

地下水埋深对冬小麦和春玉米产量 及水分生产效率的影响

刘战东¹, 肖俊夫¹, 牛豪震², 贾云茂²

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453003; 2. 山西省汾河水利管理局, 山西 太原 030002)

摘 要: 利用排水式蒸渗仪, 通过设置 6 种地下水位控制处理(地下水位埋深分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 和 3.0 m)试验, 探讨了太原盆地不同地下水埋深对冬小麦和春玉米生长指标、产量、产量构成因素及水分生产效率(WUE)的影响。结果表明, 地下水埋深对冬小麦和春玉米千粒重的影响较小, 对冬小麦干物质重影响显著($P=0.05$); 地下水埋深超过 1 m 后, 冬小麦基本苗、分蘖数、穗数、穗粒数明显增加, 春玉米株高、穗位高度、单株穗重明显增加。通过连续多年试验分析(2002~2006 年), 冬小麦产量和 WUE 随地下水埋深的增加而增加; 地下水埋深 $H=0.5$ m 时, 春玉米产量最高(8 262.0 kg/hm²), 而 WUE 最低(0.97 kg/mm); $H=1.5$ m 时, 春玉米 WUE 最高(1.44 kg/mm), 产量(7 221.0 kg/hm²)低于最高产量。在山西汾河灌区, 从提高作物产量和 WUE 的双重目标出发, 冬小麦和春玉米生育期内的地下水适宜埋深应分别控制在 1.5 m 和 1.0 m 以下。

关键词: 地下水埋深; 产量; 水分生产效率; 冬小麦; 春玉米

中图分类号: S273.4; S512.101; S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0029-05

在地下水埋深较浅的地区, 土壤—植物—大气连续体中的水分因自然和人为的作用必然要与地下水发生联系, 不同地下水埋深对土壤水分分布和农作物生长发育、产量、水分生产效率等有着不同程度的影响^[1,2]。王晓红等研究认为, 玉米株高随地下水埋深增加而增加, 不同地下水埋深处理叶面积指数存在较大差异^[3]。Kahlow 等研究表明, 地下水位埋深为 0.5 m 时, 小麦产量最高^[4]。封超年等研究发现, 小麦千粒重随地下水埋深的增加而增加, 产量不同的原因是拔节后地下水埋深影响生育后期干物质的累积^[5]。王元华采用动态水位和静态水位相结合的方法, 研究认为小麦全生育期地下水埋深为 0.8 m 时产量最高, 地下水埋深对小麦产量的影响, 主要是增穗, 其次是增重, 对千粒重的影响较小^[6]。巴比江通过人工控制地下水位试验表明, 地下水位太深或太浅冬小麦产量均下降, WUE 最高值出现在地下水埋深 1.0 m^[7]。此外, 地下水埋深 1.0 m 时春玉米产量和 WUE 最高; 地下水埋深在 1.0 m 以下时, WUE 随地下水埋深增加而降低^[8]。综上所述, 关于地下水对单一作物的生长指标、产量及水分利用的影响, 有关学者做了大量的工作, 而对于同一地区同时兼顾两种作物进行对比分析研究涉及较少。为此, 本文通过人工控制地下水位的方法, 探索不同地

下水埋深条件下冬小麦和春玉米两种作物的生长指标、产量及水分利用情况, 试图为地下水浅埋区冬小麦和春玉米节水灌溉制度的制定和高效灌溉管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于山西省中部太原盆地(111°55'~112°37'E, 37°7'~37°53'N), 为温带大陆性半干旱气候类型, 海拔高程 749 m, 土壤母质为汾河冲洪积物, 土壤类型为潮土。试验区年太阳辐射为 54.5~56.5 J/m², 最高气温 39.4℃, 最低气温 -25.5℃, 年平均气温 10.43℃, 最大冻土深 0.95 m, 全灌区平均无霜期为 171 d。多年平均降水量 453.1 mm, 多年平均蒸发量为 1 031.9 mm。常年地下水埋深在 0.5~5.0 m 间变化, 地下水矿化度 896 mg/L, pH 值 8.3。

1.2 试验设计与方法

试验于 2002~2006 年在汾河灌区中心试验站测坑试验区进行。测坑为有底的全封闭坑, 土体表面尺寸为 2 m×2 m, 其深度随不同的地下水埋深而不同, 地下水埋深分别控制为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 和 3.0 m 共 6 个处理, 每个处理重复 3 次。测坑地下水水位采用自制的 Mariotte 瓶装置严格控制。

