

# 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响

李全起<sup>1,2</sup>, 沈加印<sup>2</sup>, 赵丹丹<sup>2</sup>

(1. 农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453003; 2. 山东农业大学水利土木工程学院, 泰安, 271018)

**摘要:** 为了探讨中国北方冬小麦高效节水灌溉模式, 采用了 3 种灌溉处理: 在拔节期一次灌溉 120 mm, 在拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm 及在拔节期、抽穗期和灌浆期各灌溉 40 mm, 研究了在总灌溉量为 120 mm 的情况下, 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响。结果表明, 在冬小麦的拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm, 显著提高乳熟期和蜡熟期旗叶的净光合速率和蒸腾速率; 在拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm, 显著提高了乳熟期和蜡熟期旗叶的水分利用效率。结果表明, 以拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm 处理的籽粒产量最高, 增产的原因在于穗数的显著增加。综合考虑冬小麦的产量和水分利用效率, 在总灌溉量为 120 mm 的情况下, 以拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm 为宜。

**关键词:** 灌溉, 试验, 水分, 冬小麦, 叶片水分利用效率, 产量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.006

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0033-04

李全起, 沈加印, 赵丹丹. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 33—36.

Li Quanqi, Shen Jiayin, Zhao Dandan. Effect of irrigation frequency on yield and leaf water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 33—36. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

中国华北地区冬小麦生育期间的降水量不足 200 mm, 而高产冬小麦的需水量通常高于 400 mm<sup>[1]</sup>。所以, 为了获得高产和稳产, 冬小麦生育期间必须进行补充灌溉。在华北地区, 冬小麦的灌溉水源主要来自地下水。近年来, 随着冬小麦灌溉面积的不断增加, 多数地区出现了地下水超采现象, 个别地区地下水位下降速率达 1 m/a<sup>[2]</sup>。因此, 为了水资源的可持续利用, 华北井灌区必须实行节水灌溉。

在华北井灌区, 冬小麦生育期间最主要的灌溉方式为漫灌, 灌溉量大, 灌水次数多, 水资源浪费非常严重<sup>[3]</sup>。针对灌溉量大的问题, 前期大量研究发现, 在冬小麦生育期间灌溉 120 mm, 即可获得最佳产量、水分利用效率和经济效益<sup>[4]</sup>。在亏缺灌溉条件下, 冬小麦能够建立合理的群体结构, 提高光能利用率<sup>[5]</sup>。和充分灌溉相比, 亏缺灌溉能够改善冬小麦的营养品质和加工品质<sup>[6]</sup>。灌溉次数对冬小麦的生长和耗水有显著影响<sup>[7]</sup>, Li 等<sup>[8]</sup>研究发现, 随着灌溉次数增多, 在 30 cm 土层范围内, 冬小麦的根长密度显著增加, 而减少灌溉次数, 主要增加了 30 cm 以下的根长密度。尽管国内外对亏缺灌溉和灌溉频率等都有了相关研究, 但亏缺灌溉条件下灌溉频率对冬小麦产量和水分利用效率的影响鲜见报道。本试验以冬小麦

为对象, 研究亏缺灌溉条件下灌溉频率对产量和叶片水分利用效率等的影响, 以期华北地区冬小麦的节水灌溉提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2006—2007 和 2007—2008 年在中国科学院聊城农业生态系统试验站进行。试验地点属暖温带半湿润半干旱气候区, 多年平均降水量为 485 mm, 年内降水分布很不均匀, 70%集中在 6、7、8、9 月份(夏玉米生长期), 而冬小麦生育期间降水量仅为年均量的 30%。2006—2007 和 2007—2008 年冬小麦试验期间的降水量分别为 140 和 276.2 mm。试验地点 0~20 cm 土壤碱解氮、速效钾和速效磷的质量分数分别为 80、150 和 15 mg/kg。冬小麦所用品种为科农 9204, 按 9.3 g/m<sup>2</sup> 于 2006-10-12 和 2007-10-17 进行人工点播。

