

# 不同土层测墒补灌对冬小麦耗水特性及产量的影响 \*

易立攀<sup>1</sup> 于振文<sup>1</sup> 张永丽<sup>1\*\*</sup> 王东<sup>1</sup> 石玉<sup>1</sup> 赵俊晔<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>山东农业大学农业部作物生理生态与耕作重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>2</sup>中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081)

**摘要** 于2010—2011年选用高产小麦品种济麦22进行大田试验, 设置0~20 cm( $W_1$ )、0~40 cm( $W_2$ )、0~60 cm( $W_3$ )和0~140 cm( $W_4$ )4个测墒补灌土层, 于越冬期(目标相对含水量均为75%)、拔节期(目标相对含水量均为70%)和开花期(目标相对含水量均为70%)进行测墒补灌, 以全生育期不灌水处理( $W_0$ )为对照, 研究不同土层测墒补灌对冬小麦耗水特性及产量的影响。结果表明: 小麦越冬期、拔节期和开花期补充灌水量为 $W_3 > W_2 > W_1$ ,  $W_4$ 处理小麦越冬期和拔节期补充灌水量较少, 但开花期补灌量显著高于其他处理; 全生育期补灌量占总耗水量的比例为 $W_4, W_3 > W_2 > W_1$ 。土壤水消耗量占总耗水量的比例为 $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$ ; 随测墒补灌土层深度的增加, 土壤水消耗量占总耗水量的比例减少;  $W_2$ 处理80~140 cm和160~200 cm土层土壤水消耗量显著高于 $W_3$ 和 $W_4$ 处理。各处理的总补灌量为 $W_3 > W_4 > W_2 > W_1$ ; 耘粒产量为 $W_2, W_3, W_4 > W_1 > W_0$ ,  $W_2, W_3, W_4$ 间无显著差异; 水分利用效率为 $W_2, W_4 > W_0, W_1 > W_3$ ,  $W_2$ 与 $W_4$ 之间无显著差异。综合考虑灌水量、籽粒产量和水分利用效率,  $W_2$ 处理是本试验条件下的最佳处理, 即以0~40 cm土层测墒补灌效果最优。

**关键词** 冬小麦 测墒补灌 耗水特性 穗粒产量

文章编号 1001-9332(2013)05-1361-06 中图分类号 S152.7, S512.1 文献标识码 A

**Effects of supplemental irrigation based on the measurement of moisture content in different soil layers on the water consumption characteristics and grain yield of winter wheat.** YI Lipan<sup>1</sup>, YU Zhen-wen<sup>1</sup>, ZHANG Yong-li<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, ZHAO Jun-ye<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; <sup>2</sup>Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(5): 1361–1366.

**Abstract:** In 2010–2011, a field experiment with high-yielding winter wheat cultivar Jimai 22 was conducted to study the effects of supplemental irrigation based on the measurement of moisture content in different soil layers on the water consumption characteristics and grain yield of winter wheat. Four soil layers (0–20 cm,  $W_1$ ; 0–40 cm,  $W_2$ ; 0–60 cm,  $W_3$ ; and 0–140 cm,  $W_4$ ) were designed to make the supplemental irrigation at wintering stage (target soil relative moisture content = 75%), jointing stage (target soil relative moisture content = 70%), and anthesis stage (target soil relative moisture content = 70%), taking no irrigation ( $W_0$ ) during the whole growth season as the control. At the wintering, jointing, and anthesis stages, the required irrigation amount followed the order of  $W_3 > W_2 > W_1$ . Treatment  $W_4$  required smaller irrigation amount at wintering and jointing stages, but significantly higher one at anthesis stage than the other treatments. The proportion of the irrigation amount relative to the total water consumption over the entire growth season followed the sequence of  $W_4, W_3 > W_2 > W_1$ . By contrast, the proportion of soil water consumption relative to the total water consumption followed the trend of  $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$ . With the increase of the test soil depths, the soil water utilization ratio decreased. The water consumption in 80–140 cm and 160–200 cm soil layers was significantly higher in  $W_2$  than in  $W_3$  and  $W_4$ . The required total irrigation amount was in the order of  $W_3 > W_4 > W_2 > W_1$ , the grain yield was in the order of  $W_2, W_3, W_4 > W_1 > W_0$ , and the water use efficiency followed the order of  $W_2, W_4 > W_0, W_1 > W_3$ . To con-

\* 国家自然科学基金项目(31171498)和农业部现代小麦产业技术体系项目(CARS-3-1-19)资助。

\*\* 通讯作者. E-mail: zhangyl@sdau.edu.cn

2012-09-07 收稿, 2013-02-26 接受.

sider the irrigation amount, grain yield, and water use efficiency comprehensively, treatment W<sub>2</sub> under our experimental condition could be the optimal treatment, *i.e.*, the required amount of supplemental irrigation based on the measurement of the moisture content in 0~40 cm soil layer should be feasible for the local winter wheat production.

