

冬小麦-夏玉米两熟农田节水效应的可行性

于舜章^{1,2}, 陈雨海^{1,*}, 李全起¹, 周勋波¹, 房全孝³, 王吉顺³, 刘恩民³, 罗毅³

(1. 山东农业大学农学院, 泰安 271018; 2. 山东省土壤肥料总站, 济南 250100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 2001~2003 年在中国科学院禹城综合试验站研究了冬小麦-夏玉米两熟农田节水效应的可行性。结果表明, 本地区降雨量主要集中在夏玉米生育时期, 月蒸散量呈“M”型变化, 双峰一般出现在冬小麦与夏玉米的抽穗开花时期, 而且两年的蒸散积累趋势纵向比较均显示出其一致性的特点, 这是研究耗水规律的基础环节。土壤水分从时间分布来看, 在灌溉和降雨的水分供应下, 冬小麦期间土壤水分呈下降的趋势, 而夏玉米期间土壤水分却有所升高。土壤水分从空间分布来看, 土壤水分变化趋势较一致, 呈“Z”型变化, 0~60cm 层次的土壤水分动态变化幅度较大。实验证明夏玉米产量与前季冬小麦产量有一定的互补作用, 全年 WUE 与灌水量成负相关。冬小麦-夏玉米两熟农田实行冬小麦灌溉而夏玉米不灌的灌水措施可行。

关键词: 冬小麦; 夏玉米; 土壤水分; 耗水规律; 节水农业

文章编号: 1000-0933(2006)08-2523-09 中图分类号: Q143, S314 文献标识码: A

Feasible study on water-saving effect of wheat-maize rotation pattern

YU Shun-Zhang^{1,2}, CHEN Yu-Hai^{1,*}, LI Quan-Qi¹, ZHOU Xun-Bo¹, FANG Quan-Xiao³, WANG Ji-Shun³, LIU En-Min³, LUO Yi³ (1. Agronomy College of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Soil and Fertilizer Bureau of Shandong Province, Jinan 250100, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (8): 2523 ~ 2531.

Abstract: Wheat-maize rotation planting pattern is an important farming system in the North-western Plain of Shandong Province. It is critical to know how save water in the wheat-maize rotation pattern. The experiment was carried out from 2001 to 2003 at Yucheng Experimental Station and included eight treatments that were based on irrigations at different winter wheat stages and no irrigations at maize stage, however, due to heavy drought at maize stage, all treatments irrigated 60mm water on July 8 and 90mm water on August 20, 2002. The eight treatments were made up of irrigations at Jointing stage (March 26, 2002), Flag stage (April 15, 2002), Grain filling stage (May 11, 2002) in the 2001~2002 season, and irrigations at Jointing stage (April 8, 2003), Heading stage (May 1, 2003) and Grain filling stage (May 17, 2003) in the 2002~2003 season. Every irrigation water value was 60mm controlled by a water supply meter. Wheat plant density was 2250000 plants per hectare and maize density was 60000 plants per hectare. The rainfall in Yucheng City is mainly distributed on the summer when summer maize was growing. Rainfall, evapotranspiration (ET) and irrigation are the basic factors to study the rules of water consumption. The ET per month changed as a “M” curve which two peaks were located, respectively, in the tassel and anthesis stages of wheat and maize. Furthermore, changes of the accumulation of ET were identical between the two years. With the supplement of irrigation or rainfall, water in soil declined gradually with the crop growth in the winter, but increased in the summer. The water content in 0~130cm soil fluctuated as a “Z” trend and the changes were very significant in the 0~60cm soil profile. The results showed that

基金项目: 中国科学院禹城综合开放试验站基金资助项目(yc2002006); 聊城市国家计委大型优质小麦生产基地科研资助项目(20021106)

收稿日期: 2005-04-03; **修订日期:** 2005-12-30

作者简介: 于舜章(1979~), 男, 山东招远人, 硕士, 主要从事作物种植制度、农业生态及节水农业研究. E-mail: s.z.yu@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhchen@sdau.edu.cn

Foundation item: The project was supported by Yucheng Experimental Station of Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences(No.yc2002006); Foundation of the Large Scale Wheat Culture Base of China Planning Council in Liaocheng(No.20021106)

Received date: 2005-04-03; **Accepted date:** 2005-12-30

Biography: YU Shun-Zhang, Master, mainly engaged in planting system, farming ecology and water saving agriculture. E-mail: s.z.yu@163.com

summer maize and winter wheat had the mutual compensation on the yield and the water use efficiency of the whole year had a negative correlation with irrigation quantity. Results showed that it was feasible to practice irrigations during the winter wheat stage, but no irrigation during the summer maize stage in the field of wheat-maize rotation.

Key words: winter wheat; summer maize; soil water; water consumption; water saving agriculture

