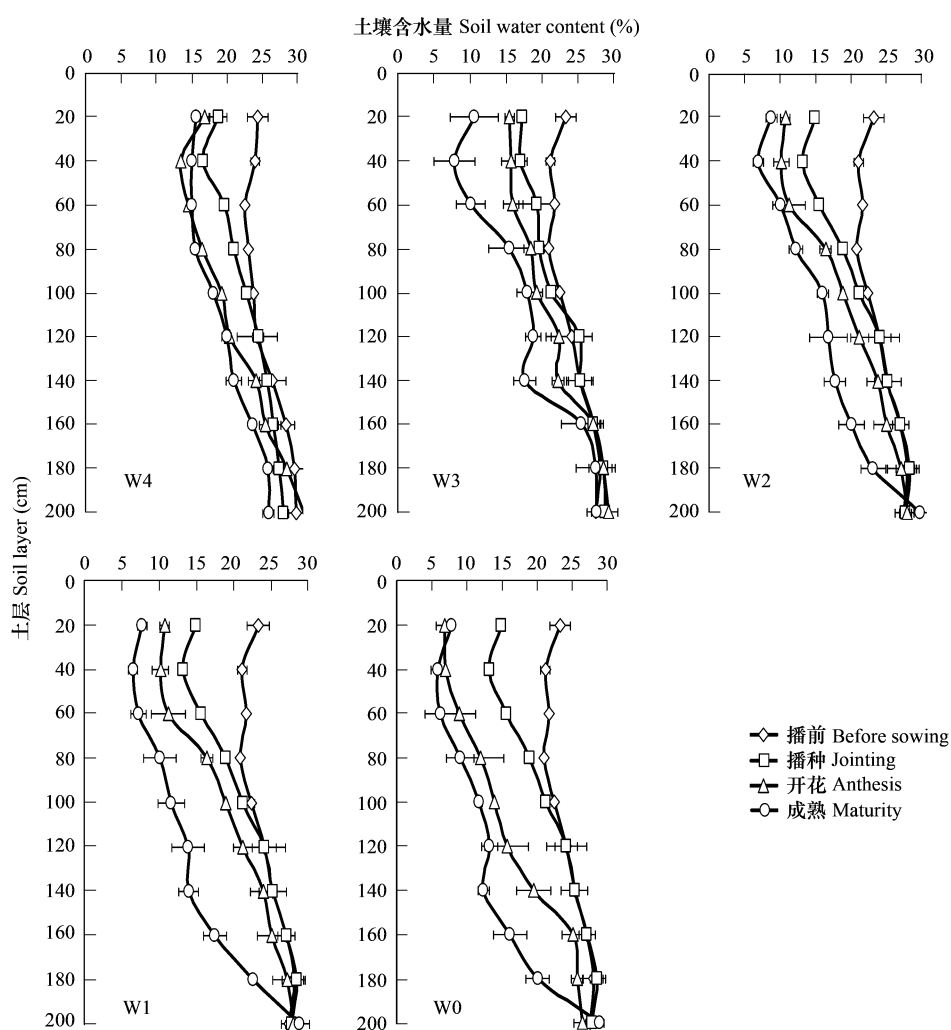


图 2 不同时期 2m 土层土壤水分含量(2006-07)

Fig. 2 The soil water content in 2m soil layer during different growth stages(2006-07)

从土壤水消耗量的空间分布比例(表 3)也可看出,下层土壤水消耗占土壤总耗水的比例在处理间有很大差异,随灌水减少,下层土壤水消耗比例增加。

2.1.3 不同灌溉模式对水分利用效率的影响

两年的试验均表明(表 4),随灌水量增加,总耗水量增加,产量在一定范围内也呈增加趋势,但以 W2 处

理(拔节水+开花水)的灌溉模式产量水平最高。随春季灌水增加,水分利用效率(*WUE*)的变化与产量变化趋势相似,也以 W2 处理(拔节水+开花水)模式的 *WUE* 最高,但以 W4 处理 *WUE* 最低。春季增加灌水的边际效应(*ME*)以春灌 1 水(W1)或春灌 2 水(W2)为最高。