**Key words:** winter wheat; supplemental irrigation based on soil moisture measurement; water consumption characteristics; grain yield.

黄淮海平原是我国重要的粮食生产基地,耕地面积和粮食产量分别占全国的21%和26%<sup>[1]</sup>,而水资源量仅占全国的7.7%,人均水资源量为500 m<sup>3</sup>,仅占全国的1/5<sup>[2]</sup>。因此,发展小麦节水栽培对保证该区域小麦生产可持续发展具有重要意义。

优化灌溉制度,可提高小麦产量和水分利用效率,前人就灌水时期、灌水次数及灌水量对小麦产量及耗水特性的影响做了较多研究<sup>[3~6]</sup>。有研究表明,拔节至抽穗是冬小麦需水关键期,此期土壤水分亏缺可导致小麦产量显著降低<sup>[7~10]</sup>。小麦全生育期灌溉越冬水、拔节水和开花水可获得较高的经济产量和水分利用效率<sup>[11]</sup>。在底墒充足的条件下,拔节水和开花水分别灌50 mm即可实现冬小麦高产与水分高效利用的统一<sup>[12]</sup>。也有研究表明,麦田的土壤水分含量应保持在田间持水量的60%~75%<sup>[13]</sup>,冬小麦拔节至抽穗期的水分胁迫指标为田间持水量的65%<sup>[14]</sup>。冬小麦在拔节期和开花期进行测墒补灌,使0~140 cm土层土壤平均相对含水量均达到70%,可获得较高的籽粒产量和水分利用效率<sup>[15]</sup>。但目前,依据不同土层深度测墒来计算灌水量的研究鲜有报道。本试验在高产大田条件下研究不同土层深度测墒补灌对小麦耗水特性及产量的影响,以期为冬小麦节水高产栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验于2010—2011年冬小麦生长季在山东兗州小孟镇史家王子村(35°41' N, 116°41' E)进行。供试材料为高产小麦品种济麦22。试验田土壤类型为棕壤,播种前0~20 cm土层土壤含有机质16.0 g·kg<sup>-1</sup>、全氮1.0 g·kg<sup>-1</sup>、水解氮100.41 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷25.46 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾126.23 mg·kg<sup>-1</sup>。小麦播种前不浇底墒水,用环刀取0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120和120~140 cm土层原状土壤,测定田间持水量和土壤容重。上述各土层土壤田间持水量分别为28.3%、25.2%、27.3%、26.9%、26.4%、25.2%和

25.6%,土壤容重分别为1.44、1.49、1.48、1.48、1.49、1.51和1.52 g·cm<sup>-3</sup>。本区域小麦生育期间降水量90~300 mm,冬小麦需水量400~600 mm。本生长季降水量146.6 mm,其中,播种至越冬期2.2 mm、越冬至返青期7.4 mm、返青至拔节期39.5 mm、拔节至开花期74 mm、开花至成熟期23.5 mm,属欠水年份。

设置0~20 cm(W<sub>1</sub>)、0~40 cm(W<sub>2</sub>)、0~60 cm(W<sub>3</sub>)和0~140 cm(W<sub>4</sub>)4个土层,测墒计算补灌水量,均于越冬期、拔节期和开花期进行测墒补灌,土壤相对含水量分别补灌至75%、70%和70%,以全生育期不灌水处理(W<sub>0</sub>)为对照。于越冬期、拔节期和开花期补充灌水前测定土壤含水量,依据公式 $m=10\rho bH(\beta_i-\beta_j)$ 计算需要补充的灌水量<sup>[16]</sup>。式中: $m$ 为灌水量(mm); $H$ 为该时段土层深度(cm); $\rho b$ 为土层内土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>); $\beta_i$ 为设计含水量(田间持水量乘以设计相对含水量); $\beta_j$ 为补灌前土壤质量含水量。补灌时用水龙带从井口接水均匀灌溉试验区,水龙带出水口安装水表控制灌水量。

