

文章编号:0559-9350(2009)09-1140-07

## 农田控制排水与补充灌溉对作物产量和排水量影响的模拟分析

景卫华<sup>1</sup>, 罗 纨<sup>1</sup>, 温 季<sup>1</sup>, 贾忠华<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 水资源研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 环境研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:**农田控制排水是减少硝态氮流失最直接有效的方法之一。本文利用典型涝渍区—淮北平原砂姜黑土地区实测土壤、气象、作物等资料,用 DRAINMOD 模型进行了长序列模拟分析,结果显示在当地气象条件下,干旱是影响冬小麦产量的主要因素,而涝渍则是影响棉花产量的主要因素。补充灌溉条件下,采用传统排水与控制排水两种措施的模拟结果显示,灌溉可使冬小麦产量得到大幅提高,但对棉花产量的影响不大。采取控制排水措施后,地下排水量大大减少,排水总量也显著降低,从而有利于区域水质的保护。

**关键词:**农田排水; DRAINMOD 模型; 相对作物产量; 控制排水

**中图分类号:** S276.3; X322

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

氮素是农作物生长发育的基本营养元素,氮肥的施用促进了作物的生长与丰收。在易涝或土壤盐碱化地区,农田排水是一项重要的保证作物丰产丰收的农田水管理措施。但排水加速了土壤中氮素及盐分等化学物的淋失,富含氮素等营养物的农田排水是目前农业非点源污染的主要形式<sup>[1]</sup>。因此,从保护农业生产和生态环境的双重角度考虑,如何在保证产量的前提下尽可能地减少氮素流失是当前农业水利关注的焦点。

国内外研究显示:硝态氮排出农田的总量多少虽然与排水浓度有关,但更主要的是取决于农田排水的总水量<sup>[2-4]</sup>,即排水总量越大氮排放越多。硝态氮可通过地表排水和地下排水两个途径进入环境。由于硝态氮易溶于水进入土体,地表排水中携带的硝态氮浓度一般较低,31个不同地方的实测资料显示平均浓度在 0.4~4mg L。地下排水中硝态氮的含量占其流失的大部分,大量的田间实测数据显示其平均浓度在 8~20mg L<sup>[5]</sup>。

为了保证必要的农业生产,同时又不对我们赖以生存的水环境造成破坏,就需要寻求一个与自然和谐的平衡点<sup>[6]</sup>。在减少农业排水污染方面,研究者们已做了多种尝试,目前在湿润地区所采取的措施中最有效的方法之一是农田控制排水(controlled drainage)<sup>[7]</sup>。控制排水通过在农田排水口增加控制性建筑物来控制田间地下水位从而达到减少排水量的目的<sup>[8-10]</sup>。在干旱年,被抬高的地下水位还可供作物利用一部分,达到增产效果。目前,控制排水已被欧美不少地区列为农业生产的最佳管理措施(BMP)<sup>[11]</sup>。

我国已有不少学者就控制排水措施开展了相关研究和试验工作<sup>[12-13]</sup>,结果都表明该措施在我国的推广使用可以显著减少农田排水量以及污染物的输出。

本文采用排水模型-DRAINMOD,以淮北砂姜黑土地区为例,模拟分析了农田控制排水对小麦与棉花作物产量和农田排水量的影响,从产量和排水量两方面进行分析,得出在保证一定产量前提下,通过减少排水量来达到减少氮素排放量的潜在能力。研究结果可为类似地区农业生产及由农田排水造成的

收稿日期:2008-09-24

作者简介:景卫华(1978—),女,陕西蓝田人,博士生,主要从事水资源与环境保护研究。E-mail:jingweihua821@163.com

非点源污染控制提供科学依据。

## 2 研究方法

**2.1 DRAINMOD 模型介绍** DRAINMOD 模型是美国农业部自然资源保护局所推荐的田间水文模型。它根据每日气象、土壤、农作资料,计算地下水埋深以及入渗、腾发、排水量等田间水平衡项。该模型已在世界许多国家和地区应用,被公认为具有应用简单,对地下水位、排水量等预测准确、迅速等优点。虽然模型最初是为地下水埋深较浅的湿润地区设计的,后来经逐步改进应用于其他国家和地区。模型包括若干模块,可用于排水系统设计<sup>[14-15]</sup>,污水灌溉的水力负荷分析<sup>[16]</sup>、湿地判别<sup>[17-18]</sup>、氮素流失预测<sup>[19]</sup>等目的。