收稿日期: 2010-03-27

基金项目: 国家现代玉米产业技术体系建设专项资金资助(nycytx-02-18)

作者简介: 刘战东(1981—), 男, 河南沁阳人, 助理研究员, 主要从事节水灌溉基础理论研究。E-mail: Lzddragon@163.com。

通讯作者: 肖俊夫(1961—), 男, 辽宁庄河人, 副研究员, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。

测坑回填土壤为当地的原状土壤,土壤结构:0~30 cm 为耕作土壤,容重为 1.32 g/cm³,30~77 cm 为粘土层,容重为 1.39 g/cm³,77~150 cm 为细砂土,容重为 1.46 g/cm³。0~100 cm 土壤质地为沙壤土,土壤平均容重 1.36 g/cm³,田间持水量 26.9%。土壤含盐量平均为 3 g/kg,有机质平均为 13.8 g/kg,速效磷为 20.6 mg/kg。

冬小麦每年 10 月播种,翌年 6 月收获。冬小麦的生育期划分为 5 个阶段,分别为苗期、返青期、拔节期、孕穗期和成熟期。春玉米种植为每年的 4 月,当年的 9 月份收获。春玉米的生育期划分为 4 个阶段,即苗期、拔节期、抽雄期和成熟期。生育期内根据土壤水分状况灌水,各个处理均设置为充分灌溉;采用传统畦灌方法,灌水量用水表计量。为了研究作物在不同地下水埋深条件下的土壤水分动态,在每一个测坑安装有中子管,用中子仪测定试验期间测坑剖面的土壤含水量。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 地下水利用量和测坑底部排水量 采用 Mariotte 瓶装置进行观测,每天观测 2 次。

1.3.2 土壤含水量 0~20 cm 采用取土烘干法测定,20 cm 土层以下采用 CPN503DR 中子水分仪(美国)测定,每 20 cm 土层测定一个数据,每 5 d 测定 1 次,测定深度到地下水位处,灌水或降水前后加测。

1.3.3 气象资料 试验区内设有常规的气象观测场,主要项目有:降水、蒸发、风速、风向、日照、气温、地温、湿度、气压等,具体的观测方法及要求按国家地面气象观测规范^[9]进行。

1.3.4 作物耗水量采用水量平衡方程计算

$$ET_c = P_e + I + G - D \pm \Delta W \quad (1)$$

式中, ET_c 为作物生育期内某时段的耗水量(mm); P_e 为时段内有效降水量(mm); I 为时段内灌水量(mm); G 为时段内地下水利用量(mm),通过 Mariotte 瓶装置进行观测; D 为时段内深层渗漏量(mm),通过测坑底部排水管计量; ΔW 为时段内土壤储水量的变化量,减少取正值,增加取负值(mm)。

1.3.5 作物水分生产效率(WUE)采用以下公式计算

$$WUE = \frac{Y}{ET_c}$$

式中, Y 为作物的产量(kg); ET_c 为作物全生育期耗水量(mm)。

1.3.6 产量性状 收获前测定。冬小麦穗粒数:每处理从样点取 20 个麦穗混合脱粒,数清总粒数,然后穗数除总粒数(g);春玉米穗位高度:采用直尺从穗基部量至植株底部,每处理随机取样 20 穗,取平均值(cm);春玉米单株穗重,每处理随机取样 20 株称重,取平均值(g);千粒重:冬小麦和春玉米每千粒的重量,每处理重复 3 次取平均值(g)。

1.3.7 实际产量 每处理单收、脱粒、单晒,测定实际产量,然后随机选取晒干后的籽粒测定百粒重。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深对冬小麦生长与产量构成的影响

不同地下水埋深条件下冬小麦出苗、分蘖、穗数、穗粒数、千粒重、干物质重等的测定结果(以 2005~2006 年冬小麦生长年为例)见表 1。

表 1 不同地下水埋深条件下冬小麦生长状况和产量构成因子

Table 1 The growth status and yield component factors for winter wheat under different groundwater depth

地下水埋 深 H Groundwater depth(m)	基本苗 (万株/hm ²) Basic seedlings (10 ⁴ plant/hm ²)	分蘖数(万株/hm ²) Tiller number(10 ⁴ plant/hm ²)		穗数 Spike number (10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	干物质重 Dry matter weight (kg/hm ²)
		越冬期 Over wintering	拔节期 Jointing				
0.5	375.0	399.0	138.0	85.5c	24.2bc	40.2bc	3499.5f
1.0	418.5	490.5	399.0	238.5b	22.4c	41.6ab	3639.0e
1.5	496.5	606.0	790.5	445.5a	27.7ab	40.3b	8667.0c
2.0	546.0	642.0	724.5	426.0a	30.6a	42.4a	8041.5d
2.5	501.0	570.0	684.0	450.0a	30.0a	38.8c	8958.0b
3.0	496.5	534.0	738.0	450.0a	31.1a	42.7a	10126.5a

注:数值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Figures with different letters mean significant difference at 0.05 probability level.

