

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.019

# 不同种植模式麦田水资源利用率及边际效益分析\*

李全起<sup>1,2</sup> 陈雨海<sup>2</sup> 周勋波<sup>2</sup> 余松烈<sup>2</sup>

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018)

**【摘要】** 选用山东省当前推广面积较大的“20+40”大小行、“20+40”沟播、“20+40”垄作以及常规等行距模式, 研究不同种植模式对冬小麦农田水资源利用效率和边际效益的影响。结果表明, 等行距、大小行、沟播和垄作种植模式的最大产量分别为 7 778.6、7 624.8、8 684.6 和 8 893.7 kg/hm<sup>2</sup>, 表明沟播和垄作都具有提高冬小麦产量的潜力, 但在获得最大产量时, 垄作的蒸散量比沟播提高了 76.6 mm。沟播和垄作的最大水分利用效率均低于等行距和大小行, 但沟播的最大水分利用效率在产量和蒸散量分别为 7 858.8 kg/hm<sup>2</sup> 和 407.5 mm 时获得, 均显著高于其余 3 种植模式。综合考虑各种种植模式的水资源利用效率和边际效益, 以灌拔节和抽穗水条件下沟播的净收益最高, 其产量为 8 186.3 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉量为 120 mm, 蒸散量为 423.5 mm, 水分利用效率为 19.3 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。表明在亏缺灌溉条件下, 沟播是最适合在山东省推广的冬小麦节水种植模式。

**关键词:** 冬小麦 种植模式 水资源利用率 边际效益

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0090-06

## Effects of Different Planting Patterns on Water Use Efficiency and Marginal Profits of Winter Wheat

Li Quanqi<sup>1,2</sup> Chen Yuhai<sup>2</sup> Zhou Xunbo<sup>2</sup> Yu Songlie<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. National Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

### Abstract

In Shandong Province, water shortage is the most important problem for winter wheat production. Four planting patterns, i. e., uniform row, “20+40” wide-narrow row, “20+40” furrow planting, and “20+40” bed planting patterns which were widely used in Shandong Province were selected for the experiment to study the effect of planting patterns on water use efficiency (WUE) and marginal profits of winter wheat. The results indicated that the max yield of uniform row, wide-narrow row, furrow planting and bed planting were 7 778.6, 7 624.8, 8 684.6 and 8 893.7 kg/hm<sup>2</sup> respectively. But, if get the max yield, evapotranspiration of bed planting pattern was higher than that of furrow planting pattern by 76.6 mm. The max WUE of furrow planting was lower than those of uniform row and wide-narrow row planting, so did bed planting. But if get the max WUE yield and evapotranspiration of furrow planting pattern was 7 858.8 kg/hm<sup>2</sup> and 407.5 mm respectively, they were all significantly higher than those of uniform row, wide-narrow row and bed planting patterns. Take the water resource use efficiency and marginal profits as a whole, furrow planting pattern irrigated at jointing and heading growth stages could get the highest netincome, under these conditions, yield was 8 186.3 kg/hm<sup>2</sup>, irrigation amount was 120 mm, evapotranspiration was 423.5 mm, and WUE was 19.3 kg/(hm<sup>2</sup>·mm). The experiment showed that under water deficit, furrow planting was the most appropriate planting patterns in Shandong

收稿日期: 2009-08-27 修回日期: 2009-11-11

\* 国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2005CB121106)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD02A09)、山东省优秀中青年科学家科研奖励资金资助项目(BS2009NY008)、山东省高等学校科技计划资助项目(J09LC03)和山东农业大学青年科技创新基金资助项目(23652)

作者简介: 李全起, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: quanqili@sdau.edu.cn

通讯作者: 陈雨海, 教授, 博士生导师, 主要从事节水农业技术研究, E-mail: yhchen@sdau.edu.cn

Province.