表 3 不同灌水处理土壤水消耗量及其分布(2006-07)

Table 3 The water consumption and distribution in various treatments

处理 Treatments	2m 土体总耗水量 SWU(m^3/hm^2)	各土层消耗量(m^3/hm^2) Water consumption of each soil layer									
		0~40cm	(%)	40~80cm	(%)	80~120cm	(%)	120~160cm	(%)	160~200cm	%
W4	1704.0c	546.6	32.1	506.0	29.7	477.3	27.8	174.4	10.2	3.8	0.2
W3	1782.1c	783.4	44.0	507.5	28.5	190.8	10.7	285.9	16.0	14.4	0.8
W2	2315.5b	776.4	33.5	589.8	25.5	454.2	19.6	433.3	18.7	61.8	2.7
W1	2749.2ab	894.8	32.5	506.6	18.4	654.4	23.8	568.4	20.7	124.9	4.5
W0	3040.0a	854.5	28.1	750.2	24.7	599.5	19.7	658.2	21.7	177.7	5.8

表 4 不同处理水分利用特征(2005-07)

Table 4 The characteristics of water use in different treatments

时间 Time	处理 Treatments	籽粒产量 Grain Yield(kg/hm^2)	总耗水 ET(m^3/hm^2)	水分利用效率 WUE(kg/m^3)	水分边际效应 ME(kg/m^3)
2006-07	W4	8191.4a	5154.0a	1.59b	1.32c
	W3	8385.9a	4962.1a	1.69a	2.03b
	W2	8435.9a	4820.5b	1.75a	2.72a
	W1	7778.4b	4714.2b	1.65a	1.76b
	W0	7101.2c	4330.0c	1.64a	—
2005-06	W4	8402a	4899.5a	1.71b	2.66c
	W2	8502a	4606.2b	1.85a	5.86b
	W1	8393.1a	4572.7b	1.84a	6.22a
	W0	6889.2b	4331.1c	1.59c	—

2.2 产量形成分析

2.2.1 不同灌溉模式对籽粒产量影响

进一步分析籽粒产量结果(表 4),春季灌溉各处理的产量均显著高于春季无灌溉(W0)处理,但春灌 2 水(W2)、春灌 3 水(W3)、春灌 4 水(W4)处理之间产量无显著差异,且以春灌 2 水处理产量最高。说明,在晚播高密度栽培条件下,春灌 2 水已能满足小麦高产形成对水分的需求,过多灌水反而对产量形成不利。

2.2.1 不同灌溉模式对库容量的影响

以单位面积总粒数作为群体库容量的指标。调查表明(表 5),随灌水量增加,开花期总干物质积累量越大,群体库容量也越大,但春灌 2 水与春灌 3 水及春灌 4 水模式相比库容量差异未达显著水平,说明,在晚播密植、保证穗数条件下,开花前灌 2 水(拔节和开花水)可基本满足高产群体库容建成的需要。

试验结果表明(表 5),增加开花前灌水量会降低干物质向穗器官分配比例,增加干物质向营养器官(主要是叶)的分配比例,同时开花期群体叶面积指数明显增加。反映群体质量的库/源比值指标粒叶比(粒数叶比、粒重叶比)则以 W2 处理最高,W4 或 W3 最低。这说明,虽然丰水处理(W4、W3)能够增加单位土地面积上的库容量,但群体叶面积增加更为明显,由此造成单位叶面积上的库容量下降;而适度降低灌溉水平、控制拔节前灌溉的处理(W2)则可以在有效扩充单位土地面积库容量的基础上显著降低群体叶面积,从而增加群体库源比,提高群体生产效率。

2.2.3 不同灌溉模式对库容物生产的影响

产量库容填充物一部分来自于开花后同化器官的光合产物,一部分来自开花前营养器官贮藏物质的再转运。试验结果(表 6)显示,不同春季灌水模式对冬小麦库容物生产影响明显。春季灌溉量越大,花后干物质