### 1.2 试验设计

笔者前期大量研究表明<sup>[1,3-4]</sup>, 在冬小麦生育期间灌溉 120 mm 即可获得最佳产量、水分利用效率和经济效益。因此, 在本试验中, 灌溉量全部设为 120 mm。对此 120 mm 灌溉量, 设以下 3 种灌溉处理: 在拔节期一次灌溉 120 mm (T1)、在拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm (T2)、在拔节期、抽穗期和灌浆期各灌溉 40 mm (T3)。灌溉时, 用自来水表严格控制水量。2007 年, 拔节期、抽穗期和灌浆期分别为 4 月 7 日、5 月 1 日和 5 月 17 日; 2008 年, 分别为 4 月 9 日、4 月 29 日和 5 月 21 日。

每个试验小区的面积为 16 m<sup>2</sup>, 每年重复 3 次, 随机区组排列, 共 9 个小区。小区与小区之间留 1.5 m 隔离带, 以减少相邻小区间灌溉的影响。

收稿日期: 2010-09-27 修订日期: 2011-03-08

基金项目: 山东省高等学校科技计划资助项目 (J09LC03); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (BS2009NY008); 农业部作物需水与调控重点开放实验室开放课题资助项目 (CWRR201003)

作者简介: 李全起 (1976—), 男, 山东昌乐人, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程研究。泰安 山东农业大学水利土木工程学院 271018。

Email: quanqili@sda.edu.cn

### 1.3 项目测定与计算

#### 1.3.1 气体交换参数

包括净光合速率 ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )、蒸腾速率 ( $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )、大气  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_a$ ,  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) 等, 采用 CID 公司生产的 CB-1102 光合测定系统进行测定。在冬小麦的开花期、乳熟期和蜡熟期选择典型晴天, 于 9:00—11:00 之间测定旗叶。气孔限制值 ( $L_s$ ) 采用以下公式计算<sup>[9]</sup>

$$L_s = (C_a - C_i) / C_a \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $L_s$  为气孔限制值, %;  $C_a$  为大气  $\text{CO}_2$  浓度,  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ;  $C_i$  为胞间  $\text{CO}_2$  浓度,  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

#### 1.3.2 叶片水分利用效率

用叶片通过蒸腾消耗一定量的  $\text{H}_2\text{O}$  所同化的  $\text{CO}_2$  量来表示, 计算公式如下<sup>[10-11]</sup>

$$WUE = P_n / T_r \quad (2)$$

式中,  $P_n$  为净光合速率,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;  $T_r$  为蒸腾速率,  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

#### 1.3.3 产量及产量构成因素

收获时, 每小区选有代表性的  $2 \text{ m}^2$  调查穗数和产量。另取 20 株进行室内考种, 考察穗粒数和千粒质量。

### 1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS (data processing system) 统计分析系统进行数据处理和统计分析, 采用 LSD 法进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 光合速率和蒸腾速率

灌溉频率对冬小麦旗叶净光合速率的影响因生育期的不同而表现出差异 (表 1)。在开花期, T1、T2 和 T3 处理间无显著差异; 随冬小麦生育期的推移, 在乳熟期, T2 处理较 T3 处理的净光合速率有显著提高, T3 处理与 T1 处理的差异也达到显著水平; 在蜡熟期, T2 处理的净光合速率显著提高, 其次为 T1 处理, 最低的为 T3 处理。表明在灌溉量为 120 mm 的条件下, 拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm, 可使冬小麦在生育后期维持较高的净光合速率。

灌溉频率对蒸腾速率的影响与净光合速率基本一致, 在乳熟期和蜡熟期, T2 处理的蒸腾速率显著高于 T1 处理和 T3 处理。

表 1 灌溉频率对冬小麦旗叶净光合速率和蒸腾速率的影响  
Table 1 Effect of irrigation frequency on net photosynthesis rate and transpiration rate of winter wheat flag leaves

