维普资讯 http://www.cqvip.com



# 地下水埋深对春玉米田土壤水分及产量的影响

巴比江[1]，郑大玮[1,*]，卡热玛·哈木提[2]，孟 羽中[3]，王占生[3]，邱江泉[3]

(1. 中国农业大学资源与环境学院，北京 100094；
2. 新疆维吾尔自治区农业厅，乌鲁木齐 830001；3. 山西省汾河水利管理局，太原 030002)

**摘要**：通过6种地下水位控制处理和对照春玉米试验，探讨了地下水埋深对春玉米农田土壤水分、产量以及水分利用效率的影响。结果表明，地下水埋深对春玉米0～100 cm层次土壤水分的影响较大。地下水位越浅这种影响显得越明显；无论地下水埋深深浅，田间累计地下水补给量变化规律可分为4个阶段，即稳定增长期、缓慢增长期、快速增长期和趋于稳定期。地下水位越高，累计地下水补给量越大，土壤排水量越大。较大降雨后土壤开始排水日期随着地下水埋深加深而滞后；地下水埋深1.0 m时春玉米产量和水分利用率最高。地下水位在1.0 m以下时，水分利用效率随地下水位加深而减少。

**关键词**：地下水埋深； 春玉米； 土壤水分动态； 产量； 水分利用效率

**中图分类号**：S273.4；S152.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2004)03-0057-04

# Influence of Water Table on Spring Maize Soil Water and Crop Yield

BA Bi-jiang[1], ZHENG Da-wei[1,*], Kerime Hamut[2], Meng Chong[3], WANG Zhan-sheng[3], QIU Jiang-quan[3]

(1. *College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing* 100094; 2. *Agriculture Department, Xinjiang Uigur Autonomous Region*, ürumqi, 830001; 3. *Fenhe Hydropower Administrative Agency in Shanxi, Taiyuan* 030002)

**Abstract**: A field experiment was conducted to evaluate the effect of water table management on dynamics of soil water, crop yield and WUE of spring maize. The water table management consisted of six water table control set at 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.5 m, 3.0 m from soil surface and one free water table. The results showed: different water table has most influence on 0～100 cm soil layer water content of spring maize field. Soil water content varies more seriously under shallower water table, and it lead to more ground water uptake and more water use. The start day of percolation after irrigation or rainfall lagged under deeper water table. The higher crop yield and WUE occurs when water table set at 1.0 m during whole growing season. WUE decrease when water table increase from 1.0 m.

**Key words**: water table; spring maize; soil water dynamics; yield; WUE

目前北方一些灌区，由于地下水的过量开采，出现了水位持续下降等一系列生态环境问题。特别是华北和西北灌区降水稀少，蒸发强烈，地下水的补给较少，且相当一部分还要消耗于非耕地的蒸发，维持天然植被的存活。在缺乏排水的条件下灌区内部长期使用含盐的地下水进行灌溉，使地下水矿化度增加，土壤盐渍化加剧，灌区边缘天然植被退化，沙丘向灌区推进。如何合理开发地下水资源，以维持经济可持续发展，且又不导致生态环境恶化，正在引起人们的广泛关注[1]。在自然条件下地下水位是动态变化的，要定量研究地下水的影响有一定的难度[5]。为此，本项目通过人工控制地下水位的方法，探讨不同地下水埋深对春玉米农田土壤水分及产量的影响，试图为自然地下水位条件下的定量研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2001～2002年在山西省中心灌溉试验站进行。试验地位于太原盆地中部的胡兰镇，东经112.2°，北纬37.4°，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[4]。试验地土壤结构：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%，地下水矿化度896 mg/L，pH值8.3，土壤含盐量平均0.3%，有机质平均1.38%，速效磷20.6 mg/kg。试验区年太

**收稿日期**：2004-01-20 *通讯作者 Email：zhengdawei44@263.net
**基金项目**：荷兰农业部 Water for Food Programme"Improvement of Agricultural Water Management in North-China"项目(10823)资助
**作者简介**：巴比江，男，生于1973年，博士研究生。主要从事农田节水技术和水资源优化管理研究工作。