冬小麦-夏玉米两熟作物在鲁西北平原是一种典型种植模式,其农田耗水量的多年平均值为 840mm,多年平均降水量为 568mm,其中,山东省禹城市冬小麦平均耗水量为 482.2mm,水分利用率为 $11.01\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$;夏玉米平均耗水量为 398.9mm,水分利用率为 $19.79\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。据研究,耕作比免耕增加了表土层的土壤水分蒸发,导致水分的无效损耗^[2,3],而且不同程度的复种对水分利用率均有所提高,随复种次数的增加,对水资源的利用程度也有所提高^[4,5]。冬小麦-夏玉米两熟农田相当于冬小麦播种时耕地,夏玉米生育期内为免耕。这种耕作方式既实现了耕作和免耕的结合,又增加了复种指数。因此,研究冬小麦-夏玉米两熟农田的节水效应有利于寻求适合本地区特点的灌溉配水技术,充分利用有限的水资源,对发展节水农业具有极重要的理论和实践价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验于 2001~2003 年在中国科学院禹城综合试验站的大田内进行。土壤为中壤土,2001 年大田 0~20cm 土层,碱解氮 $68.30\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $49.36\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $171.00\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $12.60\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.8\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷(P_2O_5) $1.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾(K_2O) $25.4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验按照冬小麦生育期间的灌水分为 8 个处理(表 1),随机区组设计,4 次重复。小区面积 30m^2 ,分 3 畦,中间 1 畦装有中子管,深 1.3m。灌溉时均用水表严格控制灌水量。据研究^[6],保证 90% 以上灌水利用率的每次灌水量不应超过 60mm。夏玉米生育期间不灌溉,主要研究冬小麦生育期间的灌水对夏玉米的影响,2002 年由于特大干旱,夏玉米分别在 7 月 8 日灌水 60mm 和 8 月 20 日灌水 90mm(夏玉米高产的灌溉定额为 150mm ^[1])。

表 1 冬小麦生育期间灌水处理设计

Table 1 Design on irrigation treatments at wheat stage (mm)

年份 Year	时期 Stage	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
2001~2002	播种前 Before sowing (2001-10-04)	100	100	100	100	100	100	100	100
	拔节期 Jointing stage (2002-03-26)		60			60	60		60
	挑旗期 Flag stage (2002-04-15)			60		60		60	60
	灌浆期 Grain filling stage (2002-05-11)				60		60	60	60
2002~2003	越冬期 Over winter (2002-11-24)	50	50	50	50	50	50	50	50
	拔节期 Jointing stage (2003-04-08)		60			60	60		60
	抽穗期 Heading stage (2003-05-01)			60		60		60	60
	灌浆期 Grain filling stage (2003-05-17)				60		60	60	60

冬小麦品种为 93~52,分别于 2001 年 10 月 8 日和 2002 年 10 月 13 日机械播种,密度为 2.25×10^6 株· hm^{-2} ,在 2002 年 6 月 6 日和 2003 年 6 月 8 日收获。冬小麦收获后,夏玉米分别于 2002 年 6 月 13 日和 2003 年 6 月 16 日铁茬机械播种,密度为 6×10^4 株· hm^{-2} ,品种为农大 108,在 2002 年 9 月 30 日和 2003 年 10 月 3 日收获。

1.2 试验方法

(1)土壤水分含量 试验期间每隔 7~10d 用 CNC503DR 型中子水分仪测定土壤体积水分含量,每 10cm 一个层次,测定深度为 0~130cm。

(2)蒸散量 利用中国科学院禹城综合试验站的大型蒸发渗漏仪(蒸渗仪)测定的数据^[7]。

(3)降雨量 中国科学院禹城综合试验站气象站的常规测定数据。

(4)土壤贮水量^[8] 土壤贮水量(mm) = $\sum(\Delta\theta_i \times Z_i)$ 。

式中, $\Delta\theta_i$ 为土壤某一层体积含水量, Z_i 为土壤层次厚度(mm), i 为土壤层次。

(5)耗水量 又可称为农田实际蒸散量(ETa),本试验田较平,不考虑地下水影响及地表径流,因此土壤水分能量方程修正为:

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

式中, ETa 为作物的耗水量; P 为降雨量; I 为灌水量; ΔS 为土壤贮水量变化量。

(6)产量 小麦收获时,每小区取 3 个 $1m^2$,夏玉米收获时,连续取样,每小区取 20 株,4 次重复,自然晒干(子粒的质量含水量一般为 12% 以下),测产。

(7)水分利用效率 采用产量水平上的水分利用效率(WUE),计算公式为:

$$WUE = Y/ETa$$

式中, Y 为作物的经济产量; ETa 为作物的耗水量。

(8)资料统计与分析 试验数据采用 Origin 软件绘图,用 Dps 软件统计分析(LSD 法)。

2 结果

2.1 试验地点降雨量和蒸散量变化特点

2.1.1 月降雨量和蒸散量年际变化特点 2001~2003 年,降雨量主分布在夏玉米生育时期,冬小麦生育时期相对较少,为冬小麦生育期间适当灌溉而夏玉米生育期间不灌溉的两熟农田种植方式提供了有利气象条件。每年(冬小麦-夏玉米)的月蒸散量均呈“M”型变化,双峰一般出现在冬小麦与夏玉米的抽穗开花时期(图 1)。由图 1 可看出,每月的蒸散量一般均大于每月的降雨量,最大的差异均出现于作物的生长旺季(4、5 月份和 7、8 月份),2002~2003 年的月降雨量明显多于 2001~2002 年,但月蒸散量增加的不明显。2003 年 4 月与 2002 年 4 月相比,月降雨量高 130.5mm(变化幅度 399.08%),月蒸散量低 3.9mm(变化幅度 -3.08%),而 2003 年 5 月与 2002 年 5 月相比,月降雨量低 41.7mm

(变化幅度 -74.73%),月蒸散量高 91.45mm(变化幅度 82.19%),高月蒸散量是因 4 月份的大量降雨(163.2mm)所造成的。2003 年 7、8 月与 2002 年 7、8 月相比,月降雨量变化幅度分别为 227.93% 和 321.39%,月蒸散量变化幅度分别为 -9.58% 和 16.44%。

2.1.2 两熟农田各生育期内降雨和蒸散的积累量变化特点 图 2 显示,2002 年,冬小麦拔节(3 月 27 日)后的降雨积累趋势与夏玉米的降雨积累趋势接近平行。2001~2003 年,冬小麦返青后的蒸散积累趋势均与夏玉米一致,而且不管是冬小麦还是夏玉米,两年的蒸散积累趋势纵向比较均显示出其一致性的特点。再者,蒸散积累受日蒸散量的影响要明显少于降雨积累受日降雨量的影响,而且蒸散积累是点点积累的平滑曲线式增加,这不同于降雨积累的阶梯型增加。