处理	净光合速率/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			蒸腾速率/ $(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		
	开花期	乳熟期	蜡熟期	开花期	乳熟期	蜡熟期
T1	19.1a	15.1c	8.0b	7.5ab	7.1b	4.8b
T2	20.7a	16.5a	8.8a	7.9a	7.4a	5.1a
T3	18.7a	15.6b	7.2c	7.2b	6.9c	4.6c

注: 表中数据为 2006—2007 和 2007—2008 2 个生长季的平均值。数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

### 2.2 气孔限制值

冬小麦叶片光合作用主要受气孔因素和非气孔因素影响, 在不同的条件下占主导地位的因素不同。由图 1

可以看出, 在开花期和乳熟期, T2 处理的气孔限制值低于 T1 处理和 T3 处理, 这主要是由于在拔节期和抽穗期各灌溉 60 mm, 可使冬小麦旗叶的胞间  $\text{CO}_2$  浓度上升, 增加了光合作用的碳源, 使气孔限制值减小, 从而减少了气孔因素对光合作用的限制, 提高了净光合速率。在蜡熟期, T2 处理的气孔限制值显著高于 T1 处理和 T3 处理。说明在蜡熟期, T2 处理净光合速率的提高主要不是减少了气孔因素对光合作用的限制, 而主要是由于灌溉频率改善了叶片的光合能力, 提高了胞间  $\text{CO}_2$  的利用, 使胞间  $\text{CO}_2$  浓度降低, 从而减少了非气孔因素对光合作用的限制, 使净光合速率提高。

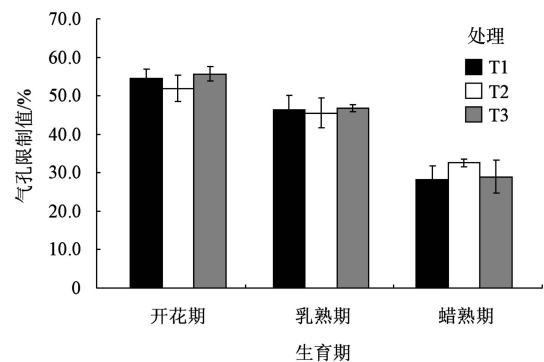


图 1 灌溉频率对冬小麦旗叶气孔限制值的影响

Fig.1 Effect of irrigation frequency on stomatal limit value of winter wheat flag leaves

### 2.3 叶片水分利用效率

叶片水分利用效率是光合速率和蒸腾速率的比值 ( $\text{CO}_2 \mu\text{mol}/\text{H}_2\text{O mmol}$ ), 为水分利用效率的理论值。由图 2 可以看出, 在冬小麦的不同生育时期, 灌溉频率对叶片水分利用效率的影响不同。在开花期, 虽然 T2 处理的叶片水分利用效率最高, 但与 T1 处理和 T3 处理之间没有显著性差异; 而在乳熟期和蜡熟期, T2 处理的叶片水分利用效率则显著高于 T1 处理和 T3 处理。其原因可能是由于光合速率和蒸腾速率对干旱的响应程度不同而造成的, 蒸腾速率对干旱的响应程度高于光合速率, 光合速率即使在适度干旱条件下仍能保持相对较高水平<sup>[12]</sup>。由于灌溉频率在开花期、乳熟期和蜡熟期创造了