从表 1 可以看出:地下水位严重影响冬小麦的生长和产量构成状况,地下水埋深较浅时,如 $H =$

0.5 m 和 $H = 1.0$ m 时,出苗、分蘖、单位面积穗数、干物质重都低于 $H \geq 1.5$ m 的处理,其中干物质降

低 1 倍多,只有千粒重不受埋深的影响。产生这种结果的原因是:地下水埋深过浅,冬小麦根区长期保持较高的土壤含水量,通气性差,恶化了根际微环境;另一方面,由于冬小麦生育期内的降雨量少,土壤水分运动呈蒸发型,地下水中的盐分不断被带到近地表,产生次生盐碱化,也影响了冬小麦的出苗和分蘖。

2.2 地下水埋深对春玉米生长和产量构成的影响

春玉米的出苗、株高、穗位高度、单株穗重及千粒重等状况如表 2 所示。由于春玉米耗水量较大,且生育期内气温较高,蒸发较强,土壤水分运动强烈,维持了根区水、气、热的协调,根系活动层中较高的土壤含水量对春玉米生长和产量构成状况影响不大。如在 2002 年的首次试验中,春玉米出苗在所有

地下水埋深的处理中一样,在 $H = 0.5\text{ m}$ 和 $H = 1.0\text{ m}$ 的处理中,由于地下水上升到根系活动层,根区一直保持较高的土壤水分,春玉米生长表现出株高较高、单株穗重增大的特点。但在以后进行的试验中,并没有得到与 2002 年相同的结果。主要是由于试验区灌溉水和地下水含盐量较高,地下水埋深较浅时容易引起土壤的次生盐碱化,盐害成为春玉米生长受抑制的主要原因。从 2003 年试验结果可以看出,出苗和株高已开始受到地下水埋深的影响,与地下水埋深较深($H > 1\text{ m}$)春玉米相比, $H = 0.5\text{ m}$ 处理的出苗率、株高降低,单株穗重和千粒重也有一定幅度的减少。随后的几年试验中,由于降雨的一定淋洗作用和采取措施处理,春玉米生长呈现一定的波动,但都表现出地下水埋深浅($H < 1\text{ m}$)时的春玉米生长受到抑制。

表 2 不同地下水埋深的春玉米生长状况与产量构成因子

Table 2 The growth status and yield component factors for spring maize under different groundwater depth

埋深 H Groundwater depth (m)	2002					2003				
	株数 (株/hm ²) Plants (plant/hm ²)	株高 Plant height (cm)	穗位高度 Spike height (cm)	单株穗重 Weight per spike (g)	千粒重 1000-grain weight (g)	株数 (株/hm ²) Plants (plant/hm ²)	株高 Plant height (cm)	穗位高度 Spike height (cm)	单株穗重 Weight per spike (g)	千粒重 1000-grain weight (g)
0.5	49995	270	115a	233.5b	365.7a	34995	234	102d	203.5d	353.8b
1.0	49995	258	110a	245.1a	368.2a	46680	255	111c	190.9e	342.9c
1.5	49995	227	88c	219.7c	367.7a	50010	276	116bc	220.7b	352.6b
2.0	49995	232	102b	201.4d	368.2a	49140	273	118ab	219.8b	249.8d
2.5	49995	223	100b	204.9d	370.9a	50010	276	115bc	213.5c	343.7c
3.0	49995	215	91c	198.9d	372.2a	50010	279	123a	233.0a	372.0a

注:数值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Figures with different letters mean significant difference at 0.05 probability level.

