

## 不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究

居辉 兰霞 李建民 周殿玺 苏宝林

(中国农业大学作物学院)

**摘要** 研究了不同灌溉制度对冬小麦水分消耗和产量构成的影响,从产量差异的生理基础和耗水特征等方面阐述了节水高产的原因。研究表明在底墒水充足的壤土条件下,春灌二水比春灌一水增产,但春灌一水的边际效益高于春灌二水处理;春灌二水与春灌三水的产量相近,但水分利用率提高。随春季灌水量的减少,小麦生育期间的总耗水量降低,但却增加了对土壤水,尤其是土壤深层贮水的利用,如春无灌水处理的土壤耗水占到了总耗水量的 84.9%,其中 19.0% 来自于 130~ 200 cm 的深层贮水,而春灌二水处理的土壤耗水则分别为 49.9% 和 1.9%。

**关键词** 冬小麦; 灌溉制度; 耗水

**分类号** S512 11; S274 3 4

## Effects of Different Irrigation Systems on Winter Wheat Yield and Water Consumption

Ju Hui Lan Xia Li Jianmin Zhou Dianxi Su Baolin

(College of Crop Sciences, CAU)

**Abstract** The influence of different institutional irrigation on the wheat yield components and water use efficiency was studied, in order to improve the water saving culture system and elucidate the physiological basis of the high yield under water saving culture. The results indicated that: When the loam soil in experiment was irrigated sufficiently (75 mm) before sowing, the yield of twice irrigations (150 mm) in spring is higher than that of one time irrigation (75 mm) but not lower than that of three time irrigations and the water marginal benefit of twice irrigations is lower than that of one time. Compared with three time irrigations in spring, water use efficiency of twice irrigations was increased. With decreasing amount of irrigation water, the total water consumption was decreased, but the soil storage water utility was increased, especially the water in deeper layer soil.

**Key words** winter wheat; irrigation system; water consumption

冬小麦是我国华北平原主要的粮食作物之一,其播种面积占耕地面积的 40% 左右。由于受到季风气候的影响,冬小麦生长在一年中最干旱的季节,生育期内降雨仅能满足小麦总耗水的 25% ~ 30%<sup>[1]</sup>,小麦要获得高产就必须依靠灌溉水的补充。据统计,小麦灌溉用水约占农业用水总量的 70%<sup>[2]</sup>,如何提高小麦的水分利用率,发展节水高产栽培,是缓解小麦生产中水资源供需矛盾的重要途径之一<sup>[3,4]</sup>。本文对华北地区冬小麦在不同灌溉制度下的产量效应进行了

收稿日期: 1999-12-15

居辉,北京市白石桥路 30 号中国农业科学院农业气象研究所,100081

初步研究,旨在提高现有水资源的利用效率,为生产中经济高效的麦季用水提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

试验于1995~1996年在河北省吴桥县中国农业大学实验站进行,土壤为壤质土,土层深厚,地下水位6~9 m。土壤有机质和全氮( $w/\%$ )分别为0.95和0.082;碱解氮、速效磷和速效钾( $w/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )分别为83.5,12.9和94.5;土壤pH8.79。

品种采用生产常用种冀麦38,播前浇底墒水75 mm,试验于10月下旬播种,基本苗622.5万 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验处理为春季不灌水,春季灌一水(拔节期),春季灌二水(拔节+开花),春季灌三水(拔节+开花+灌浆),每次的灌水定额为75 mm。

各处理施肥水平为有机肥30 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,磷二铵450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,春季无水处理底施尿素337.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,其他3个水分处理底施尿素187.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,拔节期追施尿素150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其他措施同生产中常规管理。

1995~1996年小麦生长期降雨49.7 mm,相当于同期正常降水量的39.8%,属于极度干旱的年份,其中较大的降水03-29为10.2 mm,05-17为9.7 mm。

土壤含水量测定采用烘干法,取样深度2 m,1 m以上为10 cm一层,1 m以下为30~40 cm一层,耗水量计算采用水量平衡法。光合强度测定采用中国农业大学生产的BAU光合测定系统。在小麦的主要生育时期进行农学常规的考苗,开花期进行根量及根系分布的测定,成熟期考种测产。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉制度的土壤水分含量变化