DRAINMOD 模型可以用来预测作物因水分条件限制以及种植延误等获得的相对产量。将当地实际最高产量与预测的相对产量相乘便可得到模拟的实际产量。模型中所考虑的影响产量的因素包括涝渍、干旱、播种延误、以及土壤盐渍化,用公式表达如下:

$$YR = Y/Y_o \times 100 = YRp \times YRw \times YRd \times YRs \quad (1)$$

式中:  $YR$  为作物相对产量,%;  $Y$  为所求年份实际产量,  $\text{kg hm}^2$ ;  $Y_o$  为多年平均最大产量,  $\text{kg hm}^2$ ;  $YRp$  为仅考虑播种延误得到的相对产量,%;  $YRw$  为仅考虑涝渍因素得到的相对产量,%;  $YRd$  为仅考虑干旱因子得到的相对产量,%;  $YRs$  为仅考虑盐分胁迫得到的相对产量,%。

本文首先利用 DRAINMOD 模型模拟淮北平原砂姜黑土区自然降雨无灌溉时涝渍、干旱和种植延误对产量的影响结果,与当地实际状况进行对比,作为对模型的适用性测试。然后再模拟灌溉状态下控制排水对产量和排水量的影响,进而分析在保证产量的情况下,通过控制排水来减少农田排水量从而从总量上减少氮素流失的潜在能力。鉴于模拟区的实际情况,由于当地不存在盐碱化问题本文研究中暂不考虑盐分对产量的影响(即  $YRs=100\%$ )对产量进行模拟。

### 2.2 淮北砂姜黑土区的模型输入参数

**2.2.1 模拟区简介** 本文模拟的地区是处于我国南北过渡带的淮北平原砂姜黑土区,该地区属暖温带半湿润季风气候,降雨量充沛,但年际变幅大,年内分配不均,暴雨多,降雨强度大,60%降雨集中在6—9月份,多年平均月降雨量如图1所示。其地形平缓,地下径流缓慢,地下水埋深浅,一般在1~2m。模拟区土壤为砂姜黑土,属于变性土类别,其黏粒含量高,遇水膨胀,缺水收缩开裂,水分利用率低,持水性和保水性差,易旱也易涝<sup>[20-21]</sup>。因此根据作物生长需要进行补充灌溉,并布置合理的排水系统及时地排涝除渍来保证作物产量对农业生产具有重大的意义。

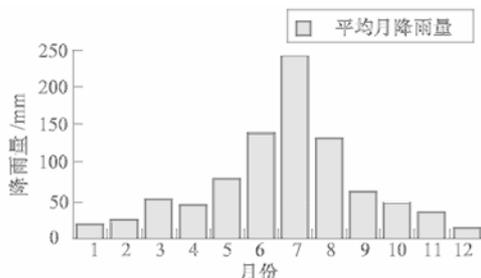


图1 淮北地区多年月平均降雨分布

本文首先模拟了自然降雨情况,无补充灌溉时常规排水(一般的田间排水模式,只有排水暗管和排水明沟等)条件下,不同排水管深度和排水管间距对作物产量以及排水量的变化影响,模拟分析得出该地区影响作物产量的主要因素,与实际相对比,初步测试该模型的适用性。

在上述模拟结果的基础上,根据当地实际的灌溉制度和灌水定额,进行了传统排水和控制排水(在排水暗管处设置闸板等挡水措施,提高排水水位)两种措施的模拟,分析了该地区产量的变化,以及控制排水减少排水量的效果。从而探讨了在该地区实施控制排水措施对农业生产和减少农田排水量的意义。