在相同地区,春玉米和冬小麦生长状况对地下水埋深反应差异产生的原因在于,该地区为 1 年 1 熟,种植春玉米和冬小麦的试验区总有一定时间为裸地状态,春玉米收获以后,降雨量稀少,土壤水分运动为蒸发型,在裸露期间,地下水蒸发使地表盐分不断积累,因此春玉米种植时就开始受到盐害;而冬小麦刚好相反,冬小麦收获以后,该地区进入雨季,土壤水分运动呈入渗型,带走了积累在地表的盐分,降低了冬小麦种植以后地下水埋深对出苗和生长的影响。

2.3 不同地下水埋深条件下作物水分生产效率的变化

地下水埋深对冬小麦生长的影响,多年的试验结果相对比较稳定,其产量和 WUE 随地下水埋深增加而增加,当 $H = 0.5\text{ m}$ 时,多年平均产量仅为 $1\,437.0\text{ kg/hm}^2$,WUE 也仅为 0.24 kg/mm ;当 $H \geq$

1.5 m 时,产量和 WUE 大幅度提高(见表 3)。总的变化趋势是随着地下水埋深的增加,产量增加,WUE 也持续增加。由此可知,从增产和提高 WUE 的角度出发,冬小麦生育期内的地下水适宜埋深应控制在 1.5 m 以下。

由于在春玉米试验过程中,采取了补苗、冲洗压盐,加之生育期降雨量大,春玉米产量和 WUE 多年试验结果存在很大差异(见表 4)。从总体水平看,地下水埋深 $H = 0.5\text{ m}$ 处理的春玉米产量最高,与长期充分供水有关,但 WUE 最低,仅为 0.97 kg/mm ,是所有处理中 WUE 最高值的 68%; $H = 1.0\text{ m}$ 处理的产量最低,主要是因为降雨和灌溉入渗深度未能到达地下水,使表层的盐分积累在根系活动层所致,WUE 也比较低。 $H = 1.5\text{ m}$ 时,虽然产量略低于最高产量,但 WUE 达到了最高。 $H > 2.0\text{ m}$ 时,地下水向上补给水分甚微或无,玉米根系也难以到

达和利用,产量和 WUE 随地下水埋深增加而减少。和 WUE 的双重目标出发,春玉米生育期内的适宜地因此,为了达到节水高产高效目的,从提高作物产量 下水埋深应控制在 1.0 m 以下。

表 3 不同地下水埋深条件下的冬小麦产量及水分生产效率
Table 3 The yield and WUE for winter wheat under different groundwater depth

埋深 <i>H</i> Groundwater depth (m)	2002 ~ 2003		2003 ~ 2004		2004 ~ 2005		2005 ~ 2006		多年平均 Annual average	
	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)
0.5	2370.0c	0.45	766.5c	0.11	1129.5d	0.16	1479.0e	0.24	1437.0	0.24
1.0	2451.0c	0.66	867.0c	0.17	2862.0c	0.51	1938.0d	0.54	2029.5	0.47
1.5	3927.0b	0.64	2457.0b	0.41	3841.5b	0.56	3700.5c	0.75	3481.5	0.59
2.0	4215.0a	0.67	2688.0a	0.39	3867.0b	0.63	4024.5b	0.90	3699.0	0.65
2.5	3915.0b	0.65	2539.5ab	0.46	3925.5b	0.60	4024.5b	0.80	3601.5	0.63
3.0	4140.0ab	0.83	2713.5a	0.43	4605.0a	0.74	4542.0a	0.92	4000.5	0.73

注:数值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Note: Figures with different letters mean significant difference at 0.05 probability level.

表 4 不同地下水埋深条件下的春玉米产量及水分生产效率
Table 4 The yield and WUE for spring maize under different groundwater depth

埋深 <i>H</i> Groundwater depth (m)	2002		2003		2004		2005		2006		多年平均 Annual average	
	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)	产量 Yield (kg/hm ²)	WUE (kg/mm)
0.5	11776.5ab	1.33	7326.0a	0.94	10021.5b	1.16	10375.5a	1.16	1809.0d	0.25	8262.0	0.97
1.0	12034.5a	1.63	4588.5b	1.90	9469.5de	1.34	6751.5d	0.97	2077.5c	0.40	6984.0	1.25
1.5	11376.0b	1.39	3816.0d	2.89	9168.0e	1.23	9606.0c	1.34	2139.0bc	0.38	7221.0	1.44
2.0	9733.5c	1.30	4294.5c	2.52	9813.0bc	1.41	9874.5b	1.28	2301.0a	0.40	7203.0	1.38
2.5	9159.0d	1.29	4639.5b	2.38	9679.5cd	1.40	9417.0c	1.26	2232.0ab	0.38	7026.0	1.34
3.0	8794.5d	1.21	4369.5c	2.79	10792.5a	1.42	9852.0b	1.30	2343.0a	0.42	7230.0	1.43

注:数值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Note: Figures with different letters mean significant difference at 0.05 probability level.