**Key words** Winter wheat, Planting pattern, Water resource use efficiency, Marginal profit

## 引言

山东省是我国重要的粮食产区之一,但全省缺水现象非常严重<sup>[1-3]</sup>。山东省的粮食作物主要为冬小麦和夏玉米,多采用冬小麦夏玉米一年两熟种植制度,且灌溉主要集中在冬小麦生育期间<sup>[4-5]</sup>。近年来,生产上冬小麦的种植模式出现了多元化。据统计,仅山东省冬小麦的种植模式就有近300种<sup>[6]</sup>,沟播<sup>[7]</sup>、垄作<sup>[8]</sup>和大小行<sup>[9-10]</sup>等水土保持种植模式广泛应用。在墨西哥西北部的雅基河谷,主要粮食作物为冬小麦和夏玉米,主要采用垄作沟灌种植模式。Limon-Ortega等利用5年的时间研究表明<sup>[11]</sup>,在该地区,垄作不但有效防治水土流失,而且也是提高冬小麦和夏玉米产量的有效种植模式。国内也有学者研究表明,垄作不仅解决了强降雨和土壤渗透慢的矛盾,而且可有效提高冬小麦的产量<sup>[8]</sup>。作物的耗水取决于植株蒸腾和株间蒸发,在通常情况下,一般大田作物的植株蒸腾量约占70%左右,株间蒸发量约占30%左右<sup>[12]</sup>,而株间蒸发一般被视为无效消耗<sup>[13]</sup>。有学者认为,在沟播及垄作条件下,由于改变了地表形状,蒸发面主要集中在沟内,从而使无效蒸发得以有效控制,最终蒸发量减少,可以有效提高冬小麦<sup>[7]</sup>、玉米<sup>[14]</sup>和马铃薯<sup>[15]</sup>等作物的水分利用效率。但是,多数学者仅研究了单一种植模式下冬小麦农田蒸散规律的变化<sup>[11,16-17]</sup>,缺乏同一地区不同种植模式冬小麦农田蒸散规律的研究。而且,这些研究多注重生态效益或者社会效益,缺少经济效益方面的研究。本试验以山东省种植面积较大的“20+40”大小行、“20+40”沟播和“20+40”垄作等水土保持种植模式,设置不同的灌溉处理,研究不同水土保持种植模式对冬小麦农田水资源利用率及边际效益的影响,以期为山东省水土保持以及节水农业的发展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2004~2005年在山东农业大学农学实验站进行。试验地点属温带大陆性半湿润季风气候区,多年平均降水量为697 mm,年内降水分布很不均匀,夏季降水最多,占年降水量的65.2%,冬季最少,仅占3.6%。冬小麦为了获得高产和稳产,一般年份必须进行补充灌溉。试验地点0~20 cm土

壤养分含量分别为碱解氮108.1 mg/kg、速效钾92.4 mg/kg、速效磷16.1 mg/kg。冬小麦品系为山东农业大学育成的8049,按180万基本苗/hm<sup>2</sup>于2004年10月11日进行人工点播。

### 1.2 试验设计

本试验共设等行距、大小行、沟播和垄作等4种植植模式,等行距的行距为30 cm,大小行、沟播和垄作均采用“20+40”种植模式,即小行距为20 cm,大行距为40 cm,带宽60 cm。其中,沟播和垄作的沟段均采用梯形形式,沟深20 cm,沟顶宽40 cm,底宽20 cm,垄顶宽20 cm、底宽40 cm。沟播中,行距为20 cm的两行小麦种在沟内;垄作中,行距为20 cm的两行小麦在垄上居中种植。每个小区的面积为10 m<sup>2</sup>,小区与小区之间留1.5 m的隔离带,以便减少不同处理之间水分的影响。

每种种植模式设4种灌溉处理,分别为整个生育期不灌溉、灌溉拔节水、灌溉拔节+抽穗水和灌溉拔节+抽穗+灌浆水。每次灌水60 mm,用水表严格控制水量。2005年,拔节、抽穗和灌浆水的灌溉时间分别为4月8日、4月29日和5月15日。本试验共有16个处理,每个处理重复3次,随机排列。冬小麦整个生育期间不遮雨,共降水193.90 mm,为平水年。

### 1.3 项目测定和计算

#### 1.3.1 土壤体积分水含量

采用CNC503B型智能中子水分仪和TDR相结合的方法进行测定。在冬小麦生育期间,每5~7 d测定一次,每10 cm为一个层次,测深为1.8 m,降水和灌溉前后需加测一次。0~20 cm土壤水分含量用TDR加以矫正。