小区面积4 m×4 m=16 m<sup>2</sup>,小区间设置1 m隔离区,随机区组排列,3次重复。播种前底施N 105 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 150 kg·hm<sup>-2</sup>,拔节期追施N 135 kg·hm<sup>-2</sup>。氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为磷酸二铵(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%, N 18%),钾肥为氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)。2010年10月8日播种,4叶期定苗,基本苗为180株·m<sup>-2</sup>,其他管理措施同一般高产田。

### 1.2 测定项目与方法

**1.2.1 土壤含水量的测定** 于小麦播种前(2010年10月4日)、越冬期(2010年12月3日)、返青期(2011年2月25日)、拔节期(2011年4月15日)、开花期(2011年5月13日)、成熟期(2011年6月13日)测定0~200 cm土层土壤含水量。用土钻取0~200 cm土层土样,每20 cm一层,用烘干法测定土壤含水量。计算公式为:土壤质量含水量(%)=(土壤鲜质量-土壤干质量)/土壤干质量×100%,土壤相对含水量(%)=土壤质量含水量/田间持水量

$\times 100\%$ , 田间持水量用环刀法测定<sup>[17]</sup>.

### 1.2.2 农田耗水量的计算

根据土壤含水量计算农田耗水量<sup>[18]</sup>, 计算公式为:

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P_0 + K$$

式中:  $ET_{1-2}$  为阶段耗水量 (mm);  $i$  为土层编号;  $n$  为总土层数;  $\gamma_i$  为第  $i$  层土壤干容重 ( $g \cdot cm^{-3}$ );  $H_i$  为第  $i$  层土壤厚度 (cm);  $\theta_{i1}$  和  $\theta_{i2}$  分别为第  $i$  层土壤时段初与时段末的含水量, 以占干土质量的百分数计;  $M$  为时段内的灌水量 (mm);  $P_0$  为有效降水量 (mm);  $K$  为时段内地下水补给量 (mm), 当地下水埋深大于 2.5 m 时,  $K$  值可以忽略不计, 本试验的地下水埋深在 5 m 以下, 故地下水补给量可视为 0.

日耗水量=各生育阶段麦田耗水量/生育阶段天数

耗水模系数=各生育阶段麦田耗水量/麦田总耗水量

**1.2.3 水分利用效率和灌溉效益的计算** 水分利用效率 ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ ) 计算公式为:  $WUE = Y/ET_a$ ; 灌溉水利用效率 ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ ) 计算公式为:  $IWUE = Y/I$ ; 灌溉效益 ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ ) 计算公式为:  $IB = \Delta Y/I$ . 式中:  $Y$  为籽粒产量 ( $kg \cdot hm^{-2}$ );  $\Delta Y$  为灌溉后增加的产量 ( $kg \cdot hm^{-2}$ );  $ET_a$  为小麦生育期间总耗水量 (mm);  $I$  为补灌量 (mm).

**1.2.4 粒粒产量测定** 于小麦成熟后收获, 脱粒、自然风干后称量 (含水量 12.5%), 折算成公顷产量.

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据处理和绘图, 采用 DPS 7.05 统计分析软件进行差异显著性检验 (LSD 法,  $\alpha=0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理的补灌量

由表 1 可知, 依据不同土层深度的土壤含水量和目标含水量计算的补充灌水量不同.  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  处理越冬期和拔节期的补灌量及全生育期总补灌量均随测墒补灌土层深度的增加而增加, 测墒补灌土层为 0~140 cm 的  $W_4$  处理补灌量低于 0~60 cm 的  $W_3$  处理. 各处理开花期补灌量随土层深度的增加而增加, 说明在 0~60 cm 深度土层范围内, 土层越深, 小麦越冬期、拔节期和开花期补灌水量越多; 但测墒补灌土层为 0~140 cm 时, 小麦生育前期补灌量较少, 开花期补灌量显著增加.