**2.2.2 DRAINMOD 模型输入参数** DRAINMOD 模型基本输入参数包括气象、土壤、排水系统和作物四大部分:

(1)气象资料。本文的气象资料为安徽蚌埠五道沟气象站实际所测的1986—2005年的日降雨和蒸发资料;(2)土壤资料。为试验地区所测得的土壤分层、每层厚度及其土壤水分特征曲线、土壤饱和导水

率及侧向导水率,具体参数如表 1 所列。

其中土壤水分特征曲线的形式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

式中:  $\theta_s$  为土壤饱和含水率;  $(\varphi v)$ ;  $h$  为土壤基质势绝对值;  $\theta$  为土壤含水来年率  $(\varphi v)$ ;  $\theta_r$  为土壤剩余含水率  $(\varphi v)$ ; 其余为统计参数。其中,  $m=1 - P n$ 。

(3)排水系统参数。模拟区现有排水系统多采用单一的明沟排水,大沟间距 1500~2500m,沟深 3~4m,中沟间距 500~1000m,沟深 1.2~2m,小沟间距 200~250m,沟深 1~1.2m。现有系统不能满足排除渍的要求,目前为了解决这个问题,有提出沟井组合和沟管组合来进行试验。本文是从沟管组合出发,通过模型模拟得到排水暗管的最佳间距,根据明沟现状,取排水暗管深度为 1m、1.2m 两种深度比较。

(4)作物资料。本文模拟作物为冬小麦和棉花,其模型输入参数如表 2 所示。其中模拟区冬小麦和棉花的种植和收获日期、生育期阶段的划分,均按照当地的气象条件资料<sup>[22-23]</sup>确定;作物根深按照模型<sup>[24]</sup>介绍的方法,根据作物系数查表<sup>[25]</sup>计算确定;渍渍模型计算公式中的截距值和斜率,其计算指标为 SEW30(高于设定地下水位为 30cm 时的累积值),即地下水埋深小于 30cm 时作物产量受到影响。冬小麦是实测资料 SEW30 指标计算出来的,棉花的实测资料采用的指标是 SFEW30(是 SEW30 与 SFW30 之和,SFW30 是指降雨期内地表积水累积值),其主要部分也是 SEW30,两者趋势一致,因为都是同样的线性模型,所以直接借用了该指标拟合后确定的参数值,冬小麦的作物渍渍敏感因子是根据当地实测资料<sup>[26]</sup>反推求得的数据,棉花的参数根据青浦地区的实测资料确定。模型自带的干旱敏感因子参数是 Evans 等根据<sup>[11]</sup>美国以及其他地区实测数据回归获得的数值,能够反映该作物的变化趋势。种植日推迟根据实际情况,设为推迟 5d 为不影响产量的值。

表 2 DRAINMOD 模型作物输入参数

作物名称		棉花	冬小麦	
种植日期		4 月 10 日	10 月 10 日	
收获日期		9 月 25 日	5 月 31 日	
生长期分段 (种植后天数)	初始阶段	1—30	1—124	
	生长阶段	31—80	125—174	
	鼎盛阶段	81—135	175—214	
	生长末期	136—180	215—234	
根深 ? cm	初始阶段	3	5.2	
	生长阶段	3.5~29.5	5.7~29.5	
	鼎盛阶段	30	30	
	生长末期	29.6~11.9	29~3	
模型中截距 $YRD_{max}$		109	100	
$\alpha$		0.51	0.42	
渍渍敏感因子 $CS_{ij}$	种植后天数	$CS_{ij}$	种植后天数	$CS_{ij}$
	0	0.20	0	0.15
	11	0.22	124	0.15
	60	0.32	144	0.15
	90	0.19	159	0.30
	140	0.08	186	0.30
	160	0.02	214	0.25