维普资讯 http://www.cqvip.com



阳辐射为54.5～56.5 J/m²，年均气温9.5℃，降雨量450 mm，蒸发量1 563.2 mm，无霜期177 d。

### 1.2 试验设计与方法

试验在2 m×2 m 的测坑里进行，测坑土壤按当地土壤剖面分层填充筑。测坑分封底式和非封底式两种：封底式测坑用马氏瓶分别控制地下水埋深0.5 m($WT_{0.5}$)，1.0 m ($WT_{1.0}$)，1.5 m($WT_{1.5}$)，2.0 m($WT_{2.0}$)，2.5 m ($WT_{2.5}$)，3.0 m($WT_{3.0}$)；非封底式坑地下水位为自然水位($WT_{ck}$)，即试验期间埋深有变动的自然坑，作为对照。6个地下水处理加上对照自然水位，试验共计7个处理(在半地下室内用马氏瓶控制地下水位)，每个处理设3个重复，处理布置随机排序。土壤氮、磷、钾测定用常规方法[3]。

试验夏玉米品种为屯玉2号，底肥是磷肥750 kg/hm²，尿素375 kg/hm²。地下水埋深 $WT_{0.5}$，$WT_{1.0}$，$WT_{1.5}$，$WT_{2.0}$，$WT_{2.5}$，$WT_{3.0}$的底墒水(4月15日)分别为98.0，7.5，0.0，18.0，60.0，50.0，60.0mm。土壤含水量利用中子仪测定，从地表向下，每20 cm 为一层，测定至地下水位处，一般每隔10天观测一次，灌水和降雨前后以及作物各生育期加大测定次数，全生育期进行连续测定。每日晚用马氏瓶装置测定地下水补给量 ($CR$) 和地下排水量($D$)。进行春玉米生长发育状况测定、室内考种。春玉米生育期内降水量资料采用山西省中心灌溉试验站气象站的实测资料。春玉米全生育期总降水量为285.3 mm，其中有效降水量为232.1 mm。

### 1.3 农田土壤水分平衡模式

对于一定土壤深度的土层，在某一特定时段，农田水分平衡取决于水分的收入与支出。根据农田水量平衡法计算作物耗水量(忽略截留和径流)公式为：

$$\Delta W = (W_2 - W_1) + P + I + CR + D \qquad (1)$$

式中：$\Delta W$—— 作物耗水量；$W_1$—— 阶段前的土壤含水量；$W_2$—— 阶段后的土壤含水量；$P$—— 降水量；$I$—— 灌溉量；$CR$—— 地下水补给量(即毛管上升水)；$D$—— 土壤排水量(即渗漏量)。

## 2 结果与分析

### 2.1 地下水埋深对春玉米田土壤水分季节变化规律影响

从图1可以看出，不论春玉米农田土壤表层(下图)土壤储水量，还是主要根层(上图)土壤储水量，地下水埋深越浅土壤储水量越高。地下水埋深越深表层或主要根层土壤从地下水得到的补充水量越少，土壤储水量就越小。在春玉米整个生育期自然地下水位一般都在3.0 m 以上，所以对照$WT_{ck}$土壤储水量较地下水埋深3.0 m 的大，但比其他处理小。春玉米整个生育期不同地下水埋深主要根层(上图)土壤储水量差异比表层(下图)土壤储水量差异大，说明地下水对表层土壤水分的影响较小。从总的变化趋势来看，不管地下水埋深多深，表层土壤储水量和主要根层土壤储水量变化趋势大致保持一致。春玉米拔节期(6月15日)以后作物耗水量增加，加上气温高，土面蒸发大，导致表层和主要根层土壤水分消耗剧增，土壤含水量迅速下降，到8月中下旬和9月的大量降雨(图1中)使土壤储水量保持较高水平。每次大的降雨均使不同地下水位表层和主要根层土壤储水量有所回升，如6月8日和9日、8月10日、9月3日和11日均有较大的降雨，使所有处理表层和主要根层土壤储水量强烈回升。