#### 1.3.2 农田蒸散量

由于试验地点的地下水位大于5 m,故地下水对冬小麦蒸散量的影响可忽略不计。试验期间没有大的降雨,故地表径流可忽略不计。根据农田水量平衡方程<sup>[4]</sup>

$$ET = \Delta S + I + P$$

式中  $ET$ ——蒸散量

$P$ ——冬小麦生育期间的有效降水量,可由附近气象站提供

$I$ ——灌溉量,由水表直接读取

$\Delta S$ ——土壤蓄存水变化量,用水层厚度 $\Delta h$ 表示

$\Delta h = 10 \sum (\Delta \phi_i \times Z_i), I(i, m)$ 。 $\Delta \phi_i$ 为土壤某

一层次在给定时段内体积含水量的变化,  $Z_i$  为土壤层次厚度 (cm),  $i, m$  是从土壤第  $i$  层到第  $m$  层。

### 1.3.3 水分利用效率

$$WUE = Y/ET$$

式中  $WUE$ ——水分利用效率<sup>[4,18]</sup>

$Y$ ——产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

### 1.3.4 边际效益的计算

小麦价格 1.35 元/kg, 灌溉价格 375 元/ $\text{hm}^2$ , 沟播和垄作种植模式的机械费用比平作处理平均高 225 元/ $\text{hm}^2$ 。

## 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 不同种植模式冬小麦产量和蒸散量的关系

如图 1 所示, 在等行距中, 冬小麦产量和蒸散量之间的关系符合二次方程式  $Y = -0.019 1ET^2 + 19.565ET + 2768.3$  ( $R^2 = 0.9407, n = 12$ ), 对该方程式求导, 可得当蒸散量  $ET = 512.2$  mm 时, 产量  $Y$  获得最大值 7778.6  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; 在大小行中, 冬小麦产量和蒸散量之间的关系符合二次方程式  $Y = -0.022 1ET^2 + 21.36ET + 2463.6$  ( $R^2 = 0.9712, n = 12$ ), 对该方程式求导, 可得当蒸散量  $ET = 483.3$  mm 时, 产量  $Y$  获得最大值 7624.8  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; 在沟播中, 冬小麦产量和蒸散量之间的关系符合二次方程式  $Y = -0.069 8ET^2 + 72.071ET - 9919.4$  ( $R^2 = 0.9472, n = 12$ ), 对该方程式求导, 可得当蒸散量  $ET = 516.3$  mm 时, 产量  $Y$  获得最大值 8684.6  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; 在垄作中, 冬小麦产量和蒸散量之间的关系符合二次方程式  $Y = -0.017 5ET^2 + 24.251ET + 492.15$  ( $R^2 = 0.9825, n = 12$ ), 对该方程式求导, 可得当蒸散量  $ET = 692.9$  mm 时, 产量  $Y$  获

得最大值 8893.7  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。可见, 沟播和垄作都具有提高冬小麦产量的能力, 最大产量分别比等行距高 935.3 和 1144.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 比大小行提高了 1059.8 和 1268.9  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。但在获得最大产量时, 沟播的蒸散量仅比等行距和大小行提高了 4.1 和 32.7 mm, 而垄作则分别提高了 180.7 和 209.6 mm, 分别比沟播提高了 176.6 和 176.9 mm。可见, 在水资源日趋紧张的今天, 为了获得最大产量, 沟播更具有实际应用价值。

### 2.2 不同种植模式冬小麦蒸散量和 WUE 的关系

如图 2 所示, 在等行距中,  $WUE$  与蒸散量之间的关系符合二次方程式  $y = -0.000 1ET^2 + 0.056 2ET + 14.595$  ( $R^2 = 0.9729, n = 12$ ), 当蒸散量  $ET = 281.0$  mm 时,  $WUE$  有最大值 22.5  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; 在大小行中,  $WUE$  与蒸散量之间的关系符合二次方程式  $y = -0.000 1ET^2 + 0.050 9ET + 15.61$  ( $R^2 = 0.9875, n = 12$ ), 当蒸散量  $ET = 254.5$  mm 时,  $WUE$  有最大值 22.1  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; 在沟播中,  $WUE$  与蒸散量之间的关系符合二次方程式  $y = -0.005ET^2 + 0.407 5ET - 63.281$  ( $R^2 = 0.825, n = 12$ ), 当蒸散量  $ET = 407.5$  mm 时,  $WUE$  有最大值 20.4  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; 在垄作中,  $WUE$  与蒸散量之间的关系符合二次方程式  $y = -0.000 1ET^2 + 0.062 9ET + 10.12$  ( $R^2 = 0.9717, n = 12$ ), 当蒸散量  $ET = 314.5$  mm 时,  $WUE$  有最大值 20.0  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 。虽然沟播的最大  $WUE$  明显低于等行距, 但沟播的最大  $WUE$  在蒸散量为 407.5 mm 时获得, 此时产量高达 7858.8  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 而等行距的最大  $WUE$  在蒸散量为 281.0 mm 时获得, 其产量仅为 6757.9  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 比沟播低 1100.9  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。所以, 在水资源比较紧缺的地区, 为了追求较高的冬小麦产量且同时获得最大的  $WUE$ , 沟播更具有实际应用价值。