表 1 不同处理不同生育时期灌水量及全生育期总灌水量  
Table 1 Irrigation amount of different treatments during the whole growth and different growth stages (mm)

处理 Treatment	越冬水 Water at wintering stage	拔节水 Water at jointing stage	开花水 Water at anthesis stage	总灌水量 Total irrigation amount
$W_0$	0	0	0	0
$W_1$	20.28c	34.88d	0	55.16d
$W_2$	28.40b	43.99c	8.58c	80.96c
$W_3$	32.67a	77.22a	25.34b	135.23a
$W_4$	8.12d	72.12b	37.26a	117.49b

不同小写字母表示同列不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

### 2.2 不同处理对 0~200 cm 各土层土壤水消耗量的影响

由图 1 可以看出, 各处理 0~160 cm 土层土壤水消耗量较多, 160~200 cm 土层土壤水消耗量较少, 说明小麦主要消耗 0~160 cm 土层土壤水.  $W_2$  处理 0~60 cm 土层土壤水消耗量显著低于  $W_0$ 、 $W_1$  和  $W_3$  处理, 80~140 cm 和 160~200 cm 土层土壤水消耗量显著高于  $W_3$  和  $W_4$  处理;  $W_1$  处理 80~200 cm 土层土壤水消耗量显著高于  $W_3$  和  $W_4$  处理. 说明依据浅土层测墒补灌有利于小麦对深层土壤水的利用.

### 2.3 不同处理对冬小麦耗水量及其占总耗水量比例的影响

由表 2 可以看出, 各补灌处理冬小麦全生育期总耗水量高于不灌水处理. 各补灌处理间比较, 补灌量占总耗水量的比例为  $W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ , 土壤水消耗量占总耗水量的比例为  $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$ . 说明在一定的目标含水量条件下, 依据浅土层测墒补灌, 有利于冬小麦对土壤水的吸收利用.

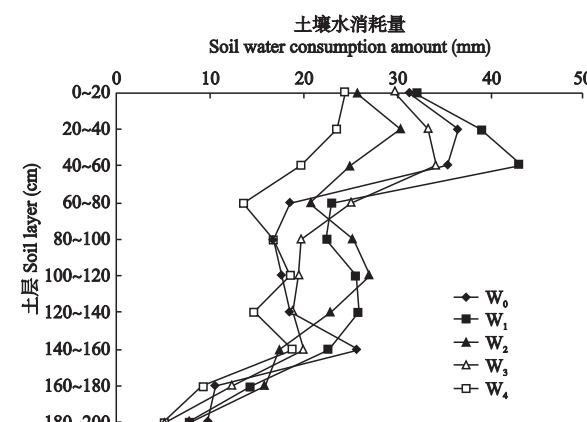


图 1 不同处理 0~200 cm 各土层土壤水消耗量

Fig. 1 Soil water consumption amount in 0~200 cm soil layer under different treatments.

表 2 不同处理冬小麦耗水量及其占总耗水量的比例

Table 2 Water consumption and their percentage to total water consumption under different treatments

处理 Treatment	总耗水量 Water consumption amount (mm)		灌溉水 Irrigation 数量 Amount (mm)		降水 Precipitation 数量 Amount (mm)		土壤水 Soil water 数量 Amount (mm)	
	比例 Percentage (%)		比例 Percentage (%)		比例 Percentage (%)		比例 Percentage (%)	
W <sub>0</sub>	367.23d	0	0		146.6	39.9a	220.63b	60.1a
W <sub>1</sub>	457.43b	55.15d	12.1c		146.6	32.1c	255.68a	55.9b
W <sub>2</sub>	445.58bc	80.96c	18.2b		146.6	32.9c	218.02b	48.9c
W <sub>3</sub>	500.06a	135.23a	27.0a		146.6	29.3d	218.23b	43.6d
W <sub>4</sub>	427.74c	117.50b	27.5a		146.6	34.3b	163.64c	38.3e

表 3 不同处理的阶段耗水量(CA)、耗水模系数(CP)和日耗水量(CD)

Table 3 Water consumption amount (CA), water consumption percentage (CP) and diurnal water consumption amount (CD) at different growth stages under different treatments