试验地土壤为轻壤土,土壤田间持水量为21.68%,凋萎系数7.59%。根据吴桥的土壤水分特征曲线及FAO(1992)关于作物永久萎蔫点的水势阈值( $15\times 10^5$  Pa),则田间持水量的70%为小麦适宜生长的水分含量下限指标,土壤水分含量低于13%则小麦的生长处于干旱胁迫的状态,由此确定的冬小麦干旱程度指标见表1。

表1 土壤水分含量等级划分

$w/\%$ , 0~60 cm

水分含量等级	田间持水量	土壤含水量
水分充足	100~80	21.68~17.3
适宜水分	80~60	17.3~13.00
轻度干旱	60~50	13.00~10.84
中度干旱	50~40	10.84~8.67
重度干旱	40~35	8.67~7.59
极度干旱	35	7.59

根据小麦的生长进程,对田间土壤水分含量动态进行了测定,结果可见(表2),春季无灌

水处理, 在接近小麦拔节期时(04-13), 土壤耕层的水分含量达 13.38%, 之后由于耗水的增强, 至小麦开花时(05-13), 土壤含水量降至 3.59%, 处于极度干旱状态, 至收获时含水量降至 3.19%。因此, 对于春季无灌水区, 从拔节阶段开始就处于土壤干旱状态, 并随着生长发育, 干旱程度不断加剧, 开花至成熟期间土壤极度干旱。

春季灌一水处理, 拔节前土壤水分含量基本同于无灌水处理。在小麦拔节时(04-16)灌水 75 mm, 土壤水分得到补充, 0~30 cm 土壤水分含量达 20.36%, 之后随植株生长, 水分消耗; 至开花期, 0~30 cm 土壤的水分含量降至 8.36%, 土壤中度干旱; 小麦成熟时, 土壤水分含量降至 3.93%, 土壤极度干旱。因此, 春季于拔节时灌一水的处理, 主要作用是减轻了拔节~开花期间的土壤水分干旱, 小麦从开花后则一直处于土壤干旱的环境中。

春灌二水的处理, 开花前土壤水分状况同春灌一水处理。在开花时灌水 75 mm, 使土壤水分得到补充, 0~30 cm 土壤含水量达 19.88%, 此后由于蒸发、蒸腾耗水, 至 06-02 土壤水分含量降至 9.51%, 土壤中度干旱; 收获时, 土壤水分含量 6.28%, 极度干旱, 说明春灌二水处理在小麦灌浆后土壤就处于干旱状态。

春灌三水的处理, 其第二水略早于春灌二水的第二水, 通过灌第二水、第三水使小麦自开花~成熟期间的土壤水分含量一直保持在田间持水量的 60% 以上, 说明小麦春灌三水, 全生育期基本上均处于良好的供水土壤环境中。

由上可见, 在底墒水充足的条件下, 春灌三水的小麦在整个春季生育阶段处于水分状况良好的环境中, 基本属于全生育期水充足型的灌溉方式; 随灌水次数的减少, 小麦处于干旱状态的时期提前, 春灌二水的小麦在籽粒形成后处于土壤干旱状态; 春灌一水则是开花后一直处于土壤干旱状态; 无水处理则是拔节后土壤水分持续干旱。

表 2 不同灌溉的土壤春季水分含量变化动态

w /%, 0~30 cm

处 理	灌溉日期	测 定 日 期								
		04-13	04-22	05-02	05-08	05-13	05-23	05-28	06-02	06-12
春无灌水		13.38	9.72	5.98	-	3.59	5.68	-	4.14	3.19
春灌一水	04-16	11.93	20.85	16.35	-	8.36	6.77	-	5.50	3.93
春灌二水	04-16 05-15	11.55	19.80	14.08	-	5.63	17.65	-	9.51	6.28
春灌三水	04-16 05-10 05-25	10.60	20.43	14.74	10.07	19.88	18.93	22.69	20.32	14.33