由图 2 还可以看出,2001~2002 年冬小麦生育期间,降雨量增加趋势较缓,2002~2003 年的冬小麦生育期间降雨量积累的陡然抬升,促使冬小麦全生育期内的降雨量大增,但积累缓慢的趋势没有改变。如果排除这次抬升(4 月 17 日的 132.6mm 降雨),冬小麦全生育期内降雨量仅为 89.6mm,仅占 2001~2002 年冬小麦全生育期降雨(126.4mm)的 70.89%。与 2002 年夏玉米生育期间降雨比较,2003 年夏玉米生育期间降雨多但增加缓慢且频繁,而且降雨积累变化曲线与蒸散积累变化曲线基本吻合,由此可以推断,少量多次的降雨可弥补蒸散损失。

2.2 两熟农田的耗水规律研究

2.2.1 两熟农田表土层土壤含水量变化特点 图 3 表明,2001~2003 年,0~30cm 和 40~60cm 这两个土壤层

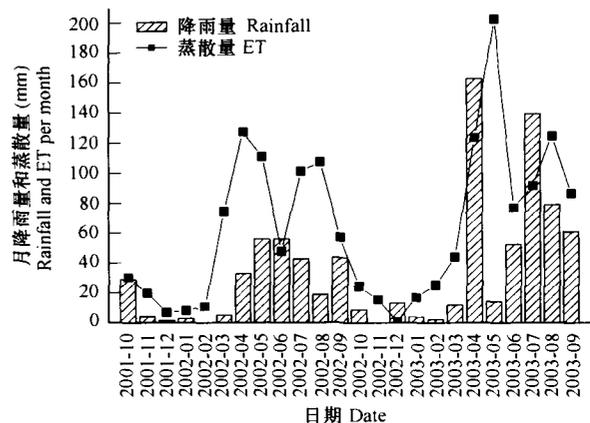


图 1 两熟农田月降雨量和蒸散量变化特点

Fig. 1 Changes of rainfall and evapotranspiration (ET) in wheat-maize field

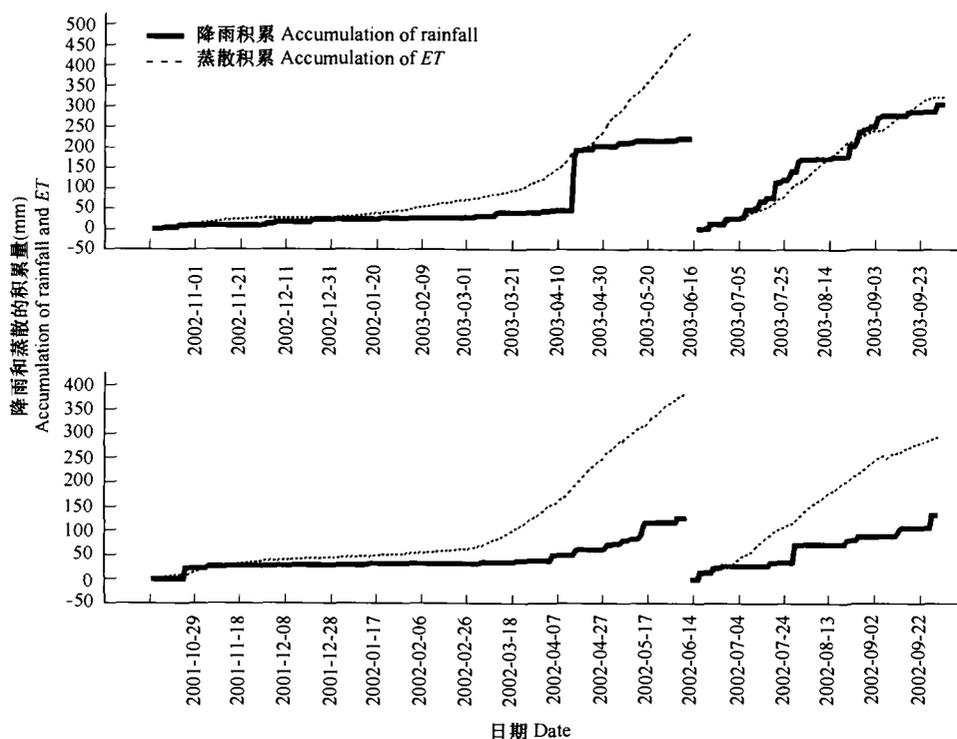


图2 两熟农田各生育期内降雨和蒸散的积累量变化特点

Fig.2 Changes of accumulation of rainfall and evapotranspiration (ET) in wheat-maize field

次具有相似的变化趋势,即灌水或降雨时均能补给土壤水分,蒸散耗水时均减少。0~30cm层次,处理1、2、6和8的同一处理不同日期的变化幅度,2001~2002年冬小麦期间分别为14.01%、15.97%、12.98%和13.85%,夏玉米期间分别为15.62%、13.46%、12.14%和13.72%,2002~2003年,冬小麦期间15.36%、20.47%、15.31%和13.88%,夏玉米期间9.30%、15.16%、11.27%和9.96%;同一日期4个处理间的最大变幅,2001~2002年冬小麦与夏玉米期间分别为15.98%和6.30%,2002~2003年为16.48%和6.98%。40~60cm层次,同一处理不同日期的变化幅度,2001~2002年冬小麦期间分别为14.55%、9.54%、7.01%和5.61%,夏玉米期间分别为11.01%、7.26%、7.53%和8.30%,2002~2003年,冬小麦期间7.07%、13.37%、5.71%和7.26%,夏玉米期间3.23%、7.97%、4.05%和4.18%;同一日期4个处理之间的最大变幅,2001~2002年冬小麦与夏玉米期间分别为11.03%和8.90%,2002~2003年为9.09%和6.71%。由此看出,2001~2003年0~30cm处理间的同一处理不同日期的变化幅度明显大于40~60cm,而同一日期不同处理间的最大变幅是冬小麦生育期间>夏玉米生育期间,冬小麦各处理年际间有差异,但夏玉米年际间差异不大。