处理 Treatment	播种前-越冬期 Sowing to wintering stage			越冬期-返青期 Wintering to returning green stage			返青期-拔节期 Returning green to jointing stage			拔节期-开花期 Jointing to anthesis stage			开花期-成熟期 Anthesis to maturity stage		
	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)
	W <sub>0</sub>	32.7	0.58	8.9	17.49d	0.21	4.8	113.26c	2.36	30.8	110.54c	3.95	30.1	93.23c	3.11
W <sub>1</sub>	32.7	0.58	7.2	40.33a	0.47	8.8	126.95b	2.64	27.8	122.99b	4.39	26.9	134.45b	4.48	29.4
W <sub>2</sub>	32.7	0.58	7.3	32.89b	0.39	7.4	142.62a	2.97	32.0	135.05a	4.82	30.3	102.32d	3.41	23.0
W <sub>3</sub>	32.7	0.58	6.5	24.54c	0.29	4.9	142.49a	2.97	28.5	139.67a	4.99	27.9	160.67a	5.36	32.1
W <sub>4</sub>	32.7	0.58	7.7	32.56b	0.38	7.6	123.78b	2.58	28.9	123.69b	4.42	28.9	115c	3.83	26.9

## 2.4 不同处理对冬小麦阶段耗水量、耗水模系数和日耗水量的影响

由表3可以看出, W<sub>0</sub>处理各生育阶段的耗水量均低于W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>和W<sub>4</sub>处理, 表明补灌增加了冬小麦各生育阶段的耗水量。越冬期至返青期, 冬小麦阶段耗水量、日耗水量和耗水模系数均为W<sub>1</sub>>W<sub>2</sub>>W<sub>3</sub>, W<sub>2</sub>与W<sub>4</sub>处理间无显著差异; 返青至拔节期和拔节至开花期阶段的耗水量均为W<sub>1</sub>、W<sub>4</sub><W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>; 开花至成熟期阶段耗水量为W<sub>2</sub><W<sub>4</sub><W<sub>1</sub><W<sub>3</sub>。说明依据0~40 cm土层测墒补灌促进了返青至开花期植株对水分的消耗, 依据0~60 cm土层测墒补灌促进了返青至成熟期植株对水分的消耗, 依据0~140 cm土层测墒补灌不利于生育中后期植株对水分的利用。

## 2.5 不同处理对冬小麦籽粒产量和水分利用效率的影响

W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>和W<sub>4</sub>处理的籽粒产量无显著差异, 均显著高于W<sub>0</sub>和W<sub>1</sub>处理; W<sub>2</sub>的水分利用效率与W<sub>4</sub>处理无显著差异, 均高于W<sub>0</sub>、W<sub>1</sub>和W<sub>3</sub>处理, W<sub>1</sub>处理显著高于W<sub>3</sub>处理(表4)。说明测墒补灌土层为0~40 cm的W<sub>2</sub>处理可显著提高小麦籽粒产量和水分利用效率, 而且灌溉水利用效率和灌溉效益也较高, 是本试验条件下的最优处理。其主要原因是该处理促

表 4 不同处理冬小麦籽粒产量、水分利用效率、灌溉水利用效率和灌溉效益

Table 4 Grain yield, water use efficiency, irrigation water use efficiency and irrigation benefit of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg·hm <sup>-2</sup> )		水分利用 效率 Water use efficiency (kg·hm <sup>-2</sup> · mm <sup>-1</sup> )		灌溉水利用 效率 Irrigation water use efficiency (kg·hm <sup>-2</sup> · mm <sup>-1</sup> )		灌溉效益 Irrigation benefit (kg·hm <sup>-2</sup> · mm <sup>-1</sup> )		
	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)	CA (mm)	CD (mm)	CP (%)
W <sub>0</sub>	7700c			20.97b					
W <sub>1</sub>	9431b			20.62b			171.00a		31.39a
W <sub>2</sub>	10075a			22.61a			124.44b		29.33b
W <sub>3</sub>	9872a			19.74c			73.01d		16.06d
W <sub>4</sub>	9874a			23.08a			84.04c		18.50c

进了小麦对80~140 cm和160~200 cm土层土壤水的利用, 提高了土壤水消耗量占总耗水量的比例, 但补灌量低于依据0~60 cm和0~140 cm土层测墒补灌的处理, 总耗水量亦较低。

## 3 讨 论

本研究依据0~40 cm土层测墒补灌, 在小麦全生育期降水146.6 mm条件下, 总补灌量80.96 mm, 籽粒产量达10075 kg·hm<sup>-2</sup>, 比依据0~140 cm土层测墒补灌减少灌水36.53 mm, 籽粒产量无显著差异, 灌溉水利用效率和灌溉效益显著提高。前人在小