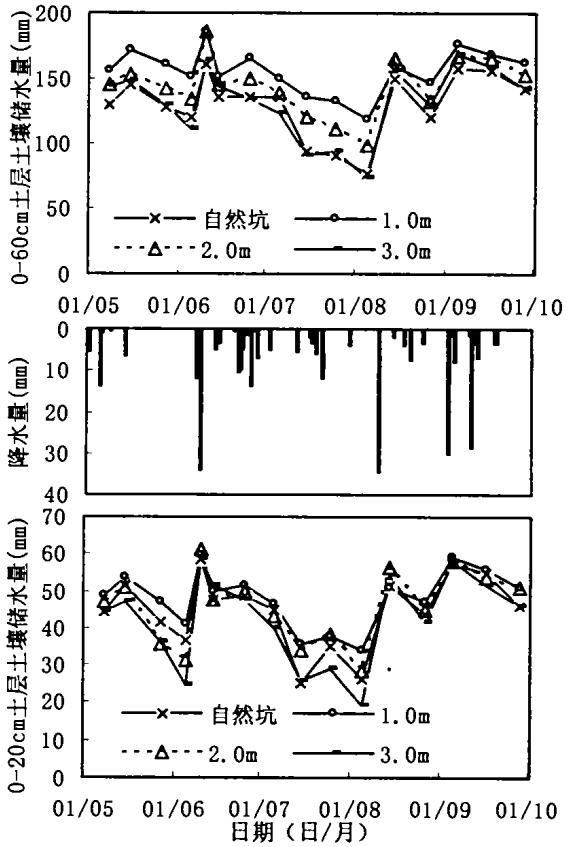



图1 不同地下水埋深春玉米土壤表层(下图)和主要根层(上图)土壤储水量季节变化

### 2.2 地下水埋深对春玉米田土壤水分垂直变化规律的影响

图2为不同地下水埋深6月8日和9日(图2a)以及8月10日(图2b)两次较大降水前后土壤水分剖面图。可以看出，不论降雨前还是降雨后，土壤各层次含水量随着地下水埋深加深而逐次减少。地下水埋深越浅各层次土壤含水量就越大，地下水位3.0 m 的土壤含水量最小。6月10日和8月10日自然地下水埋深在1.5～1.8 m 左右，影响了土壤各层次含水量剖面。在0～100 cm 土层自然水位土壤含水量与 $WT_{2.5}$(地下水埋深2.5 m)和 $WT_{3.0}$交叉。在100 cm 以下自然水位土壤含水量大多比 $WT_{2.5}$(地下水埋深2.5 m)和 $WT_{3.0}$大。100 cm 以下各处理土壤

维普资讯 http://www.cqvip.com



含水量基本类似,降水前后变化不大。地下水埋深较浅时,土壤受地下水强烈补给的影响,表层得到的地下水越多,土面蒸发越大;而当地下水埋深越深,各层次土壤水分垂直分布差异较大。

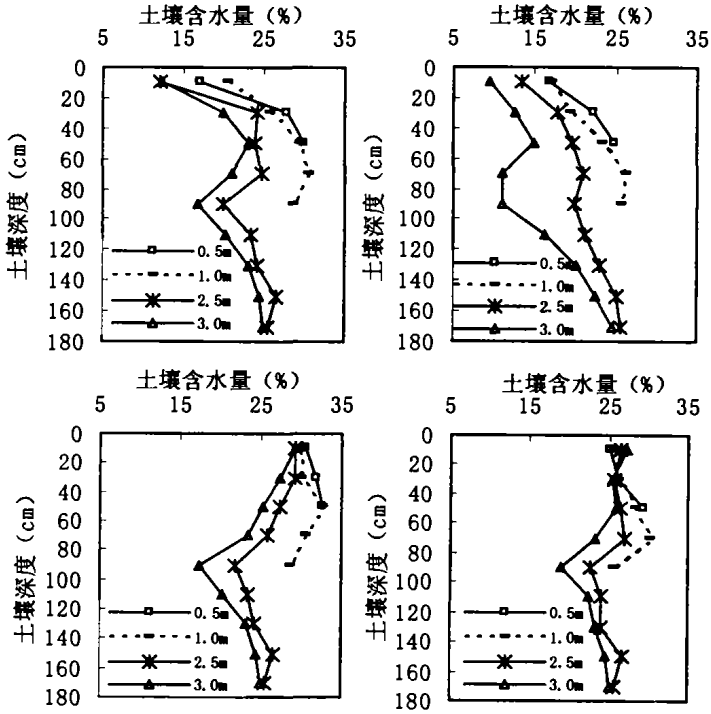
在没有灌溉、降水条件下,不同地下水埋深春玉米土壤含水量变化情况见图3。可以看出,各层次土壤水分消耗随着地下水埋深加深而增大,地下水埋深1.0 m时0～20 cm土壤水分在20天内(5月15日至6月5日)消耗了近1/4,而3.0 m的消耗了近一半,其他层次土壤水分消耗也有类似的结果。表明地下水埋深在无灌溉、降水条件下也对土壤水分垂直分布有着明显的影响。此时试验地自然地下水位在1.4 m左右,对照处理自然坑土壤含水量垂直分布曲线形状正好是地下水埋深1.0 m和2.0 m中间情形。