### 3 自然降雨条件下模型预测结果

**3.1 自然降雨条件下小麦、棉花产量的模拟结果** 图2所示为小麦、棉花两种作物产量模拟的结果,两种作物模拟结果表明多年平均相对产量在排水暗管间距为10~20m左右时有一个峰值,然后随着排水暗管间距增大呈下降趋势,排水暗管间距超过80m以后产量基本不变。

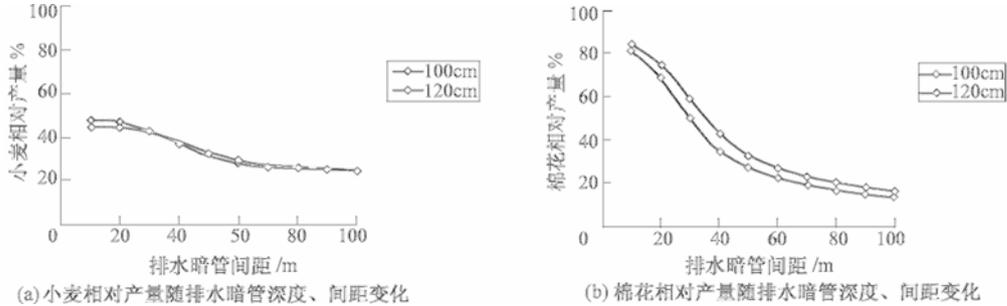


图2 自然条件下小麦、棉花产量模拟结果

单因子模拟结果显示,种植推迟因子对两种作物的产量基本没有影响其值均为100%,当排水间距从10m增大到100m,小麦的涝渍因子产量从99%减少54.3%,干旱因子产量仅从44.8%增加到59.5%,棉花的涝渍因子产量从94.6%减少到17.8%,干旱因子产量从88.4%增加到90.9%,数据表明自然条件下干旱因子是影响小麦产量的主要因素,对于棉花来说,产量随排水间距增大迅速降低,是因为排水状况越来越差容易形成涝渍导致,说明涝渍因子是制约棉花这种作物产量的主要因素。这和当地的实际情况非常相符,当地小麦生育期雨量少,经常出现冬春旱,因此该作物要保证产量,必须重视灌溉来减少干旱因子对其产量的影响。棉花作物的生长期刚好是淮北地区的雨季,当地的实际情况也是棉花基本无需灌溉,仅靠降雨就足够生长,因而合理的排水设计达到排涝除渍是保证产量的关键。模拟结果与当地实际情况基本一致,说明模型中所采用的计算方法适用于模拟区。

**3.2 自然条件下小麦、棉花排水量的模拟结果** 图3为自然条件下种植小麦、棉花时排水量模拟结果,两种作物的排水变化趋势是一致的,其排水总量都随着排水暗管间距的增大而减少,60m以后暗管间距的变化对排水量影响不大,地下排水量随排水暗管间距的增加而减少,随排水暗管深度增加而增加,地表径流随排水暗管间距的增大而增大,随排水暗管深度增加而减少。

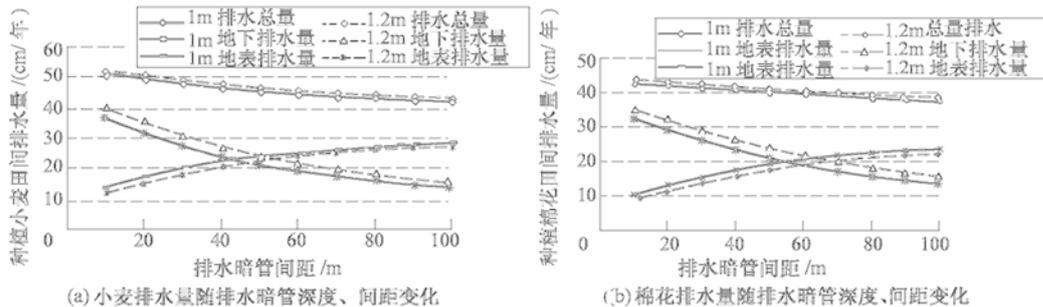


图3 自然条件下种植小麦、棉花时田间排水量模拟结果

### 4 补充灌溉与控制排水条件下排水量与作物产量模拟

目前模拟区的实际情况是:淮北麦区和江淮麦区中北部,在小麦生育期间雨量较少,经常出现冬春干旱,必须及时补灌,以保证小麦正常生长发育。小麦生长期的灌水定额,除播种前灌底墒水和冬灌蓄水的灌水量较大,约7.5~9cm外,一般生育期的灌水量多在6cm左右。棉花一般不缺水,仅靠降雨就足