### 2.3 种植模式对冬小麦产量和水资源利用率的影响

随着灌溉水量的增加, 水资源生产力由递增到

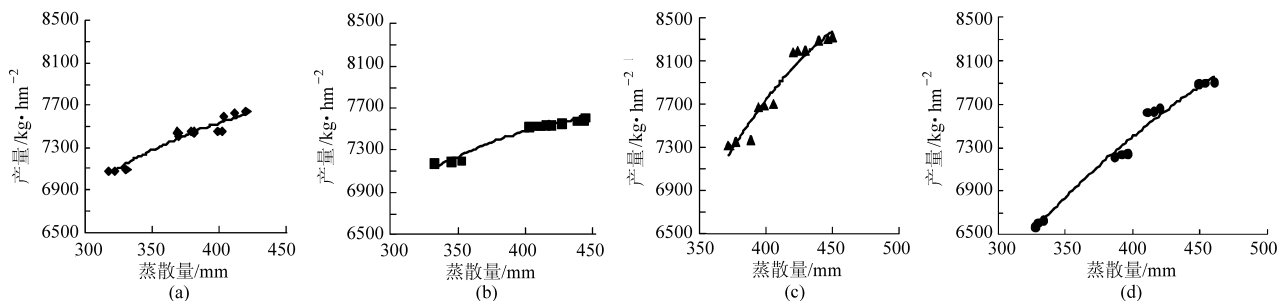


图 1 不同种植模式下冬小麦产量和蒸散量间的关系

Fig. 1 Relationship between yield and evapotranspiration of uniform row, wide-narrow row,

furrow planting and bed planting of winter wheat

(a) 等行距 (b) 大小行 (c) 沟播 (d) 垄作

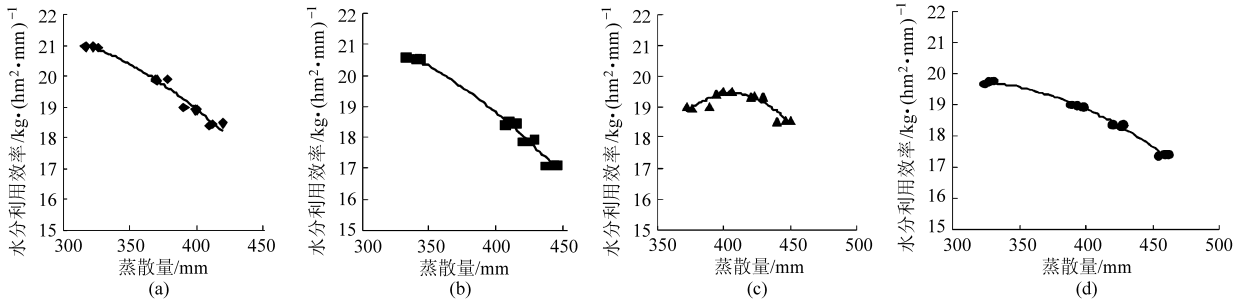


图 2 不同种植模式下水分利用效率和蒸散量间的关系

Fig. 2 Relationship between *WUE* and evapotranspiration of uniform row, wide-narrow row, furrow planting and bed planting of winter wheat

(a) 等行距 (b) 大小行 (c) 沟播 (d) 垄作

递减表现了生产函数的一般特性,这个过程体现了水资源生产力的 3 个不同发展阶段。图 3 所示的蒸散量与产量的关系曲线表明,蒸散量在 *c* 之前,产量随蒸散量的增加而增加。但若分析蒸散量和 *WUE* 之间的关系,可以看出,在 *b* 点的左边,*WUE* 是增值的,表明产量增加的幅度大于水资源增加的幅度。在 *b* 点的右边,产量增加的幅度小于投入量增加的幅度,出现所谓的“报酬递减”现象。在 *c* 点的右边,产量随蒸散量的增加逐渐减少,出现产量负增长的现象。