### 2.3　地下水－土壤水界面水分转化量变化过程

图4为不同地下水位处理对累计土壤排水量(图上)、降雨量(图中)以及累计地下水补给量(图下)在春玉米生长期随时间变化的曲线。

可以看出,不同地下水位处理累计土壤排水量的变化趋势大体一致(图4上)。量较大的降雨均使所有处理产生土壤排水。降雨后,累计排水量有迅速增加趋势,几天后基本无增加。但不同处理排水量有明显的不同。地下水位越浅,累计排水量越大。原始排水量记录表明,地下水位越深,土壤开始排水日期越滞后。如6月8日和9日降雨量达46 mm,分别使地下水位处理0.5,1.0,1.5,2.0 m共排水10.8,8.7,8.3,5.8 mm,依次递减。此次降雨后地下水位处理0.5 m的土壤6月10日就开始排水,2.0 m的土壤6月12日才开始排水;排水终止日期处理0.5 m的土壤6月13日,2.0 m的土壤6月18日。地下水位2.5 m和3.0 m时春玉米全生育期土壤无排水。可见,地下水埋深对土壤排水的影响明显,地下水位深的土壤要在充分蓄积水分后才开始排水。

与累计土壤排水量类似,春玉米全生育期累计地下水补给量总的变化趋势也基本一致。不论地下水位深浅,都可分成4个阶段:第一阶段,地下水补给稳定增长期,即播种至拔节期,此阶段春玉米水分消耗较少;第二阶段,地下水补给缓慢增长期,即拔节期间,此阶段春玉米水分消耗增大,但6月上旬大量降雨使根层土壤得到所需水分,故地下水消耗量较少;第三阶段,地下水补给快速增长期,即拔节至灌浆期,此阶段玉米耗水量大增且无大量降雨出现,故地下水消耗迅速增大;第四阶段,地下水补给趋于稳定期,即灌浆至成熟期,此阶段的大量降水补充了土壤前期损失的水分,近地下水位处土壤含水量趋于饱和,故地下水补给趋于零。从不同地下水处理的地下水累计补给量看,地下水位越深,累计地下水补给量就越少。在春玉米整个生育期地下水位分别为0.5,1.0,1.5,2.0 m时,累计地下水补给量分别为40.9,33.4,20.1,19.6 mm,依次递减。地下水位2.5 m和3.0 m时春玉米全生育期无地下水补给。




a.6月8—9日降雨前(上)后(下);b.8月10日降雨前(上)后(下)