够,但在前期缺水时也需要补灌,当地棉花灌水定额 4.5~6cm。本文设定小麦少雨期冬灌一次,日期为 12 月 1 日,灌水定额为 8,2cm,棉花为蕾初期少雨季补灌一次,日期为 5 月 25 日,灌水定额为 5cm。由前面模拟的结果可以缩小模拟的范围,下面的模拟沟深 1.2m,为保证一定产量,排水暗管间距从 10m 到 40m。

采用控制排水措施进行模拟时,根据冬小麦和棉花的生长期和对应的根系深度设定排水沟口加装截水堰上沿距地表深度(表示水位最高不能超过的位置),其值如表 3 所示:

表 3 控制排水堰上沿距地表埋深设置

棉花		冬小麦	
日期	控制排水堰深/cm	日期	控制排水堰深/cm
1月1日—3月19日	45	1月1日—3月19日	45
3月20日—5月9日	80	3月20日—5月9日	80
5月10日—7月9日	100	5月10日—6月9日	100
7月10日—8月19日	120	6月10日—9月14日	45
8月20日—10月9日	80	9月15日—10月24日	100
10月10日—12月31日	45	10月25日—12月30日	45
		12月1日—12月31日	120

**4.1 灌溉后传统排水与控制排水两种措施下小麦、棉花产量预测** 首先对比有无灌溉的差别,图 4(a)显示小麦经过灌溉后两种排水措施均大幅度提高了产量,如排水间距 20m 处从原来的 44.2%,传统排水下提高到 81.5%,控制排水下提高到 75.4%,这是由于其干旱相对产量有了明显的提高从无灌溉时最高 50.2%提高到最低 83.7%,这表明灌溉对于小麦的产量提高非常显著。图 4(b)显示棉花灌溉后在排水间距很近时,即传统排水在 20m 以内、控制排水在 10m 时,相比无灌溉时产量略微有所提高,间距再增加后反而产量降低,这样又模拟了无灌溉时实施控制排水的产量变化,图中显示其产量并未降低多少,因此保证一定产量前提下,选择排水量最少的措施应该是无灌溉条件下的控制排水措施。

**4.2 传统排水与控制排水两种措施下的小麦、棉花田间排水量预测** 田间排水量图 5 表明对于两种作物来说,控制排水都较大程度的减少了地下排水量,而使地表排水量增加,结合产量图 4 可以认为小麦最佳排水暗管间距为 20m,棉花最佳暗管间距为 10m,但间距为 20m 时产量仍然可以保证,因此选择排水暗管间距为 20m 作为综合最佳的排水间距来分析控制排水对排水量的影响。其结果如表 4 所示。