不同种植模式下冬小麦产量和蒸散量之间的关系曲线反映了水资源生产力发展的 3 个阶段,反映了小麦产量和水分关系的一般特征:

水资源生产力迅速增长阶段 (*b* 点之前):在这个阶段,水资源总生产力迅速增长,总产量由最低点上升到 *WUE* 最高点,等行距、大小行、沟播和垄作的 *WUE* 最高值分别为 22.5、22.1、20.4 和 20.0  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ,蒸散量分别为 281.0、254.5、407.5 和

314.5 mm,对应的产量分别为 6 757.9、6 468.3、7 858.8 和 6 388.2  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。在这一阶段,每投入一单位水资源所取得的小麦产量达到最大,单位资源投入的成本最小,价值形成表现的单位水资源收益率相应最高。显然,在这一范围内只要条件允许,应尽可能增加水资源的投入量,以便获得最大的小麦产量。但在这个阶段大小行、沟播和垄作等种植模式的 *WUE* 均低于等行距,所以,为了水资源的充分利用,在这个阶段最好采用等行距。

水资源生产力缓慢增长阶段 (*b - c*):随着水资源投入量的增加,水资源总生产力继续增长,等行距、大小行、沟播和垄作的蒸散量分别增加至 512.2、483.3、516.3 和 692.9 mm,小麦产量则分别上升到 7 778.6、7 624.8、8 684.6 和 8 893.7  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,*WUE* 分别为 15.2、15.8、16.8 和 12.8  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ,进入水资源投入的高产区间,但水资源投入的利用效率则在下降。从经济意义上看,这一阶段水资源得到了相对充分的利用,水资源效益得到较充分发挥。

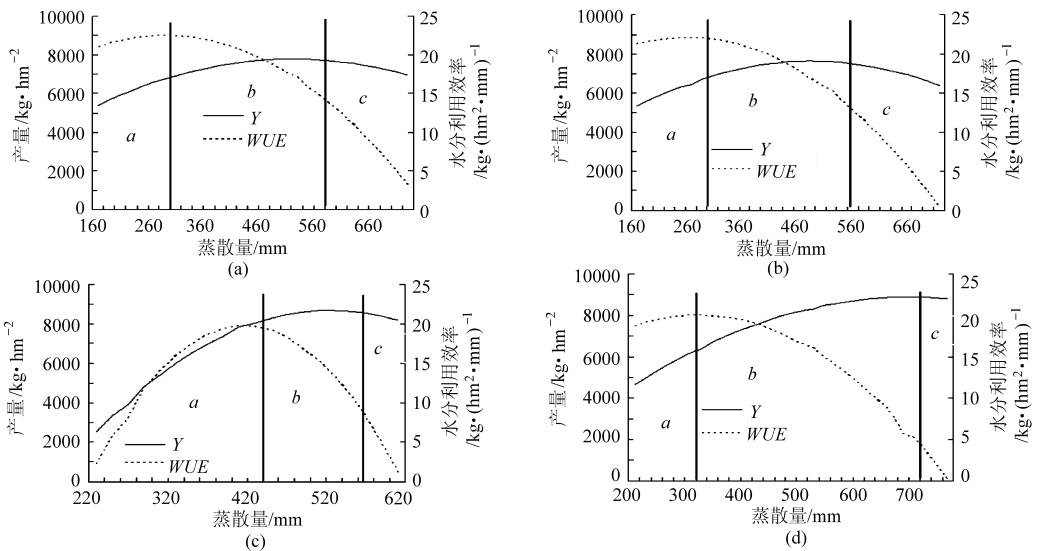


图 3 不同种植模式冬小麦产量、水分利用效率和蒸散量的对比关系

Fig. 3 Contrast relation among yield, *WUE* and evapotranspiration of winter wheat

(a) 等行距 (b) 大小行 (c) 沟播 (d) 垄作

在这一范围内,沟播的 WUE 和产量均明显高于其余各种种植模式,是这一阶段最合适的种植模式。

水资源生产力回落阶段(*c* 点之后):在这一阶段,随着水资源用量的增加,小麦产量不增加反而下降。在这一阶段,水资源用量追加越多,造成的亏损越大。

## 2.4 种植模式对冬小麦灌溉水边际效益的影响

对于灌溉生产函数而言,随着灌溉量的增加,小麦的产量也相应增加,当灌溉量增加到一定值时,小麦的产量随灌溉量增加的速度变慢,当产量达到最大时,随灌溉量的增加,产量反而出现下降趋势,边际效益由大到小以至于出现负值。在冬小麦生育期间,水资源缺乏是制约冬小麦产量进一步提高的关