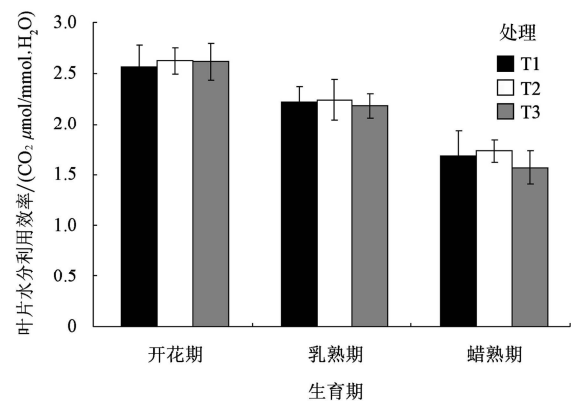


图 2 灌溉频率对冬小麦叶片水分利用效率的影响

Fig.2 Effect of irrigation frequency on leaf water use efficiency of winter wheat flag leaves

不同的土壤水分条件,而光合速率和蒸腾速率对干旱的响应程度不同,从而造成了灌溉频率对叶片水分利用效率的影响因生育时期不同而不同。

#### 2.4 产量及产量构成因素

灌溉频率对冬小麦产量及产量构成因素有显著影响(表2)。2个生长季中,以T2处理的产量最高,2006—2007年,T2处理的产量显著高于T1处理和T3处理;2007—2008年,T2处理的产量显著高于T1处理,和T3处理无显著性差异。在产量构成因素中,T2处理显著提高了穗数,对穗粒数没有显著影响。2年中,以T2处理的千粒质量最低,2007—2008年,T2与T1处理的千粒质量显著低于T3处理。表明在拔节期和抽穗期各灌溉60 mm,增产的主要原因是提高了穗数,以穗数弥补千粒质量的降低。

表2 灌溉频率对冬小麦产量及产量构成因素的影响

Table 2 Effect of irrigation frequency on grain yield and yield components of winter wheat

处理	穗数 (穗·m <sup>-2</sup> )	穗粒数 (粒·穗 <sup>-1</sup> )	千粒质量/ g	产量/ (g·m <sup>-2</sup> )
2006— 2007年	T1	556.3b	30.7a	39.1a
	T2	580.4a	29.4a	37.9a
	T3	528.3c	31.6a	39.5a
2007— 2008年	T1	556.3b	29.2ab	40.2b
	T2	658.1a	30.0a	39.3b
	T3	547.5bc	30.7a	42.2a

注:数据后不同字母表示同一生长季内处理间差异达5%显著水平。

### 3 结 论

本研究结果表明,在总灌溉量为120 mm的情况下,于冬小麦的拔节期和抽穗期各灌溉60 mm,显著提高了乳熟期和蜡熟期旗叶的净光合速率和蒸腾速率。在乳熟期,旗叶净光合速率提高的主要原因在于减少了光合的气孔限制;而在蜡熟期,则主要减少了光合的非气孔限制。拔节期和抽穗期各灌溉60 mm,显著提高了冬小麦的叶片水分利用效率和籽粒产量,增产的原因在于穗数的显著增加。统筹考虑冬小麦的水分利用效率和籽粒产量,以拔节期和抽穗期各灌溉60 mm为宜。

#### [参 考 文 献]

- [1] Li Quanqi, Chen Yuhai, Liu Mengyu, et al. Effects of irrigation and planting patterns on radiation use efficiency and yield of winter wheat in North China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 469—476.
- [2] Xia Jun, Liu Mengyu, Jia Shaofeng. Water security problem in North China: research and perspective[J]. Pedosphere, 2005, 15(5): 563—575.
- [3] 李全起,陈雨海,周勋波,等.灌溉和种植模式对冬小麦播前土壤含水量的消耗及水分利用效率的影响[J].作物学报,2009,35(1): 104—109.