## 2.2 不同灌溉制度的产量及产量构成分析

不同时期土壤水分含量, 对产量各构成因素有不同的影响, 进而形成了不同的产量。

由表 3 可见, 春灌三水处理和春灌二水处理间产量差异不显著。说明春灌二水已基本能够满足高产小麦水分需求。春无灌水及春灌一水处理较水分满足型的春灌三水处理相比, 产量分别下降了 17.93% 和 12.06%, 说明开花后的持续干旱不利于产量的形成, 土壤干旱出现的越早, 持续时间越长, 产量下降越明显。

与春灌三水处理相比, 无水处理显著降低了单位面积的穗数、穗粒数和千粒重; 春灌一水处理显著降低了千粒重; 春灌二水处理的产量构成因素和春灌三水的差异不显著。因此说明, 拔节~开花期间的土壤干旱主要影响了单位面积上的穗数和穗粒数, 开花后的持续干旱则主要影响了千粒重, 灌浆后期的干旱对产量构成因素基本没有影响。

1995~1996年为极度干旱的年份,由本试验结果可以看出,春季灌二水比春灌三水不减产。此结果与程维新<sup>[4]</sup>、周殿玺<sup>[1]</sup>结果一致,说明在该类型的土壤上,完全充分灌溉的小麦比适宜灌溉的小麦产量并未增加,因此,春灌二水为经济高效的节水灌溉方式。

表3 不同灌溉制度的产量及产量构成

处 理	穗数/万穗·hm <sup>-2</sup>	穗粒数	千粒重 $m/g$	测定产量/kg·hm <sup>-2</sup>
春无灌水	723.0 b	24.7 b	34.34 c	6543.0 c
春灌一水	786.0 a	26.4 ab	35.37 b	7011.0 b
春灌二水	838.5 a	27.6 a	39.31 a	8155.5 a
春灌三水	832.5 a	27.2 a	39.87 a	7972.5 a

\* a, b, c 代表 0.5% 显著性差异。

### 2.3 不同灌溉制度对叶片光合强度的影响

观察不同灌溉制度的小麦植株光合日变化状况(图1, 2)可知,1996-05-24(灌浆期)由于春灌三水处理的第三水尚未灌溉,因此测定了春无灌水、春灌一水、春灌二水的光合日变化。全天任一时间的光合强度均是春灌二水>春灌一水>春无灌水,春灌一水及春灌二水处理的光合日变化趋势相同,光合日变化近似单峰曲线变化,约中午11:00时出现光合高峰,而春无灌水处理光合日变化近似呈V字型,恰于中午11:00~13:00出现光合低谷。至收获前的06-07,由于春无灌水处理的光合强度极其微弱,无法测定,因此测定了春灌一水、春灌二水及春灌三水处理。由图2可以看出,春灌二水及春灌三水处理光合强度基本相同,春灌二水略微低于春灌三水,而春灌一水处理于中午11:00点左右出现低谷,各处理06-07的光合强度于下午13:00以后迅速下降,这与当日天气骤阴有关。

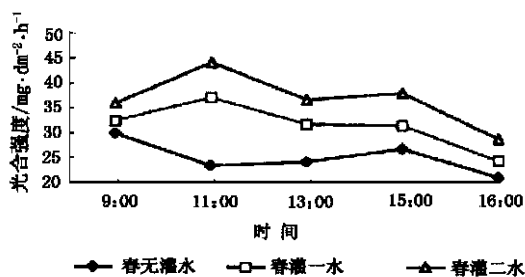


图1 不同水分处理,旗叶灌浆期(05-24)光合日变化

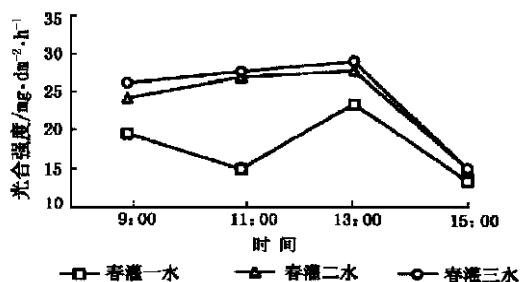


图2 不同水分处理,旗叶收获期(06-07)光合日变化

以上结果说明,小麦籽粒灌浆期间,春灌二水处理的光合强度明显高于春灌一水,春灌一水处理高于春无灌水,但春灌二水和春灌三水处理间,光合强度差异不明显。随水分干旱的加重,小麦表现出明显的光合午休现象,物质生产力下降。