麦生育期间降水 130 mm 条件下, 拔节期和开花期各灌水 60 mm, 获得籽粒产量 7416.4 kg · hm<sup>-2</sup><sup>[19]</sup>。Chen 等<sup>[20]</sup>在小麦生育期间降水 214.1 mm、总灌水量 150 mm 条件下, 获得籽粒产量 7996.5 kg · hm<sup>-2</sup>。本研究以较少的补灌量获得较高的籽粒产量, 主要是因为依据测定的土壤墒情来确定补灌水量, 充分利用了土壤贮水和降水, 实现了小麦节水高产。且依据较浅土层(0~40 cm)比依据较深土层(0~140 cm)测墒补灌, 在生产中更易实现, 为小麦节水高产栽培提供了新途径。本研究与前人研究结果存在差异与不同地区生态条件、降水量及其在小麦不同生育阶段的分布有关。

本研究中, 依据 0~40 cm 土层测墒补灌比依据 0~140 cm 测墒补灌, 减少了总补灌量, 促进了对 80~140 cm 和 160~200 cm 土层土壤水的消耗, 增加了土壤水消耗量占总耗水量的比例。前人在定量灌溉条件下对土壤水消耗的研究结果表明, 拔节期一次性供水 75 mm 比返青和拔节期各供水 37.5 mm 促进了根系下扎, 较多地利用了深层土壤水分<sup>[21]</sup>。拔节期灌水 750 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup> 对 100 cm 以下土层土壤水分的利用显著高于起身水、孕穗水、灌浆水各灌 750 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup> 的处理<sup>[22]</sup>。随灌水量增加, 土壤水消耗量、土壤水利用率及深层土壤水分利用量显著下降<sup>[10,23]</sup>。与前人研究相比, 本试验在测墒补灌的条件下进行研究, 明确了依据浅土层测墒补灌可促进对深层土壤水分的利用, 节约灌溉水, 为充分利用土壤贮水、实现节水高产提供了依据。

本研究中, 总补灌量随测墒补灌土层的加深先升高后降低, 以依据 0~60 cm 土层测墒补灌的处理最高, 为 135.23 mm; 但籽粒产量和水分利用效率以依据 0~40 cm 土层测墒补灌的处理最高, 之后籽粒产量随补灌量增加无显著变化, 水分利用效率无显著增加。Huang 等<sup>[24]</sup>研究指出, 随灌水量增加, 小麦籽粒产量和水分利用效率均显著增加, 灌水量最多的处理获得的籽粒产量和水分利用效率最高。也有研究表明, 在一定范围内, 籽粒产量随灌水量的增加而增加, 达到一定数值后再增加灌水量, 产量下降<sup>[25~27]</sup>。本试验依据不同土层深度测墒调节补灌量, 依据 0~40 cm 土层测墒补灌促进了对 80~140 cm 和 160~200 cm 较深土层土壤水的利用, 补灌量为 80.96 mm 即获得最高籽粒产量和水分利用效率; 再增加测墒补灌土层深度, 对土壤水的利用能力降低, 虽补灌量增加, 但籽粒产量与依据 0~40 cm 土层测墒补灌无显著差异。本研究籽粒产量随灌

水量的变化与前人研究结果存在差异, 这与不同试验处理所用品种和灌水量不同等因素有关。综合考虑补灌量、籽粒产量和水分利用效率, W<sub>2</sub> 处理是本试验条件下的最佳处理, 以 0~40 cm 土层测墒补灌, 可为小麦节水高产有效补灌提供参考。