图2　不同地下水埋深春玉米降雨前后土壤含水量垂直变化

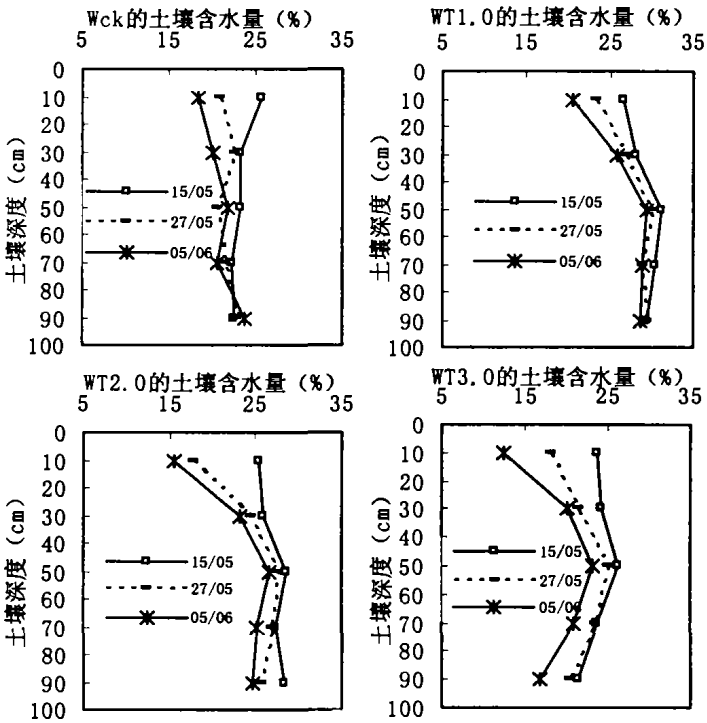



图3　不同地下水埋深春玉米土壤含水量垂直变化

维普资讯 http://www.cqvip.com



### 2.4 地下水埋深对春玉米产量及水分利用效率的影响

在春玉米全生育期降水量为285 mm，其中有效降水量为232.1 mm。表1列出了土壤水分平衡各项和产量，表中自然地下水位处理地下水补给量（$CR$）和土壤排水量（$D$）均忽略。地下水位0.5 m时，土壤水分平衡用0～50 cm含水量计算，其他处理用0～100 cm土层含水量。当不灌水或灌水量较低、地下水位较浅（≤1.5 m）时，随着地下水位加深春玉米耗水量减少。当地下水埋深浅时很容易形成强烈向表层输水的毛管作用，通过土壤表层直接蒸发损失大量的水分，地下水埋深越浅，土壤水分蒸发损失越大，地下水补给也随着增加。地下水位1.0 m时，春玉米产量最高，达10 250 kg/hm²，其水分利用效率也最大。当灌水量较大、地下水埋深较深（≥2.0 m）时，地下水基本不能补给或少量补给，玉米根系也难以到达和利用。水位越深，产量和水分利用效率都越低。地下水位3.0 m时产量最小，水分利用效率也较低。地下水位在1.0 m以下时，水分利用效率随地下水位加深而减少。地下水位0.5 m时，虽然地下水补给多，但影响了春玉米根系发达，反而产量下降，水分利用率也随着下降。

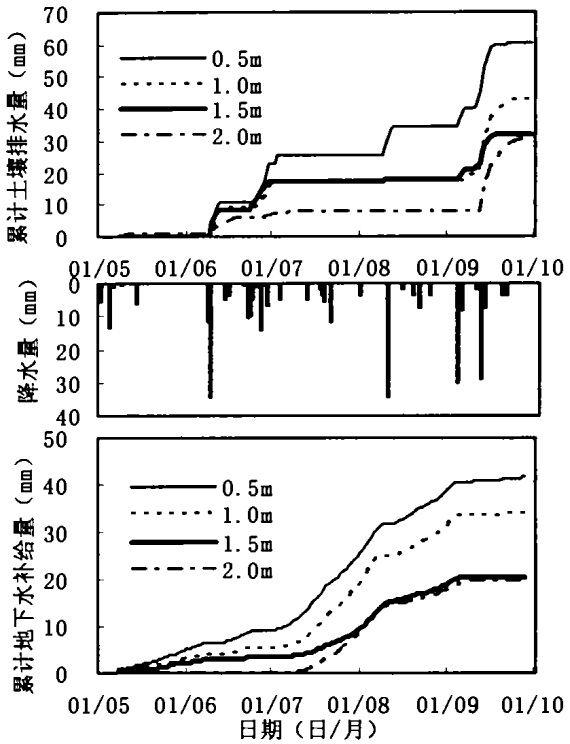



图4 不同地下水埋深春玉米地下水－土壤水界面水分转化量变化

可见，当降雨量达到285 mm，基本能满足春玉米需水时，尽量不灌水，将地下水位控制在1.0 m左右，以地下水补给为主，这样能得到较高产量；当地下水位大于2.0 m时，玉米必须进行灌溉才能达到较好产量。如遇到旱年，降水量较少时，应加大灌溉量，尽量采用灌溉效率较高的灌水方式，如地下渗灌等，既能提高水分利用效率，也可达到较高产量。