由图3还可看出,0~30cm土壤水分变化的峰明显多于40~60cm。40~60cm土壤层次中,2001~2002年,处理1和处理2的土壤含水量在冬小麦中后期(2002年4月7日以后)有明显的降低趋势,而处理6及处理8的土壤含水量基本接近,夏玉米生育期间,各处理间的土壤含水量渐渐趋于一致;2002~2003年,处理1在4月17日前一直处于低土壤含水量的状态,由于4月17日的大量降雨(132.6mm)造成土壤含水量陡然上升,到冬小麦收获时期土壤含水量还比灌溉节水的高。

2.2.2 两熟农田土壤贮水量变化特点 2001~2002年的土壤贮水量变化总体上呈下降趋势,可能归因于作物利用和较高的蒸散。在夏玉米生育期间虽有所升高,但也只达到拔节挑旗时的贮水量。2002~2003年的土壤贮水量总体呈上升趋势,冬小麦生育期间由于受越冬水和4月17日降雨的影响,土壤贮水量变化趋势不甚明朗,但是夏玉米生育期间土壤贮水量是升高的(图4)。

图4还表明,2002年冬小麦拔节后,处理1与处理2的土壤贮水量基本相似,而且这种相似性一直持续到

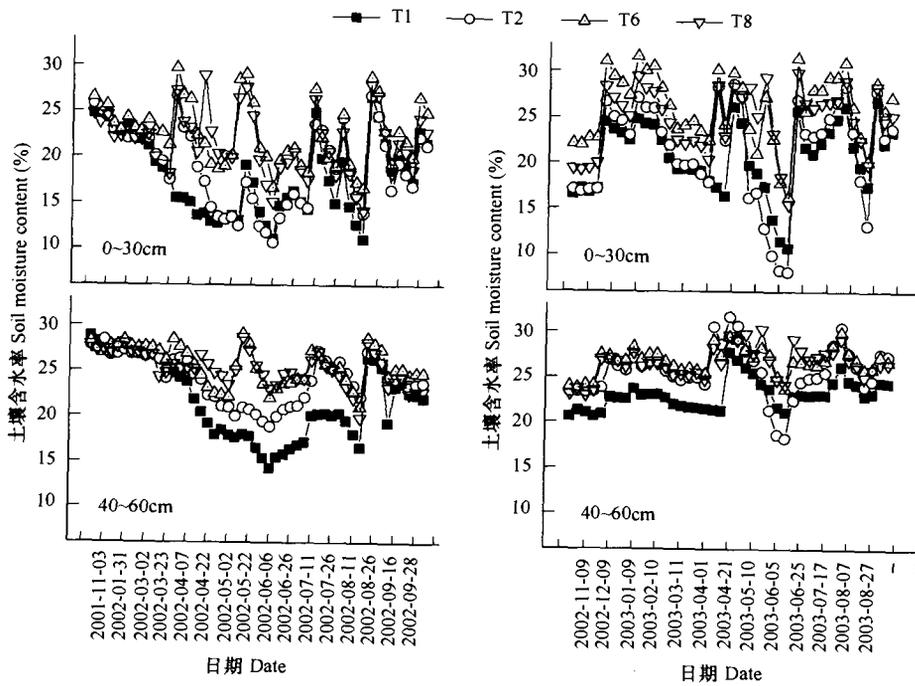


图3 冬小麦-夏玉米生育期间 0~30cm 和 40~60cm 土层土壤含水量动态变化

Fig.3 Dynamic changes of soil moisture content (0~30cm and 40~60cm) in wheat-maize whole stage

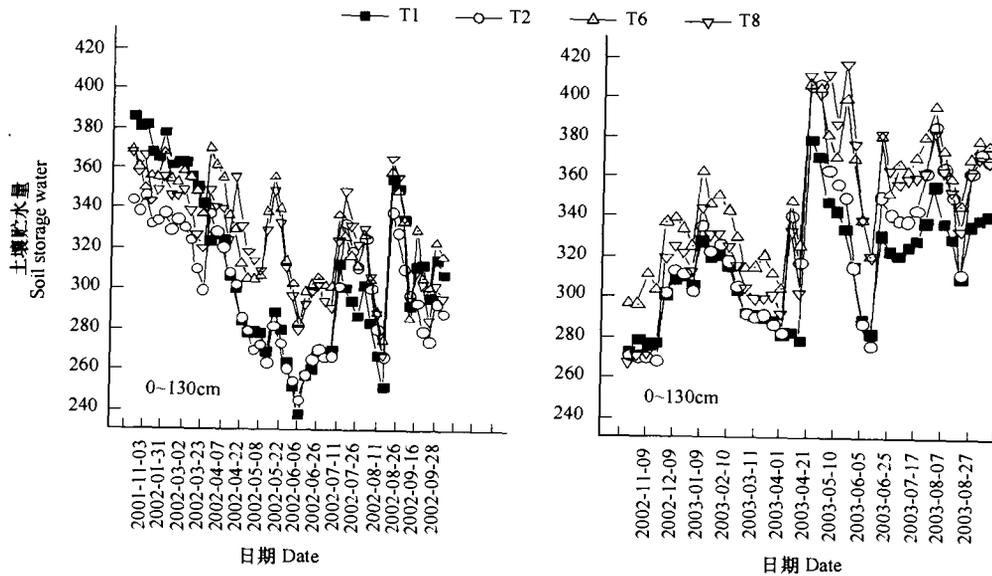


图4 冬小麦-夏玉米生育期的农田土壤贮水量(0~130cm)变化特点

Fig.4 Changes of soil storage water (0~130cm)in wheat-maize field during whole stages