3 结论与讨论

1) 地下水埋深对冬小麦和春玉米千粒重的影响较小,对冬小麦干物质重影响显著;冬小麦穗数和穗粒数随地下水埋深的增加而增加,当地下水埋深 $H > 1$ m 后,冬小麦基本苗、分蘖数、穗数、穗粒数大幅度提高;春玉米株高随地下水埋深的增加而增加,这与王晓红的研究结果相一致^[3];当 $H > 1$ m 后,春玉米株高、穗位高度、单株穗重也显著增加。

2) 通过连续多年试验分析(2002 ~ 2006 年),冬小麦产量和 WUE 随地下水埋深的增加而增加,当地下水埋深 $H = 3.0$ m 时,冬小麦产量最高;由于毛管上升水使地下水埋深较浅的作物根系微环境恶化,同时也有盐害作用,当 $H < 1.5$ m 时,冬小麦产量和 WUE 受到地下水的影响最为明显,当 $H = 0.5$ m 时,

冬小麦产量和 WUE 最低。地下水埋深 $H = 0.5$ m 和 $H = 1.0$ m 时,春玉米获得较高的产量,其中 $H = 0.5$ m 时,春玉米产量最高,但 WUE 明显小于 $H > 1.0$ m 的处理。

3) 影响春玉米生长、产量及 WUE 的主要因素是盐分的运动和累积。地下水埋深 $H = 1.0$ m 时,春玉米受盐害最重,产量最低;春玉米能够耐受较高的土壤含水量,如不考虑盐分的影响,生长期间土壤含水量越高,产量越高;春玉米 WUE 随地下水埋深增加而增加,因此应避免春玉米生育期间土壤的持续高含水量,以提高春玉米 WUE。在汾河灌区,从提高作物产量和 WUE 的双重目标出发,冬小麦和春玉米生育期的地下水埋深应分别控制在 1.5 m 和 1.0 m 以下。

参考文献:

- [1] Mejia M N, Madramootoo C A, Broughton R S. Influence of water table management on corn and soybean yields[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 46(1): 73—89.
- [2] Benyamini Y, Mirlas V, Marish S, et al. A survey of soil salinity and groundwater level control systems in irrigated fields in the Jezre' el Valley, Israel[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76(3): 181—194.
- [3] 王晓红, 侯浩波. 浅地下水对作物生长规律的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 3(25): 13—16.
- [4] Kahlow N A, Ashra M, ZIA - UL - Haq. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields[J]. *Agricultural water management*, 2005, 76(11): 24—35.
- [5] 封超年, 郭文善, 严六零, 等. 地下水位对小麦产量影响的研究[J]. *江苏农学院学报*, 1995, 16(1): 39—42.
- [6] 王元华. 小麦适宜地下水位试验[J]. *土壤学报*, 1994, 31(4): 439—446.
- [7] 巴比江, 郑大玮, 贾云茂, 等. 地下水埋深对冬麦田土壤水分及产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2004, 23(5): 5—9.
- [8] 巴比江, 郑大玮, 卡热玛·哈木提, 等. 地下水埋深对春玉米田土壤水分及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 57—60.
- [9] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.

Influence of groundwater depth on yield and WUE of winter wheat and spring maize

LIU Zhan-dong¹, XIAO Jun-fu¹, NIU Hao-zhen², JIA Yun-mao²

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, He'nan 453003, China;

2. Fenhe Irrigation Administrative Bureau, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract: The growth indicators, yield, yield components and water use efficiency (WUE) of winter wheat and spring maize were investigated under different groundwater depth by using drainable lysimeter. The results showed that different groundwater depth had little influence on 1000-grain weight of winter wheat and spring maize. They had significant effect ($P = 0.05$) on dry matter weight of winter wheat. When groundwater depth was more than 1.0 m, the planting density, tiller number, spike number, grains per spike of winter wheat and the plant height, spike height, ear weight per plant of spring maize increased significantly. Analysis of experimental data of many years (2002 ~ 2006) indicated that the yield and WUE of winter wheat increased with groundwater depth increasing; when groundwater depth was 0.5 m, the yield of spring maize got to the highest value (8 262.0 kg/hm²), while WUE was the lowest (0.97 kg/mm). When groundwater depth was 1.5 m, the WUE was highest (1.44 kg/mm), while the yield of spring maize (7 221.0 kg/hm²) was lower than the highest value. According to the double target of improving the yield and WUE, the suitable groundwater depth for winter wheat and spring maize were 1.5 m and 1.0 m below respectively in Fenhe Irrigation District. The results obtained from the paper would be helpful to the study of water-saving irrigation design and effective irrigation management of winter wheat and spring maize.

Keywords: groundwater depth; yield; WUE; winter wheat; spring maize