键因素。在制定冬小麦的灌溉方案时,应综合考虑经济效益,制定最佳经济方案,使水量投入所增加的产出大于或等于水量投入本身的价值,即边际收益不小于边际成本时的投入才是最佳经济方案。

综合考虑表 1 中各处理的净收益,可发现,在等行距和大小行中,均以灌拔节水时净收益最大,分别达到 5 237.0 元/hm<sup>2</sup> 和 5 348.6 元/hm<sup>2</sup>;垄作和沟播在灌拔节+抽穗水条件下,边际效益仍大于边际成本,净收益分别为 4 915.1 元/hm<sup>2</sup> 和 5 636.5 元/hm<sup>2</sup>。在灌拔节+抽穗+灌浆水条件下,垄作和沟播的边际效益都小于成本,净收益开始减少。如果继续增加灌溉量,小麦的净收益将继续减少,即收入的增加小于成本的增加,从经济学来讲,是亏损的。

表 1 小麦灌溉水的边际效益分析

Tab.1 Marginal analysis of irrigation of wheat

处理	灌水量 /mm	总产量 /kg·hm <sup>-2</sup>	总产值 /元·hm <sup>-2</sup>	总成本 /元·hm <sup>-2</sup>	边际效益 /元·m <sup>-3</sup>	边际成本 /元·m <sup>-3</sup>	净收益 /元·hm <sup>-2</sup>
U0	0	7 084.6 <sup>ef</sup>	9 564.3	4 440.0			5 124.3
U1	60	7 445.9 <sup>cde</sup>	10 052.0	4 815.0	0.8	0.6	5 237.0
U2	120	7 452.3 <sup>cde</sup>	10 060.7	5 190.0	0.1	0.6	4 870.6
U3	180	7 622.5 <sup>cd</sup>	10 290.4	5 565.0	0.4	0.6	4 725.4
W0	0	7 188.0 <sup>de</sup>	9 703.9	4 440.0			5 263.9
W1	60	7 528.6 <sup>cde</sup>	10 163.6	4 815.0	0.8	0.6	5 348.6
W2	120	7 543.5 <sup>cde</sup>	10 183.7	5 190.0	0.3	0.6	4 993.7
W3	180	7 584.9 <sup>cde</sup>	10 239.6	5 565.0	0.9	0.6	4 674.6
F0	0	7 368.5 <sup>de</sup>	9 947.5	4 665.0			5 282.6
F1	60	7 681.4 <sup>bcd</sup>	10 369.8	5 040.0	0.7	0.6	5 329.8
F2	120	8 186.3 <sup>ab</sup>	11 051.5	5 415.0	1.1	0.6	5 636.5
F3	180	8 300.4 <sup>a</sup>	11 205.5	5 790.0	0.3	0.6	5 415.5
B0	0	6 612.18 <sup>f</sup>	8 926.44	4 665.00			4 261.44
B1	60	7 234.84 <sup>de</sup>	9 767.03	5 040.00	1.40	0.63	4 727.03
B2	120	7 651.93 <sup>cd</sup>	10 330.11	5 415.00	0.94	0.63	4 915.11
B3	180	7 892.18 <sup>abc</sup>	10 654.44	5 790.00	0.54	0.63	4 864.44

注:U、W、F 和 B 分别代表等行距、“20+40”大小行、“20+40”沟播和“20+40”垄作,0、1、2 和 3 分别代表冬小麦生育期间的灌溉次数。数据后不同字母表示不同灌溉量下处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

综合考虑各种种植模式的效益,以灌拔节+抽穗水条件下沟播的效益最高,产量为 8 186.3 kg/hm<sup>2</sup>,灌溉量为 120 mm,总蒸散量为 423.5 mm, WUE 为 19.3 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。

## 3 结束语

由本试验发现,无论在何种灌溉条件下,沟播和垄作的蒸散量均显著高于等行距种植模式,这可能是由于沟播和垄作均增大了地表面积,使蒸发面增加,导致了裸间蒸发增加。另外,沟播冬小麦的生长