2003 年夏玉米收获。而 2001~2003 年,处理 6 与处理 8 之间的贮水量差异不显著。通过 2001~2002 年和 2002~2003 年冬小麦生育期间的土壤贮水量比较,可以看出,2001 年的冬小麦底墒水使各处理的土壤贮水量直到挑旗水灌溉后才显出差异,2002 年的冬小麦越冬水使土壤贮水量在灌拔节水后,不灌溉处理的贮水量还高于播种时的贮水量。

2.2.3 两熟农田某一时期不同深度土壤水分变化特点 图 5 为两熟农田某一时期不同深度土壤水分变化特点,2002 年选择了冬小麦灌拔节水(3 月 26 日)前和灌灌浆水(5 月 10 日)前的日期,夏玉米拔节(7 月 18 日)前

和灌浆(8月27日)的日期,2003年选择了冬小麦灌拔节水(4月8日)后和灌抽穗水(5月1日)后的日期,夏玉米拔节(7月23日)后和灌浆(8月31日)前的日期。

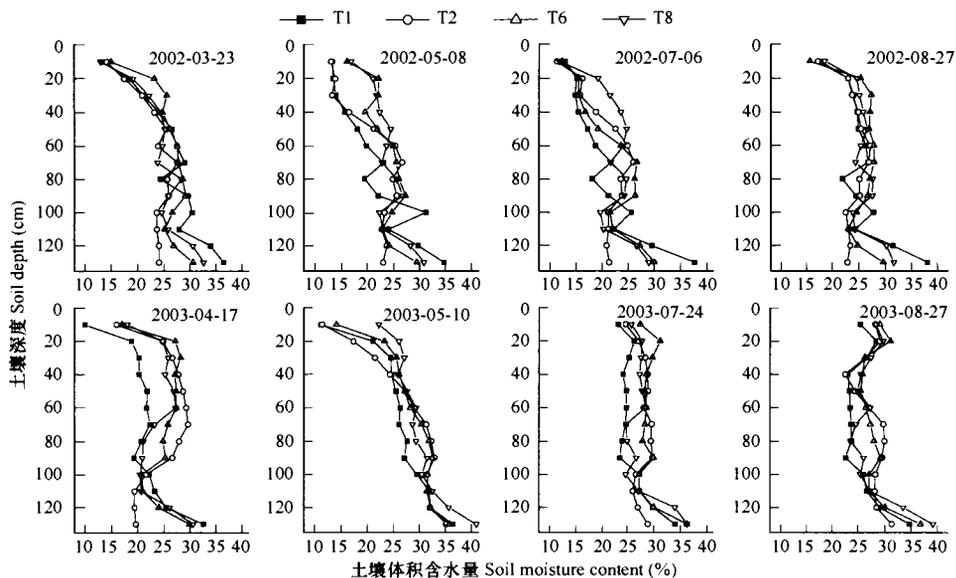


图5 两熟农田某一时期不同深度土壤水分动态变化

Fig.5 Dynamic changes of different soil depths in wheat-maize field at special stage

图5显示,土壤水分在空间分布上,在不同时期、不同作物及不同灌溉处理的不同深度土壤水分均呈不规则的“Z”型变化,而且变化曲线的上拐点均在20cm,下拐点均在110cm。2001~2002年的处理1分别在80cm和100cm处各多了一个拐点,2003年夏玉米生育期间处理1和处理8分别在40~90cm和70~90cm形成明显的缺水带,2001~2002年110cm以下的深层含水量全年变化不大,然而,2002~2003年却有明显的变化。2003年4月17日的不同深度土壤水分变化曲线与2002年3月23日比较可看出,灌水可明显改变土壤水分状况,但2002年3月23日和2002年8月27日的四个处理间差异不显著。降雨(7月21日降雨36.3mm)能改变不同处理的土壤水分状况(2003年7月24日图),还可使灌溉效果变得不显著(2003年5月10日图)。

2.2.4 两熟农田耗水量、产量及水分利用效率的特点 从耗水量来看,2001~2003年,无论是冬小麦、夏玉米,还是二者总和,均是处理8的耗水量最高;处理1和处理4在冬小麦生育期间耗水量均最低,处理1和处理2是夏玉米生育期间耗水量和两季作物总耗水最低的处理,且冬小麦的耗水量随灌水量的增加而增大,夏玉米在同样降雨或灌水的情况下有相似的规律性,由此看出,冬小麦期灌水不仅影响冬小麦耗水,而且影响夏玉米耗水。

从产量来看,2001~2003年冬小麦产量均以处理6和处理8最高,而产量最低处理2001~2002年是处理1和处理4,2002~2003年是处理1和3。2001~2003年夏玉米产量与两熟总产处理间差异不显著(F 检验),其中,2002年夏玉米处理4和处理7产量最高,处理2和处理6最低,2003年夏玉米处理1和处理3最高,处理2和处理4最低。从总产来看,2001~2002年 $T7 > T8 > T4 > T1 > T3 > T2 > T5 > T6$, 2002~2003年 $T6 > T3 > T8 > T7 > T5 > T4 > T1 > T2$ 。通过两年的产量比较,可看出2002~2003年的冬小麦产量各处理均低于2001~2002年,其各处理产量平均仅是2001~2002年的87.39%。