表1 不同地下水埋深春玉米耗水量、产量及水分利用效率

| 地下水位 (m) | 土壤含水量变化 (mm) | 灌水量 (mm) | 地下水补给量 (mm) | 土壤排水量 (mm) | 全生育期耗水量 (mm) | 产量 (kg/hm²) | 水分利用效率 (kg/hm²·mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 自然水位 | 37.2 | 98 | 忽略 | 忽略 | 292.9 | 8750 | 29.9 |
| 0.5 | 12.4 | 7.5 | 40.9 | 32.0 | 236.1 | 9250 | 39.2 |
| 1.0 | −20.2 | 0 | 33.4 | 60.2 | 225.5 | 10250 | 45.5 |
| 1.5 | 8.6 | 18 | 20.1 | 42.8 | 218.8 | 8750 | 40.0 |
| 2.0 | 26.8 | 60 | 19.6 | 30.4 | 254.5 | 9625 | 37.8 |
| 2.5 | −1.6 | 50 | 0.0 | 0.0 | 283.7 | 9250 | 32.6 |
| 3.0 | 19 | 60 | 0.0 | 0.0 | 273.1 | 8250 | 30.2 |

## 3 结论与讨论

（1）地下水埋深对春玉米土壤水分季节变化规律的影响主要表现在表层和主要根层土壤水分变化规律上，地下水位越浅，这种影响显得越大。与表层以下土壤相比，地下水对表层土壤水分的影响较小。

（2）地下水埋深对春玉米农田土壤水分垂直变化规律的影响主要表现在0～100 cm土层含水量上，地下水位越深同层土壤含水量差异越大。地下水埋深对100 cm以下土壤含水量影响极小。

（3）无论地下水埋深深浅，春玉米农田累计地下水补给量变化规律可分为4个阶段，即稳定增长期、缓慢增长期、快速增长期和趋于稳定期。地下水位越高累计地下水补给量越大；累计土壤排水主要与灌水和降水有关，地下水位越高土壤排水量越大。较大灌水和降水后，土壤开始排水日期随着地下水埋深加深而滞后。

（4）生育期间降水量达285 mm，能满足大部需水时，尽量不灌溉，以利用地下水补给为主时，春玉米可获得较高产量和水分利用效率。地下水埋深以1.0 m产量最高，过浅虽能补给更多地下水，但影响玉米根系发育，产量反而下降，水分利用效率也随之降低。地下水位加深，随着补给量减少，产量和水分利用效率也都下降。地下水埋深超过2 m，补给水分甚微或无，玉米根系也难以到达和利用。水位越深，产量和水分利用效率都越低。

（5）目前华北地下水位不断下降，对产量的不利影响将日益显现出来，而且还增加了提水成本，应予遏制，避免地下水位的过度下降。当地下水补给量大时，总耗水量也较低。表明如以地下管道渗灌方式将有利于节水和增产，是更为先进的节水灌溉技术。

下转第65页

维普资讯 http://www.cqvip.com



对玉米而言,二者没有明显的关系。由此可以看出,在正常灌溉和严重土壤水分亏缺条件下,播前灌溉对增加冬小麦土壤储水量都是非常重要的。播前灌溉有利于幼苗茁壮生长,增强根系对土壤水的利用能力,提高冬小麦的产量[9]。播前灌溉同样有利于玉米的出苗。播前灌溉相对于返青期、拔节期或灌浆早期灌溉而言尤为重要,而在这几个生育期某个时期施以一定程度的水分亏缺对小麦产量影响不大。