Li Quanqi, Chen Yuhai, Zhou Xunbo, et al. Effects of irrigation and planting patterns on consumption of soil moisture before sowing and water use efficiency in winter

wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1): 104—109. (in Chinese with English abstract)

- [4] 李全起,陈雨海,周勋波,等.不同种植模式麦田水资源利用率及边际效益分析[J].农业机械学报,2010,41(7): 90—95.
- Li Quanqi, Chen Yuhai, Zhou Xunbo, et al. Effects of different planting patterns on water use efficiency and marginal profits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 90—95. (in Chinese with English abstract)
- [5] Han Huifang, Li Zengjia, Ning Tangyuan, et al. Radiation use efficiency and yield of winter wheat under deficit irrigation in North China[J]. Plant Soil and Environment, 2008, 54(7): 313—319.
- [6] 韩惠芳,李全起,董宝娣,等.灌溉频次和时期对冬小麦籽粒产量及品质特性的影响[J].生态学报,2010,30(6): 1548—1555.
- Han Huifang, Li Quanqi, Dong Baodi, et al. Effects of irrigation frequency and stages on grain yield and quality characteristics of winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1548—1555. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吕金印,山仑,高俊凤.非充分灌溉及其生理基础[J].西北植物学报,2002,22(6): 1512—1517.
- Lü Jinyin, Shan Lun, Gao Junfeng. Unsufficient irrigation and its physiological bases[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(6): 1215—1517. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
- [9] 姚素梅,刘明久,茹振钢,等.ALA对冬小麦叶片气体交换和水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1): 242—246.
- Yao Sumei, Liu Mingjiu, Ru Zhengang, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid on leaf gas exchange and water use efficiency in winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 242—246. (in Chinese with English abstract)
- [10] 武兰芳,欧阳竹.不同种植密度下两种穗型小麦叶片光合特性的变化[J].麦类作物学报,2008,28(4): 618—625.
- Wu Lanfang, Ouyang Zhu. Photosynthesis of two spike-type cultivars of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under different sowing rates[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(4): 618—615. (in Chinese with English abstract)
- [11] 彭世彰,徐俊增,黄乾,等.控制灌溉水稻叶片的水分利用效率试验研究[J].农业工程学报,2006,22(11): 47—52.
- Peng Shizhang, Xu Junzeng, Huang Qian, et al. Experimental study on leaf water use efficiency of paddy rice under controlled irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [12] 康绍忠,杜太生,孙景生,等.基于生命需水信息的作物高产节水调控理论与技术[J].水利学报,2007,38(6):

661—667.

Kang Shaozhong, Du Taisheng, Sun Jingsheng, et al. Theory and technology of improving irrigation water use efficiency

based on crop growing water demand information[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 661—667. (in Chinese with English abstract)

## Effect of irrigation frequency on yield and leaf water use efficiency of winter wheat

Li Quanqi<sup>1,2</sup>, Shen Jiayin<sup>2</sup>, Zhao Dandan<sup>2</sup>

(1. Key lab for crop water requirement and regulation of ministry of agriculture, Xinxiang 453003, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** In order to investigate the optimal water-saving and high-efficient irrigation pattern of winter wheat in North China, 3 irrigation treatments, irrigating 120 mm only at jointing stage, irrigating 60 mm each at jointing and heading stages, and irrigating 40 mm each at jointing, heading, and milking stages were conducted to study the effect of irrigation frequency on yield and leaf water use efficiency of winter wheat in Huabei Plain of North China. The results showed that under the condition of irrigating 120 mm during the growing season of winter wheat, the treatment which irrigated 60 mm at jointing and heading stages, respectively, the net photosynthesis rate and transpiration rate of winter wheat flag leaves significantly increased at milky stage and dough stage. With irrigating 60 mm at jointing and heading stages, respectively, the water use efficiency in flag leaves was significantly improved at milky and dough stages. The results indicated that irrigating 60 mm at jointing and heading stages during the winter wheat growing season, grain yield was the highest, which can be attributed to increased spike number. Under the condition of irrigation amount 120 mm at the growing season of winter wheat in North China, it was suggest that winter wheat should be irrigated 60 mm at jointing and heading stages to achieve reasonable water use efficiency and grain yield.

**Key words:** irrigation, experiments, water, winter wheat, leaf water use efficiency, grain yield