从水分利用效率(WUE)来看,2001~2003年无论从一季作物还是从全年两季作物来看,均是处理1的 WUE 最高,处理5和处理8的 WUE 在冬小麦季均是最低,在夏玉米季2002年处理5和处理6最低,2003年处理4和处理8最低。两年的 WUE 比较显示,无论从一季作物还是从全年两季作物来看,2002~2003年各处理 WUE 均低于2001~2002年相应处理 WUE ,其中2002~2003年全年 WUE 的平均仅是2001~2002年的81.06%左右,冬小麦与夏玉米期间的 WUE 平均分别为2001~2002年的77.20%和83.46%。但从灌水增加量

与产量增加量来看,冬小麦和总产 2002~2003 年相对处理 1 的产量效益比高于 2001~2002 年,这与 WUE 的规律恰好相反。

表 2 两熟农田耗水量、产量及水分利用效率(WUE)的变化特点

Table 2 Characteristics of water consumption, yield and water use efficiency (WUE) in wheat-maize field

项目 Item	年份 Year	作物 Crop	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
耗水量 Water consumption (mm)	2001~2002	冬小麦 Wheat	273.94d	285.46cd	291.50cd	281.96d	355.71ab	332.00bc	346.55ab	393.81a
		夏玉米 Maize	232.16c	251.59bc	261.72ab	265.09ab	257.74abc	264.99ab	265.24ab	279.28a
		总耗水 Total	506.10d	537.05c	553.22c	547.05c	613.47b	596.99b	611.79b	673.09a
	2002~2003	冬小麦 Wheat	272.10d	332.13c	331.98cd	331.83d	392.00b	391.96b	391.98b	451.66a
		夏玉米 Maize	294.92bc	287.25c	301.09abc	307.24abc	304.77abc	309.71abc	313.77ab	319.06a
		总耗水 Total	567.02d	619.38c	633.07c	639.07c	696.76b	701.66b	705.75b	770.72a
产量 Yield (kg·hm ⁻²)	2001~2002	冬小麦 Wheat	6449.1bc	6604.2ab	6447.7bc	6113.8c	6686.8abc	7123.5ab	6624.7abc	7457.1a
		夏玉米 Maize	8401.2a	7582.4a	7940.1a	9469.9a	7486.5a	6995.6a	9541.2a	8245.2a
		总产 Total	14850.3a	14186.6a	14387.8a	15583.7a	14173.3a	14119.0a	16165.8a	15702.3a
	2002~2003	冬小麦 Wheat	5073.9b	5911.4ab	5494.9b	5960.7ab	5627.4ab	6499.7a	5734.8ab	6457.5a
		夏玉米 Maize	8387.5ab	7524.0b	7524.0b	8797.5a	7542.0b	8274.0ab	8038.3ab	7728.0ab
		总产 Total	13463.4a	13435.4a	14292.4a	13502.7a	13724.4a	14773.7a	13773.1a	14185.5a
WUE (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	2001~2002	冬小麦 Wheat	23.81a	23.18a	22.22a	21.83a	18.79a	21.54a	19.12a	18.96a
		夏玉米 Maize	36.29a	30.14a	30.40a	35.55a	29.00a	26.43a	35.96a	29.64a
		全年 Whole year	29.37a	26.43ab	26.01ab	28.56ab	23.11b	23.74ab	26.43ab	23.32b
	2002~2003	冬小麦 Wheat	18.65a	17.80a	16.55ab	17.96a	14.36b	16.58ab	14.63b	14.30b
		夏玉米 Maize	28.42ab	26.23bc	29.22a	24.54c	26.58abc	26.71abc	25.62bc	24.22c
		全年 Whole year	23.73a	21.69b	22.57ab	21.13bc	19.70cd	21.06bc	19.52cd	18.41d

* 同一行标记不同字母表示差异达显著 ($p < 0.05$) 水平 Means in the same row followed by different letters were differed significantly at 0.05 levels ($p < 0.05$)

3 结论与讨论

3.1 气象因素与耗水规律的关系

大田试验没有遮雨设施,不能严格控水,据李锋瑞等^[3]研究,生育期有效降雨量是影响作物耗水量的主要因素,本试验也证明了这一点,2003 年 4 月 17 日的降雨和 2003 年夏玉米生长季的连绵降雨就是很好的例子。降雨能对不同处理产生不同影响,原因归结于大田土壤持水能力及不同处理消耗土壤水分的差异。2001~2002 年冬小麦全生育期降雨 126.4mm,为蒸散量的 33.12%,夏玉米全生育期降雨 132.7mm,为蒸散量的 45.17%;2002~2003 年的冬小麦生育期间降雨 222.2mm,为蒸散量的 45.98%,夏玉米生育期间降雨 305.3mm,与蒸散量(322.1mm)相近。由此看出,2002~2003 年用于补偿蒸散的降雨明显高于 2001~2002 年,但是从全年的 WUE 看,2002~2003 年明显低于 2001~2002 年,可能有 3 种原因:一是 2002~2003 年冬小麦降雨严重失衡,主要来自一天的降雨(132.6mm,占总降雨的 59.68%),冬小麦利用降雨的效率低,二是 2003 年夏玉米期间高降雨量带来较高的蒸散,大大增加耗水量(各处理耗水量均是 2002 年处理的 3 倍多),三是大量降雨造成过多的水分无效下渗。因此,以后需要进一步分析水分下渗量的研究,明确大量降雨的无效下渗量,为提高降雨利用效率提供强有力支持。本试验证明在鲁西北平原的气象条件下,冬小麦-夏玉米两熟农田实行冬小麦灌溉而夏玉米不灌的灌水措施是可行的,并且适当结合气象条件调整灌水,将更有利于提高降雨利用效率,从而为雨养农业提供一个新的发展思路。