## 4 结 论

土壤水量平衡结果显示,不同的土壤水分条件下地下水资源采补都不能达到平衡。土壤水分严重亏缺条件下大大降低了冬小麦的蒸散量和产量;正常的灌溉条件下,作物的产量保持相对较高,然而冬小麦季地下水的采补差额超过了200 mm/a;即便一定程度上的水分亏缺也不能使地下水达到采补平衡,但不会减少作物的产量,因此在返青期、拔节期或灌浆期的某一时期,对小麦实施以一定程度的水分亏缺是可行的,灌浆早期水分亏缺结束后需要少量灌溉,以解除胁迫。在玉米生长季,如果有正常的降水量和灌溉水供给,地下水资源采补基本能达到平衡。但从长远来看,华北平原冬小麦的种植面积必须减少,增加低耗水经济作物种植面积势在必行。

**参考文献:**


[1] 刘昌明. 土壤—植物大气系统水分运行的界面过程研究[J]. 地理学报, 1997, 52(4):366-372.

[2] 刘昌明,何希吾. 中国21世纪水问题方略[M]. 北京:中国科学出版社, 1996. 45-50.

[3] Eloise Kendy, Marchant P G, Walter M T. A soil-water balance approach to quantify ground-water drainage from irrigated cropland in the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 2011-2031.

[4] 王会肖,刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000,11(1):99-104.

[5] Pandey R K, Maranville J W, Admou A. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment I. Grain yield and yield components[J]. Agricultural Water Management, 2000, 46: 1-13.

[6] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55: 203-216.

[7] Zhang H, Wang X, You M Z, Liu C M. Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 1999,19: 37-45.

[8] Wang H X, Zhang L, Dawes W R, et al. Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain——measurements and modeling[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48: 151-167.

[9] Li F M, Liu X L, Li S Q. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat[J]. Agric. Water management, 2001, 49: 163-171.

[10] 陈家宙,等. 红壤丘岗林草生态系统土壤水分状况[J]. 水土保持学报, 2003,17(2):122-125.

[11] 常学向,等. 黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况[J]. 水土保持学报, 2003,17(2):126-129.

[12] 宋孝玉,等. 黄土沟壑区不同种植条件下农田下土壤水分动态规律[J]. 水土保持学报,2003,17(2):130-133.

[13] 程积民,等. 黄土丘陵区小叶杨林地土壤水分过耕动态[J]. 水土保持学报, 2003,17(3):70-73.

[14] 蒋进,等. 古尔班通古特沙漠工程防护体系内土壤水分变化规律[J]. 水土保持学报, 2003,17(3):74-77.

[15] 李阳兵,等. 岩溶山地不同土地利用土壤的水分特征差异[J]. 水土保持学报, 2003,17(5):63-66.

[16] 何园球,等. 红壤丘岗区人工林土壤水分、养分流失动态研究[J]. 水土保持学报,2002,16(4):91-93.


上接第60页

**参考文献:**


[1] 袁建平,蒋定生. 榆林市风沙草滩区地下水开发水位动态模拟[J]. 水土保持学报, 1998(3): 62-66.

[2] 徐绍辉,张佳宝. 土壤中优势流的几个基本问题研究[J]. 水土保持学报, 1999(4): 62-66.

[3] 王介元,王昌全,等. 土壤肥料学[M]. 北京:中国农业出版社, 1997. 405-409.

[4] 刘保军,孟羽中,等. 地下水浅埋区储水灌溉节水增效机理研究[J]. 科技情报开发与经济, 2002,12 (3): 98-99.

[5] 杨建锋,刘士平,等. 地下水对农田蒸发过程作用研究进展[J]. 农业工程学报, 2000,16(3):45-49.

[6] Kruse E G, et al. Crop water use from shallow, saline water tables[J]. Trans. of the ASAE, 1993,36(3):697-707.

[7] Yang Mingdi, Yanful E K, Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions [J]. Advances in Environmental Research, 2002,6:505-521.

[8] Mejia M N, Madramootoo C A, Broughton R S. Influence of water table management on corn and soybean yields[J]. Agricultural Water Management, 2000, 46:73-89.

[9] 莫翼翔,吴发启. 泥河流小流域土壤养分的分布与保护[J]. 水土保持学报, 2002,16(3): 86-89.

[10] 刘洪斌,武伟,等. 湿地地区干旱指数模型分析[J]. 水土保持学报, 2003,17(3): 149-151.

[11] 来剑武,王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析[J]水土保持学报, 2003,17(1): 137-140.