## 参考文献

- [1] Shan L (山 仑), Wu P-T (吴普特), Kang S-Z (康绍忠), et al. Study on agricultural water-saving countermeasures and feasibility of implementing semi-dryland farming in the Huang-Huai-Hai Region. *Engineering Sciences* (中国工程科学), 2011, **13**(4): 37~41 (in Chinese)
- [2] Liu L-Y (刘丽艳), Li Y-H (李远华), Wu Y-Q (吴玉琴). Thinking on sustainable development of well irrigation regions in Yellow-Huai River Basin. *China Rural Water and Hydropower* (中国农村水利水电), 2004(12): 1~3 (in Chinese)
- [3] Li JM, Inanaga S, Li ZH, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2005, **76**: 8~23
- [4] Yao F-J (姚凤娟), He M-R (贺明荣), Li F (李飞), et al. Effects of post-anthesis irrigation frequency on the grain quality of strong gluten winter wheat cultivars. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(12): 2627~2631 (in Chinese)
- [5] Wu Y-C (吴永成), Zhang Y-P (张永平), Zhou S-L (周顺利), et al. Yield and characteristics of water and nitrogen utility in winter wheat under different irrigation. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(5): 2082~2085 (in Chinese)
- [6] Yu L-P (于利鹏), Huang G-H (黄冠华), Liu H-J (刘海军), et al. Effects of sprinkler irrigation amount on winter wheat growth, water consumption, and water use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(8): 2031~2037 (in Chinese)
- [7] Zhang HP, Oweis T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 1999, **38**: 195~211
- [8] Zhang XY, Pei D, Hu CS. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain. *Irrigation Science*, 2003, **21**: 159~166
- [9] Sun H-Y (孙宏勇), Liu C-M (刘昌明), Zhang Y-Q (张永强), et al. Effects of water stress in different growth stage on water consumption and yield in winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2003, **22**(2): 13~16 (in Chinese)
- [10] Xiao J-F (肖俊夫), Liu Z-D (刘战东), Duan A-W (段爱旺), et al. Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency of winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2006, **25**(2): 20~23 (in Chinese)
- [11] Zhang Z-X (张忠学), Yu G-R (于贵瑞). Effects of

- irrigation scheduling on development and water use efficiency in winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2003, **22**(2): 1–4 (in Chinese)
- [12] Zhang S-Q (张胜全), Fang B-T (方保停), Wang Z-M (王志敏), et al. Influence of different spring irrigation treatments on water use and yield formation of late-sowing winter wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(4): 2035–2044 (in Chinese)
- [13] Fang W-S (方文松), Liu R-H (刘荣花), Deng T-H (邓天宏). Study on reasonable soil moisture indexes of growth and development for winter wheat. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2010, **31** (suppl. 1): 73–76 (in Chinese)
- [14] Zhu C-L (朱成立), Shao X-H (邵孝侯), Peng S-Z (彭世彰), et al. Research on soil water stress effect and high efficiency water-saving irrigation index system for winter wheat. *China Rural Water and Hydropower* (中国农村水利水电), 2003(11): 22–24 (in Chinese)
- [15] Duan W-X (段文学), Yu Z-W (于振文), Zhang Y-L (张永丽), et al. Effects of supplemental irrigation on water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in different spike-type wheat cultivars based on testing soil moisture. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(12): 1424–1432 (in Chinese)
- [16] Shan L (山仑), Kang S-Z (康绍忠), Wu P-T (吴普特). Water-saving Agriculture in China. Beijing: China Agriculture Press, 2004 (in Chinese)
- [17] Luo H-Y (骆洪义), Ding F-J (丁方军). Soil Science Experiments. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1995 (in Chinese)
- [18] Liu Z-J (刘增进), Li B-P (李宝萍), Li Y-H (李远华), et al. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2004, **20**(4): 58–62 (in Chinese)
- [19] Hu M-Y (胡梦芸), Zhang Z-B (张正斌), Xu P (徐萍), et al. Relationship of water use efficiency with photoassimilate accumulation and transport in wheat under deficit irrigation. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(11): 1884–1891 (in Chinese)
- [20] Chen SY, Zhang XY, Sun HY, et al. Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 1126–1132
- [21] Liu G-S (刘耕山), Guo A-H (郭安红), Ren S-X (任三学), et al. The effect of limited water supply on root growth and soil water use of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(11): 2342–2352 (in Chinese)
- [22] Xue L-H (薛丽华), Duan J-J (段俊杰), Wang Z-M (王志敏), et al. Effects of different irrigation regimes on spatial temporal distribution of roots, soil water use and yield in winter wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(19): 5296–5305 (in Chinese)
- [23] Clothier B, Green S. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 1994, **25**: 1–12
- [24] Huang YL, Chen LD, Fu BJ, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: Straw mulch and irrigation effects. *Agricultural Water Management*, 2005, **72**: 209–222
- [25] Sun HY, Liu CM, Zhang XY, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2006, **85**: 211–218
- [26] Guo YQ, Wang LM, He XH, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 1848–1859
- [27] Zhao G-C (赵广才), Wan F-S (万富世), Chang X-H (常旭虹), et al. Effects of irrigation on yield and protein content of grains and their stability in strong-gluten wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2008, **34**(7): 1247–1252 (in Chinese)

**作者简介** 易立攀,男,1987年生,硕士研究生。主要从事小麦节水高产生理生态研究。E-mail: yilipan87@163.com

**责任编辑** 张凤丽