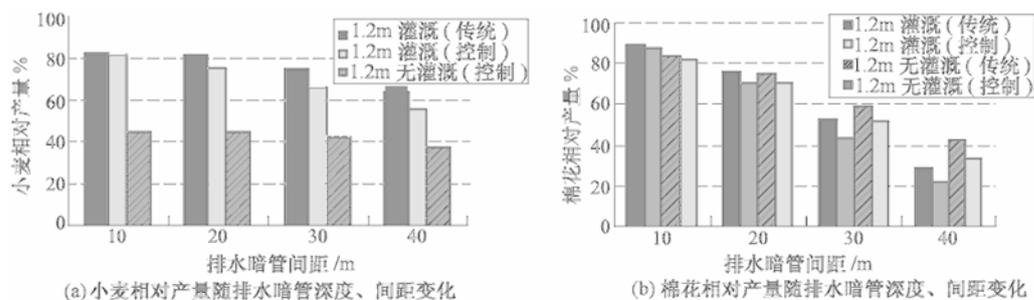


图 4 灌溉条件下传统排水与控制排水措施下小麦、棉花产量模拟结果

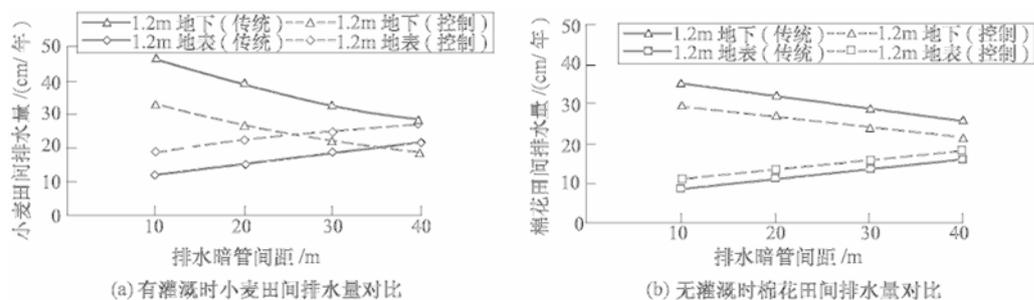


图 5 传统排水与控制排水措施下小麦、棉花田间排水量模拟结果

表 4 排水间距 20m、排水沟深度 1.2m 时控制排水措施下排水量的变化

作物模式	小麦			棉花		
	1	2	2 相对 1 变化量 %	3	4	4 相对 3 变化量 %
排水总量 (cm <sup>3</sup> /年)	54.43	48.79	-10.36	43.28	40.32	-6.84
地下排水量 (cm <sup>3</sup> /年)	39.08	26.56	-32.04	32.33	27.15	-16.02
地表排水量 (cm <sup>3</sup> /年)	15.35	22.23	44.82	10.95	13.17	20.27

注:1 为有灌溉传统排水模式;2 为有灌溉控制排水模式;3 为无灌溉传统排水模式;4 为无灌溉控制排水模式。

从表 4 中可以看到,实施控制排水措施后,小麦田地下排水量减少了 32.04%,排水总量减少了 10.36%;棉花田地下排水量减少了 16.02%,排水总量减少了 6.84%。硝态氮主要存在于地下排水中,采取控制排水后,地下排水量的减少程度较大,这对削减硝态氮流失具有积极意义。排水总量的减少是因为实施控制排水措施后,田间地下水位抬高,土壤含水量增加,潜水蒸发作用加强,部分水量以腾发的形式损失,这对于排水农田所在流域的水质保护有着积极的意义。

## 5 结论

本文利用 DRAINMOD 模型模拟了在淮北砂姜黑土地区采取控制排水措施后对小麦和棉花两种作物产量和排水量的变化情况。模拟结果显示当地影响小麦产量的主要因素是干旱,而影响棉花产量的主要因素则是涝渍。在保证一定作物产量的前提下,采取控制排水措施可以有效减少地下排水量,由于腾发量的增加,排水总量也呈减少的趋势,这对于区域水质保护具有重要意义。