### 2.4 不同灌溉制度对水分利用率的影响

2.4.1 不同灌溉制度的根系分布 在小麦的开花期对春无灌水、春灌二水处理的根量及根系分布状况进行了考查。由表4可见,春无灌水处理的根量低于春灌二水处理,说明土壤干旱影响根量。春无灌水处理和春灌二水处理,0~60 cm土层的根分布量最多,约占总根量的70%

左右,而 60 cm 以下的土体较上层根量显著减少。春无灌水处理 0~ 60 cm 的根量占总根量的比例低于二水处理,而 60~ 100 cm 土层的根量比例略有增高,至 100~ 150 cm 增高尤其明显。

由以上可以看出,开花前的土壤干旱程度影响根量及根系的分布。土壤干旱越严重,深层根量分布越多,对深层土壤水分吸收能力增加,因此缓解了上层土壤干旱对小麦的不利影响。

表 4 不同灌溉定额的小麦根系分布比较\*

土层深度 $d/cm$	春无灌水		春灌二水	
	根重 $m/mg$	占总根量 $w/\%$	根重 $m/mg$	占总根量 $w/\%$
0~ 60	3 87	68 59	4 35	75 13
60~ 100	0 87	15 49	0 86	14 85
100~ 150	0 90	15 92	0 58	10 02
合计	5 64	100	5 79	100

\* 根钻的取样面积为 57 cm<sup>2</sup>; 150 cm 以下的土层根量极少,未测。

**2 4 2 不同灌溉制度的耗水组成** 由表 5 可见,随春季灌溉量的增加,小麦生长期间的总耗水量增加,尤其是增加了灌溉水的消耗。不同灌溉定额间,总耗水量的减少量与灌溉水的增加量并不相等,这主要是由于随灌溉量的减少,小麦对土壤水利用率的提高,以增加土壤水的消耗来补充灌溉水的不足。

表 5 不同灌溉制度的耗水组成

处 理	灌溉水		降 水		土壤水		总耗水 $d/mm$
	$d/mm$	$w/\%$	$d/mm$	$w/\%$	$d/mm$	$w/\%$	
春无灌水	0	0	47.9	15.13	268.7	84.87	316.6
春灌一水	75	20.97	47.9	13.40	234.6	65.62	357.5
春灌二水	150	37.96	47.9	12.12	197.3	49.92	395.2
春灌三水	225	55.19	47.9	11.75	134.8	33.06	407.7

**2 4 3 不同灌溉制度土壤耗水的空间分布** 不同的灌溉制度对土壤水的消耗量不同,对土壤水的空间消耗也不一致。由表 6 可见,土壤水消耗的增加,主要是增加了深层土壤贮水的利用,春灌三水 130 cm 以下的土体水分基本没有消耗,而无水处理消耗量高达 51.1 mm,随灌溉量的减少,土壤深层贮水的利用量增加。

随灌水量的增加,水分边际效益递减,春灌三水的水分利用率较其他灌溉方式降低,春灌二水比春灌三水的水分利用率提高,且不减产,春灌一水比春灌二水的水分边际效益提高(表 7)。因此说明,与春灌二水相比,春灌三水基本不存在增产效应,而且耗水增多,为无效灌水。生产上应根据当地水资源条件,进行一水或二水灌溉。

表6 不同灌溉制度的土壤耗水空间分布

处 理	土 壤 深 度 $d/\text{cm}$				土壤总耗水 $d/\text{mm}$
	0~ 40	40~ 80	80~ 130	130~ 200	
春无灌水	94.1	70.8	52.7	51.1	268.7
春灌一水	90.8	76.4	53.7	13.7	234.6
春灌二水	81.0	57.8	54.7	3.8	197.3
春灌三水	52.7	37.2	44.1	0.8	134.8