积累量越大,但花后单位叶面积物质生产能力却以 W2 处理最高。随着春季灌水量减少,花前贮藏物质的转运量、转运比率及其对产量的贡献率增加。

表 5 灌溉措施对库容量的影响(2006-07)
Table 5 The effects of irrigation schedules to sink capacity

处理 Treatments	穗数 Spikes ($\times 10^4$ /hm ²)	穗粒数 Grain no. per spike	粒重 Grain Weight (mg)	库容量 Sink capacity ($\times 10^7$ grain/hm ²)	开花期物质积累(kg/hm ²) Dry matter accumulation at anthesis				开花期 LAI LAI at anthesis	粒数叶比 Grain no. -leaf area ratio (grain/m ² leaf)	粒重叶比 Grain weight -leaf area ratio (g/m ² leaf)
					总干重 Total Biomass	叶 Leafs	茎鞘 Stems	穗 Spikes			
W4	871.1a	29.1a	34.1c	25.8a	12854.5 (100)	4073.9 (31.7)	6292.1 (48.9)	2488.5 (19.4)	7.5a	3437.9b	109.2c
W3	880.5a	28.2a	35.1b	24.8a	12854.5 (100)	4073.9 (31.7)	6292.1 (48.9)	2488.5 (19.4)	7.4a	3350.9b	113.2b
W2	895.8a	27.3a	36.3a	24.2a	11524.2 (100)	3051.0 (26.5)	6129.2 (53.2)	2344.0 (20.3)	6.6b	3666.7a	127.8a
W1	888.3a	26.7b	33.5c	23.5b	11525.4 (100)	3045.0 (26.4)	6095.6 (52.9)	2384.7 (20.7)	6.6b	3560.6a	117.9b
W0	854.8a	25.9c	35.8a	22.1c	10179.3 (100)	2587.0 (25.4)	5497.0 (54.0)	2095.3 (20.6)	6.1c	3653.4a	117.2b

库容量 = 单位面积穗数 $\times$ 每穗结实粒数; 括号中数据为干物重所占百分比 Sink capacity = Spikes $\times$ Grain no. per spike; Data in brackets are relative proportion of dry matter

表 6 灌溉措施对库容物生产的影响(2006-07)
Table 6 The effects of irrigation schedules to sink fill

处理 Treatments	产量 Grain yield (kg/hm ²)	干物质积累 Dry matter accumulation (kg/hm ²)			开花前贮藏物质 Reserve per-anthesis			花后物质生产力 Dry matter productivity after anthesis (g/m ² leaf)
		开花期 Anthesis	成熟期 Maturity	开花-成熟 Anthesis -maturity	转运量 Transportation amount (kg/hm ²)	转移率 Transfer percentage (%)	贡献率 Contribution proportion (%)	
W4	8191.4	12854.5	19817.2	6562.7	1628.7	12.7d	22.9d	87.5a
W3	8385.9	12854.5	19118.8	6264.3	2121.6	16.5c	29.1c	84.5b
W2	8435.9	11524.2	17589.6	6065.4	2370.5	20.6b	32.3b	89.5a
W1	7778.4	11525.4	16900.3	5374.9	2403.5	20.9b	35.5b	84.9b
W0	7101.2	10179.3	14753.3	4574.0	2527.2	24.8a	40.9a	75.5c

花后物质生产力 = 花后干物质积累量/开花期总叶面积 Dry matter productivity after anthesis = total dry matter accumulation after anthesis/total leaf area at anthesis

2.3 耗水量与产量和 WUE 的关系

随灌水量的增加,水资源生产力表现为一定的函数特征。根据本试验结果的统计分析表明(图 3),冬小麦耗水量(ET)与产量(GY)呈二次抛物线函数关系。随着耗水量增加,小麦产量也逐渐增加,当总耗水量达 5400m³/hm² 时,小麦产量达最大值,约 8525kg/hm²,此时土壤水分达到了小麦需水的阈限,继续增加灌水,产量水平不但不会增长,反而会降低。