发育状况明显优于其他各种种植模式,叶面积指数显著提高<sup>[7]</sup>,这一方面可导致植株蒸腾量的显著增加,另一方面可导致降水时冠层截留量增加。冠层截留量增加,可有效防止溅蚀,而且在降雨量较小时,可使雨水顺茎秆到达地面,在小麦茎秆附近渗入土壤,有利于根系吸收,从而把无效降水变为有效降水,提高对降水资源的利用效率。

本研究中发现,垄作只有在充分灌溉条件下才能够显著提高冬小麦的产量。在不灌溉、只灌拔节水和灌拔节+抽穗水的条件下,其产量均显著低于等行距,

要想达到较高的产量,水资源的效益将达不到充分发挥。可见,在山东省的水土流失地区,由于水资源通常非常缺乏,所以,垄作的应用范围必然受到一定的限

制。只有沟播在亏缺灌溉条件下,冬小麦的产量、蒸散量、*WUE* 和经济效益才能够达到协调一致,是最适合在山东省水土流失地区推广的冬小麦种植模式。

#### 参 考 文 献

- 1 陈克森,张良成,程坤. 山东省节水灌溉现状与发展对策探讨[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2005,36(3):387~390.  
Chen Kesen, Zhang Liangcheng, Cheng Kun. The current situation and development strategy of water saving irrigation in Shandong Province [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2005, 36(3): 387~390. (in Chinese)
- 2 陈盛伟,郑文君. 山东省农业产业结构开放型调整的思考[J]. 山东农业大学学报:社会科学版,2003,5(3):32~36.  
Chen Shengwei, Zheng Wenjun. Review and analysis on problem of opening adjustment of agricultural industry structure in Shandong Province [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Social Science, 2003, 5(3): 32~36. (in Chinese)
- 3 蔡裕民,齐善忠,段慧平. 山东省水土流失状况分析[J]. 水土保持研究,2007,14(5):259~260.  
Cai Yumin, Qi Shanzhong, Duan Huiping. Status of soil and water loss in Shandong Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(5): 259~260. (in Chinese)
- 4 Li Q Q, Chen Y H, Liu M Y, et al. Effect of irrigation to winter wheat on the soil moisture, evapotranspiration, and water use efficiency of summer maize in North China [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(6): 2 073~2 080.
- 5 李全起,房全孝,陈雨海,等. 底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(2):97~100.  
Li Quanqi, Fang Quanxiao, Chen Yuhai, et al. Effects of different soil moisture before sowing on water consumption characteristics and yield of summer maize [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 97~100. (in Chinese)
- 6 余松烈. 现代小麦栽培科学及其发展展望[M]. 济南:山东科学技术出版社,2004.
- 7 Li Q Q, Chen Y H, Liu M Y, 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.
- 8 Wang F H, Wang X Q, Ken S, et al. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China [J]. Field Crops Research, 2004, 87(1): 35~42.
- 9 陈雨海,余松烈,于振文. 小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系[J]. 作物学报,2003,29(5):730~734.  
Chen Yuhai, Yu Songlie, Yu Zhenwen. Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities [J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 730~734. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 Limon-Ortega A, Sayre K D, Francis C A. Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in northwest Mexico [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(2): 303~308.
- 12 Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 109~120.
- 13 孙宏勇,刘昌明,张喜英,等. 不同行距对冬小麦麦田蒸发、蒸散和产量的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(3):22~26.  
Sun Hongyong, Liu Changming, Zhang Xiying, et al. Effects of different row spacing on soil evaporation, evapotranspiration and yield of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 22~26. (in Chinese)
- 14 Li Q Q, Chen Y H, Liu M Y, et al. Water potential characteristics and yield of summer maize in different planting patterns [J]. Plant Soil and Environment, 2008, 54(1): 14~19.
- 15 Panigrahi B, Panda S N, Raghuvanshi N S. Potato water use and yield under furrow irrigation [J]. Irrigation Science, 2001, 20(4): 155~163.
- 16 Kang S Z, Shi P, Pan Y H, et al. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas [J]. Irrigation Science, 2000, 19(4): 181~190.
- 17 Zhang H P, Theib Y O, Sonia G, et al. Water-use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rain-fed conditions and supplemental irrigation in a mediterranean-type environment [J]. Plant and soil, 1998, 201(2): 295~305.
- 18 Li Q Q, Chen Y H, Liu M Y, et al. Effects of irrigation and straw mulching on microclimate characteristics and water use efficiency of winter wheat in North China [J]. Plant Production Science, 2008, 11(2): 161~170.