3.2 土壤水分在时间和空间上的分布特点

土壤与作物根系的关系比较密切,土壤水分又是植物蒸腾的主要来源。除其它环境因素外,土壤含水状况能显著影响根下扎的深度和强度^[9],干旱导致土壤表层根量减少,深层根量所占比例增大,但是促进根系伸长,增加根系分枝级数,使植株更完全地利用土壤水分^[10]。因此,有必要了解土壤水分的时空分布特点,从而为调控作物根系的生长发育奠定基础。

土壤水分从时间分布来看,冬小麦期间在灌溉和降雨的影响下土壤水分有下降的趋势,而夏玉米期间有

升高的趋势,原因可能是2002年夏玉米季的灌水及2003年夏玉米季的大量降雨造成。土壤含水量随深度的增加逐渐趋于稳定^[11],而且小麦吸收的水分主要来自0~70cm土壤^[12,13],因此,本试验只讨论了0~60cm层次的土壤水分变化情况。0~30cm处理间的同一处理不同日期的变化幅度明显大于40~60cm,可以说明0~30cm土层是土壤和大气水分交换的活跃层,因此,需进一步研究0~30cm土层,以更好的维持0~30cm的土壤水分稳定。处理1和2在2001~2002年冬小麦期间中后期表土层水分急剧下降,可能就是因中后期没有灌水又没有大量降雨供应促成强烈的蒸发而造成。

土壤水分的恢复过程因环境、土壤和作物组成不同而有很大的差异^[14-16]。通过这两年的表土层水分变化与土壤贮水量数据比较,并结合冬小麦与夏玉米生育期间的降雨状况,可以看出,对耗水量较大且耗水周期长的冬小麦来说,灌溉或是大量少次的降雨均能短期改变土壤水分状况,而不能显著增加土壤贮水量。如果冬小麦收获后不种任何作物,降雨积累水分的水分利用效率很低^[4,17],本试验证明,冬小麦-夏玉米两熟农田在保证冬小麦与夏玉米正常生长的同时,又可增加土壤贮水量,从而减少水分的无效下渗,提高水分利用效率。

土壤水分从空间分布来看,土壤水分变化趋势一致,均呈“Z”型变化,而且0~60cm层次的土壤水分动态变化幅度较大。灌水或大量降雨对0~30cm土壤层次的影响程度要明显大于40~60cm土壤层次,可能是0~30cm受土壤蒸发影响较大的缘故,这也很好地解释了2002~2003年处理1在4月17日前一直处于低土壤含水量状态的原因。2001~2002年处理1出现多拐点的情况,这是因为表土层水分供应不足,促使冬小麦根系下扎,根系吸收活动区下移^[9],而夏玉米降雨不多,又不能及时补充水分缺乏,故造成全年均显示出多拐点变化。2003年夏玉米生育期间处理1和处理8均出现缺水带,原因可能是前期冬小麦灌浆期根系吸水区的下移造成的。2002~2003年110cm以下的土壤水分有显著变化进一步证明过多降雨的无效下渗的可能性。多个空间分布图显示,处理6的0~40cm层次均具有较高的土壤水分含量,这可能是因处理6的区域土壤持水力较强,这也解释了处理6与处理8表土层的土壤水分变化曲线吻合的原因。

3.3 作物产量与耗水规律的联系

关于土壤水分与作物产量的关系长期以来存在两种观点^[18,19]:一是认为任何时期、任何程度的干旱(水分不足)都会使作物减产,另一种观点,充足供水与适当控水交替对作物产量形成更有利。

两年的试验证明,不管冬小麦-夏玉米两熟农田的耗水规律如何变化,灌水量和灌水时期不同的各处理间的产量差异均不是很大,仅个别处理有显著差异,而且从两熟的总产来看,各处理均是不显著,原因可能是冬小麦产量较低的处理,耗水量也相对较低,土壤含水量也较低,这有利于夏玉米更好地利用夏季降雨,减少降雨无效下渗,提高降雨的利用效率。本试验处理1的冬小麦耗水最少,产量最低,说明冬小麦耗水是确保产量的基础。试验中冬小麦产量以处理6和8最高,同时处理8的耗水量也是最高的,但是在相同灌水量的处理中,处理6却是耗水量最低的处理,结合处理8和处理5的低WUE,可以得出,冬小麦较适宜的灌水方案是确保拔节和灌浆水。在低灌水量的处理中,两年产生不同的效果。在降雨量相对较少的2001~2002年,冬小麦产量与灌水量成正比关系,而在降雨较多的2002~2003年,冬小麦产量参差不齐,可能是4月17日的大量降雨造成灌水量的增加没有带来相应产量的结果,同时结合这两年冬小麦耗水量与灌水量成正比关系,可以推断,高耗水量不一定带来高的产量。本试验证明夏玉米的产量与前季冬小麦的产量有一定的互补作用,例如,第1年的处理4(冬小麦最低,夏玉米第二)和处理6(冬小麦第二,夏玉米最低),第2年的处理1(冬小麦最低,夏玉米第二)和处理3(冬小麦第七,夏玉米最高),可能是因为第一年的灌浆水的后效作用,第2年由于大量降雨,造成拔节水作用和灌浆水的后效作用减弱。因此,冬小麦-夏玉米两熟模式可在保证总产稳定的基础上节水,为保证国家粮食安全,发展节水高效农业提供了一个平台。