## 参 考 文 献:

- [1] 吕耀,农业生态系统中氮素造成的非点源污染[J].农业环境保护,1998,17(1):35—39.
- [2] Skaggs R W, Youssef M A, Chescheir G M, etc. Effect of drainage intensity on nitrogen losses from drained lands[J]. American Society of Agricultural Engineers,2003,46(2):234—244.
- [3] Skaggs R W, Chescheir G M III. Effects of subsurface drain depth on nitrogen losses from drained lands[J]. American Society of Agricultural Engineers,2003,46(2):237—244.
- [4] 张瑜芳,张蔚臻,沈荣开,等.排水农田中氮素转化运移和流失[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [5] Skaggs R W, van Schilfgaarde J V. Agricultural drainage[M].USA;Madison Wisconsin,1999.
- [6] van Schilfgaarde J V. Is precision agriculture sustainable? [J].American Journal of Alternative Agriculture 1999,14(1):43—46.
- [7] Gilliam J W, Baker J L, Reddy K R. Water quality effects of drainage in humid regions[J]. Agronomy,1999,38:801—830.
- [8] Willardson L S. Attainable irrigation efficiencies[J].Journal of the Irrigation and Drainage Division,1972,98(2):239—246.
- [9] Gilliam J W, Skaggs R W, Weed S b. Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields[J]. Journal of Environmental Quality.1979,8:137—142.
- [10] Thomas D L, Hont P G, Gilliam J W. Water table management for water quality improvement[J].Journal of Soil and Water Conservation,1992,47(1):65—70.
- [11] Evans R O, Skaggs R W, Sneed R E. Stress day index models to predict corn and soybean relative yield under high water table conditions[J].American Society of Agricultural Engineers,1991,34(5):1997—2005.
- [12] 张蔚臻,张瑜芳,沈荣开.排水条件下化肥流失的研究[J].水科学进展,1997,8(2):197—204.
- [13] 罗纨,方树星,贾忠华,等.根据排水规律计算稻田节水的潜力[J].农业工程学报,2007,10(23):41—44.
- [14] 罗纨,贾忠华,方树星,等.灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J].水利学报,2006,37(5):608—612.
- [15] 田世英,罗纨,贾忠华,等.控制排水对宁夏银南灌区水稻盐分动态变化的影响[J].水利学报,2006,(11):1309

- [16] 程慧艳,罗纨,贾忠华,刘建刚.西安市污水土地处理系统水力负荷的模拟分析[J].水利学报,2005,(2):203—208.
- [17] 贾忠华,罗纨,周晓夏,刘晓宁.干旱与半干旱地区湿地水文及临界条件的模拟研究[J].水利学报,2004,(6):27—32.
- [18] 贾忠华,罗纨,江彩萍,王庆永.半湿润地区河滩湿地水文特性的模拟研究[J].水利学报,2007,(4):454—459.
- [19] 王少丽,Prasher S O, Yang C C, Tan C S. 排水氮运移模型对地表和地下排水量和硝态氮损失的模拟评价[J].水利学报,2004,(9):111—117.
- [20] 黄东迈,朱培立,李庆康,等.江苏省低洼地区变性土的水分物理特征[J].江苏农业学报,1997,13(1):44—50.
- [21] 自由路,张景略,王全贵.河南省砂姜黑土持水性的研究[J].河南农业大学学报,1993,27(3):235—239.
- [22] 陈金华,杨太明,马晓群,等.安徽省淮北地区小麦霜冻(害)发生规律分析[J].气象与关,2006,(4):7—12.
- [23] 刘文浩.作物栽培学[M].西安:陕西科学技术出版社,1986.
- [24] Skaggs R W. Drainmod reference report methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soil with high water tables[M].North Carolina, North Carolina State university,1988.
- [25] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[M].Rome,Food and Agriculture Organization of the United Nations,1998.
- [26] 温季,王少丽,王修贵.农业涝渍灾害防御技术[M].北京:中国农业科技出版社,2000.

### Analysis on the effect of controlled drainage and supplemental irrigation on crop yield and drainage

JING Wei-hua, LUO Wan, WEN Ji, JIA Zhong-hua

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The effect of controlled drainage and supplemental irrigation on crop yield and drainage reduction in a vertisol soil district of Huaibei Plain in China was simulated with the field hydrology model DRAINMO. The results show that wheat yield is affected by drought stress and cotton is affected by wet stress. Under the condition of supplemental irrigation, the simulation results of both conventional and controlled drainage show that wheat yield increases remarkably but the yield of cotton is affected a little. Under the condition of controlled drainage, the predicted total volume of drainage water decreases significantly due to raising of water table and increasing of ET. This is beneficial for water quality protection of the irrigated district.

**Key words:** farmland drainage; DRAINMOD model; relative crop yield; controlled drainage

(责任编辑:吕斌秀)