从图 3 可以看出,耗水量(ET)与水分利用效率(WUE)的关系也表现为二次抛物线函数关系。在耗水量低时水分利用效率随着耗水量的增加而增加,当耗水量达到 4700m³/hm² 时,水分利用效率达到最大,约为 1.7kg/m³,当耗水量超过 4700m³/hm² 以后,水分利用效率随着耗水量的增加而减小。

3 讨论

3.1 晚播冬小麦水分消耗特征

冬小麦适时晚播缩短了播种到冬前的生育时间,冬前积温少,越冬前苗龄较小,抗寒性强,有利于安全越

冬^[5,7],不仅如此,也有利于减少冬前无效耗水。本试验结果显示,播种到冬前阶段耗水仅占生育期总耗水量的约 10%,阶段耗水量少,地表蒸发量减少。播种至拔节的生长天数占全生育期天数的 76.1%,阶段耗水占全生育期耗水的 39%,此阶段日均耗水量仅为拔节期至成熟期日均耗水量的 1/5,耗水强度较低,适度土壤水分亏缺并不会给小麦此阶段的生长发育带来显著影响^[15];又由于该生育阶段气温较低,苗龄较小,植株蒸发量较低,麦田耗水多为地表蒸发,此阶段灌水会增加蒸发耗水。因此,在灌足底墒、免浇冬水的条件下,可将春季第一水推迟至拔节期,这样不仅会减少灌溉水的投入,减少无效耗水的消耗,还可提高阶段水分利用效率,实现阶段节水。

拔节后温度回升迅速,小麦植株生长发育加快,地面覆盖度迅速增加,耗水逐渐以蒸腾耗水为主。拔节-开花期是群体库容建成的主要时期,开花期-成熟期是库容填充期,因此拔节期-成熟期的供水状况将直接影响产量形成。本试验结果表明,春季不同灌溉模式处理拔节-开花阶段的耗水量差异较小,平均耗水约 1366 m³/hm²,占全生育期耗水的 28.5%。不同处理间开花期-成熟期阶段耗水的差异较大,耗水量为 1116 ~ 1845 m³/hm²,灌溉次数越多、总灌溉量越大的处理此阶段耗水也越多,不同处理平均阶段耗水量占总耗水量 32.5%。

华北地区水资源形势严峻,减少水资源消耗、提高水分利用效率是解决该地区水资源短缺的根本途径。冬小麦耗水量由降水、灌溉水和土壤供水 3 部分组成。2m 土体是小麦根系分布带,也是庞大的地下水水库^[16],具有较强的贮水能力,能够为小麦生长提供有效水分供给。已有研究证实,提高土壤水的利用比例是减少灌溉水、降低总耗水的关键^[5]。本试验表明,减少春季灌溉水平可使土壤水消耗增加,拔节水 + 开花水(W2)、拔节水(W1)两种春灌模式土壤水消耗量占生育期总耗水量的 50% 以上,而灌溉水仅占全生育期耗水的 25% 以下,与春浇 3 水(W3)和 4 水(W4)模式比较显著提高了土壤贮水利用率,特别是提高了下层土壤耗水比例,而水分利用效率增加。本试验证明,在晚播条件下,春季实行拔节水 + 开花水的灌溉模式基本可以满足小麦生育期需水要求,并能显著降低总耗水量及灌溉水消耗,提高水分利用效率,实现全生育期的节水。充分利用土壤贮水尤其是下层土壤水是减少灌溉水、提高水分利用效率的有效途径。

3.2 晚播冬小麦产量形成特征

本试验结果表明,冬小麦耗水量(ET)与产量(GY)呈二次抛物线函数关系。在连续两年的试验中,春季灌 2 水模式(拔节水 + 开花水)均获得最高产量水平,而春季灌 3 水及 4 水模式,增加了灌水量,却并没有相应增加产量。这可能与晚播小麦高密度群体产量结构对灌水时期的反应不同有关。