作物产量与耗水规律的关系,水分利用效率(WUE)是一个桥梁,也是节水农业的重要衡量指标。从WUE角度来看,2001~2002年的处理1最高,虽然在冬小麦季产量最低,但是夏玉米季却较高,因此,在供水条件较差的地区可采用只依靠降雨的灌溉方式。从全年的WUE来看,WUE与灌水量成负相关,原因可能是两年的

总产差异不显著促成。*WUE* 高的年份作物的灌水增加量与产量增加量的效益比不一定高。

References:

- [1] Wu K, Xie X Q, LIU E M. Schedules and managements of irrigation in the high-yielding cultivation of winter wheat and summer maize in Yucheng City of Shandong Province. *Transactions of the Csa*, 1998, 14(2): 138 ~ 142.
- [2] Burns R L, Cook D J, Philips R E. Influence of no tillage on soil moisture. *Agron. J.*, 1971, 73: 593 ~ 596.
- [3] Papendick R I, Lindstrom M J and Cochran V L. Soil mulch effect on seedbed temperature and water during fallow in eastern Washington. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1973, 37: 307 ~ 314.
- [4] Li F R, Zhao S L, Li F M, *et al.* Study on the water consumption law of complex crop systems in the tablelands of the Eastern Gansu Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(4): 420 ~ 426.
- [5] Farahani H J, Peterson G A, Westfall D G, *et al.* Soil water storage in dryland cropping systems: The significance of cropping intensification. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 984 ~ 991.
- [6] Zhang Q J, Luo Y, OuYang Z, *et al.* Water Use and Irrigation Management of Winter Wheat in the North-western Plain of Shandong Province. *Progress in Geography*, 2002, 21(6): 600 ~ 608.
- [7] Chen J Y, Wu K. The impacts of groundwater on evapotranspiration by using lysimeter. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(5): 439 ~ 446.
- [8] Yu S Z, Chen Y H, Zhou X B, *et al.* Effect of straw-mulch during wheat stage on soil water dynamic changes and yield of summer maize. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 175 ~ 178.
- [9] Tripathi R P, Misra R K. Wheat root growth and seasonal water use as affected by irrigation under shallow water table conditions. *Plant and Soil*, 1986, 92: 181 ~ 188.
- [10] Sharma B R, Chaudhary T N. Wheat root growth, grain yield and water uptake as influenced by water regime and depth of nitrogen placement in a sand soil. *Agriculture Water Management*, 1983, 6: 365 ~ 373.
- [11] Li Q Q, Fang Q X, Chen Y H, *et al.* Effect of different soil moisture before sowing on water consumption characteristics and yield of summer maize. *Transactions of the Csa*, 2004, 20(2): 93 ~ 96.
- [12] Proffitt A P B, Berliner P R, Oosterhuis D M. A comparative study of root distribution and water extraction efficiency by wheat grown under high- and low-frequency irrigation. *Agron. J.*, 1985, 77: 655 ~ 662.
- [13] Entz M H, Gross K G, Fowler D B. Root growth and soil-water extraction by winter and spring wheat. *Can. J. Plant. Sci.*, 1992, 72: 1109 ~ 1120.
- [14] Mccallum M H, Peoples M B, Connor D J. Contribution of nitrogen by field pea (*Pisum sativum* L.) in a continuous cropping sequence compared with a lucerne (*Medicago sativa* L.) based pasture ley in the Victorian Wimmera. *Aust. J. Agric. Res.*, 2000, 51: 13 ~ 22.
- [15] Zhang X C, Lu Z F. Soil dynamics and water use on slope land. *Soil Conservation Research*, 1996, 3(2): 46 ~ 56.
- [16] Latte R A, Cocks P S, Matthews C. Lucerne pastures to sustain agricultural production in southwestern Australia. *Agricultural Water Management*, 2002, 53: 99 ~ 109.
- [17] Shen Y Y, Nan Z B, Gao C Y, *et al.* Spatial and temporal characteristics of soil water dynamics and crop yield response from a 4-year of Lucerne and winter wheat rotation system in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 640 ~ 647.
- [18] Fisher R A. The effect of water stress at various stages of development on yield process in wheat. In: *Plant Responses to Climate Factors*, 1973, 223 ~ 241.
- [19] Turner N C. Plant water relations and irrigation management. *Agriculture Water Management*, 1990, 17: 59 ~ 75.

参考文献:

- [4] 李锋瑞, 赵松岭, 李凤民, 等. 陇东黄土旱塬作物组合系统农田耗水规律研究. *生态学报*, 1995, 15(4): 420 ~ 426.
- [6] 赵千钧, 罗毅, 欧阳竹, 等. 鲁西北平原冬小麦耗水过程与节水灌溉管理模式讨论. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 600 ~ 608.
- [9] 吴凯, 谢贤群, 刘恩民. 山东省禹城市冬小麦夏玉米高产灌溉制度及其管理. *农业工程学报*, 1998, 14(2): 138 ~ 142.
- [7] 陈建耀, 吴凯. 利用大型蒸渗仪分析潜水蒸发对农田蒸散量的影响. *地理学报*, 1997, 52(5): 439 ~ 446.
- [8] 于舜章, 陈雨海, 周勋波, 等. 冬小麦期覆盖秸秆对夏玉米土壤水分动态变化及产量的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 175 ~ 178.
- [11] 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. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 93 ~ 96.
- [15] 张兴昌, 卢宗凡. 坡地土壤水分动态及耗水规律研究. *水土保持研究*, 1996, 3(2): 46 ~ 56.
- [17] 沈禹颖, 南志标, 高崇岳, 等. 黄土高原苜蓿-冬小麦轮作系统土壤水分时空动态及产量响应. *生态学报*, 2004, 24(3): 640 ~ 647.