表7 不同灌溉制度的水分利用率

处 理	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	耗水量 $d/\text{mm}$	灌溉量 $d/\text{mm}$	水分边际效益 $/\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$	水分利用率 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$
春无灌水	6543.0	316.6	0	-	20.67
春灌一水	7011.0	357.5	75	0.545	19.61
春灌二水	8155.5	395.2	150	0.524	20.64
春灌三水	7972.5	407.7	225	0.405	19.55

### 3 结论

小麦拔节~ 开花期间的土壤干旱主要影响单位面积上的穗数、穗粒数, 开花后持续的干旱主要影响千粒重, 灌浆后期的干旱对产量构成因素基本没有影响。

春灌二水的处理(拔节期和开花期灌水)叶片光合强度明显高于春灌一水, 春灌一水高于春无灌水, 但春灌二水的光合强度与春灌三水的较为接近。春灌二水较春灌三水对开花前的物质再利用量增加, 可以补偿光合物质生产的下降, 满足籽粒灌浆的要求。

随春季灌溉量的减少, 总耗水量降低, 但却增加了对土壤水的利用量, 主要是增加了对土壤深层贮水的利用。

对于壤土类型, 在底墒水充足的条件下, 春灌二水比春灌一水增产, 春灌一水比春灌二水的边际效益高; 春灌二水与春灌三水产量接近, 且水分利用效率提高。因此, 在水资源极紧张的地区, 以春灌一水为宜, 在水资源相对较好的地区, 春灌二水为经济的节水灌溉方式, 春灌第三水基本上属于无效灌溉。

### 参 考 文 献

- 1 程维新. 农田蒸发与作物耗水研究. 北京: 气象出版社, 1993
- 2 兰林旺, 周殿玺. 小麦节水高产研究. 北京: 北京农业大学出版社, 1995
- 3 李德全, 邹琦. 冬小麦抗旱生理特性的研究. 作物学报, 1993, 19(2): 125~ 132
- 4 马瑞昆, 蹇家利, 刘淑贞, 等. 冬小麦推迟春季首次灌水后不同品种的产量及水分利用效率. 华北农学

- 报, 1995, 10(4): 20~ 25
- 5 亓新华, 于振文, 刘芳, 等. 中高产麦田水分变化规律及节水灌溉方案的研究. 山东农业大学学报, 1993, 24(1): 55~ 62
  - 6 山仑. 旱地农业研究的生理生态方向. 山西农业科学, 1990, 4: 31~ 36
  - 7 石元春, 刘昌明, 龚元石主编. 节水农业应用基础研究进展. 北京: 中国农业出版社, 1995
  - 8 石岩, 于振文. 土壤水分对冬小麦耗水规律及产量的影响. 华北农学报, 1997, 12(2): 76~ 81
  - 9 王晨阳, 孙笑梅. 北方麦田水资源现状及其有效利用对策. 河南农业科学, 1997(8): 7~ 11
  - 10 Abo-shetaia A M. Effect of winter withholding irrigation period & N-fertilization on yield of two wheat cultivars. Annuals of Agri Sci, 1995, 40(1): 177~ 793
  - 11 Blum A. The effect of grain number per ear (sink size) on source activity and its water-relations in wheat. J Experimental Botany, 1988, 39(198): 106~ 112

---

## 本刊加入《中国学术期刊(光盘版)》 和“中国期刊网”告作者书

为适应我国信息化建设需要, 扩大作者学术交流渠道, 本刊自 1996 年第 1 期起入编《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”。《中国学术期刊(光盘版)》免收作者论文发表费, 并免费提供作者文章引用统计资料, 作者可直接向设在清华大学的中国学术期刊文献检索咨询总站查询本人在《中国学术期刊(光盘版)》中发表文章的引用情况。如作者不同意将本人文章编入该数据库, 请向本刊声明, 本刊将做适当处理。

《中国农业大学学报》编辑部  
2000 年 4 月