小麦的经济产量由穗数、穗粒数和粒重的大小三者共同决定,本试验将穗数与穗粒数的乘积表示为群体库容量,则小麦的经济产量的形成可视为群体库容建成与库容填充两个过程。已有研究表明,在限水栽培条件下水分对穗数影响最大的时期是拔节—孕穗期,对穗粒数影响最大的时期是拔节—开花期^[7],因此,拔节—开花期是群体库容量的决定时期。从本试验结果可以看出,不同灌溉处理之间穗数均无显著差异,说明在晚播密植条件下,穗数主要由基本苗决定,受春季灌溉影响较小。在相似穗数基础上,不同处理群体总库容量的大小受穗粒数的制约。试验结果表明,W2 处理与 W3、W4 处理群体库容量无显著差异,说明拔节水 + 开花水与起身水 + 孕穗水 + 开花水具有相似的扩库效应。

籽粒形成之后的过程是库容填充。籽粒库容填充物来自于开花后同化器官的光合生产以及开花前营养

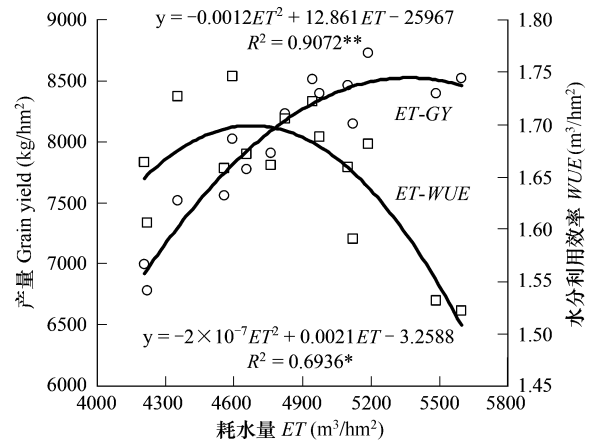


图3 冬小麦产量、水分利用效率与耗水量关系

Fig. 3 The relationships among yield, water use efficiency and evapotranspiration

器官贮藏物质的再转运^[17]。本研究表明,不同春灌模式对花后物质生产和花前物质转运影响不同。随着春季灌水次数增加,花后物质积累量增加而花前贮藏物转运减少。在库容基本相同的3个处理(W2、W3、W4)中,W2处理由于拔节前控水降低了开花期叶面积指数,群体粒叶比(粒数叶比)较高,较高的库/源比增强了单位叶面积的物质生产能力,同时也促进了花前贮藏物再运转,因而粒重和产量最高;W3处理花前灌水多,特别是起身期灌水,使开花期群体叶面积指数过大,粒数叶比降低,因而后期单位叶面积物质生产力不高,粒重较低;W4处理在W3处理基础上又增加了一次灌浆水,进一步减弱了营养体物质运转,因而使粒重和产量下降。

本研究表明,晚播冬小麦在足墒播种基础上,采用拔节水+开花水的春灌模式,在拔节前和灌浆后期适当控水,可以提高土壤水利用率、降低总耗水量,同时可保障适宜库容形成,提高粒叶比,促进花后物质生产和贮藏物运转,协调源库关系,实现节水高产。

References:

- [1] Wang D B, Zhang G L, Zhou X G. Study on Situation of Water Resources Utilization in North China and Its Macroscopical Countermeasures. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(2):46—51.
- [2] Yu S Z, Chen Y H, Li Q Q, *et al.* Feasible study on water-saving effect of wheat-maize rotation pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8):2523—2531
- [3] Zhang X Y, Pei D, Hu C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain. *Irrig Sci*, 2003, 21:159—166.
- [4] Wang Z M, Wang S A. Intensive Multiple cropping for super high yield: major way to develop food production of China in the 21st Century. *Research of Agricultural Modernization*, 2000, 21,(4):193—196.
- [5] Li J M, Wang P, Zhou D X, *et al.* Studies on the Cultivating Techniques of Water-Saving and High-yielding and Their Physiological Bases in Winter Wheat Plants. In: Li J M ed. *The principals of winter wheat cultivation for high use efficiencies of water and fertilizers*. Beijing: Publishing House of China Agricultural University, 2000. 1—16.
- [6] Xue X Z, Wang Z M, Qin Y. Influence of fertilization and sowing date on growth and water consumption of winter wheat with no irrigation after sowing. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(4):78—83.
- [7] Wang Z M, Wang P, Li X H, *et al.* Principle and Technology of Water-saving, Fertilizer-saving, High-yielding and Simple Cultivation in Winter Wheat. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(5):38—44.
- [8] Li J M, Inanaga Sh, Li Z H, *et al.* Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain. *Agri Water Manag*, 2005, 76:8—23.
- [9] Turner N C. Plant water relations and irrigation management. *Agri Water Manag*, 1990, 17:59—75.
- [10] Ahmet E, Suat S. Determination of plant-pan coefficients for field-grown eggplant (*Solanum melongena* L.) using class A pan evaporation values. *Agri Water Manag*, 2006, 85:58—66.
- [11] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, *et al.* Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agri Water Manag*, 2006, 85:211—218.
- [12] Ju H, Lan X, Li J M, *et al.* Effects of Different Irrigation Systems on Winter Wheat Yield and Water Consumption. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(5):23—29.
- [13] Li J M, Wang P, Zhou D X, *et al.* Effect of the irrigation systems of winter wheat on the soil storage water utilization. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1999, 7(1):54—57.
- [14] Steve R G, Kirkham M B, Brent E C, *et al.* Root uptake and transpiration: from measurements and models to sustainable irrigation. *Agri Water Manag*, 2006, 86:165—176.
- [15] Zhong Z Z, Zhao J B, Yu X C, *et al.* Calculation and analysis on water requirements of major crops in Northern China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2000, 21(2):1—5.
- [16] Li Y S, Wang L, Liu S P, *et al.* The Influence of different amounts of water supplied at different depths in soil-root interface on root distribution and yield of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10):1680—1687.

- [17] Zhang Y P, Wang Z M, Wang P, *et al.* Canopy photosynthetic characteristics of population of winter wheat in water-saving and high-yielding cultivation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003,36(10):1143–1149.

参考文献:

- [1] 王道波,张广录,周晓果. 华北水资源利用现状及其宏观调控对策研究. *干旱区资源与环境*,2005,19(2):46~51.
- [2] 于舜章,陈雨海,李全起,等. 冬小麦-夏玉米两熟农田节水效应的可行性. *生态学报*, 2006,26(8):2523~2531
- [4] 王志敏,王树安. 集约多熟超高产——21世纪我国粮食生产发展的重要途径. *农业现代化研究*, 2000, 21,(4):193~196.
- [5] 李建民,王璞,周殿玺,等. 冬小麦节水高产栽培技术及其生理基础的研究. 见:李建民主编. 冬小麦水肥高效利用栽培技术原理. 北京:中国农业大学出版社, 2000. 1~16.
- [6] 薛绪掌,王志敏,秦勇. 充足底墒播后不灌水时肥料和播期组合对小麦生长和耗水的影响. *干旱地区农业研究*. 2003, 21(4):78~83
- [7] 王志敏,王璞,李绪厚,等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术. *中国农业科技导报*, 2006, 8(5): 38~44
- [12] 居辉,兰霞,李建民,等. 不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究. *中国农业大学学报*, 2000,5(5):23~29.
- [13] 李建民,王璞,周殿玺,等. 冬小麦灌溉制度对土壤贮水利用的影响. *中国农业生态学报*,1999,7(1):54~57.
- [15] 钟兆站,赵聚宝,郁小川,居辉. 中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析. *中国农业气象*,2000,21(2):1~5
- [16] 李运生,王菱,刘士平,等. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响. *生态学报*,2002,22(10): 1680~1687.
- [17] 张永平,王志敏,王璞,等. 冬小麦节水高产栽培群体光合特征. *中国农业科学*,2003,36(10):1143~1149.