

利用DRAINMOD模型模拟不同排水管间距下的作物产量

温季^{1,2}, 宰松梅^{2,3}, 郭树龙², 王全九¹, 罗纨¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710054; 2. 水利部农田灌溉研究所, 新乡 453003;

3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 农田排水工程在防御涝渍灾害、促进农作物正常生长和改善田间耕作管理等方面起着积极的作用, 通过合理的排水工程来减轻或消除涝渍灾害的影响是提高产量的主要途径。DRAINMOD 模型适用于地下水位管理系统及地下排水水位和产量变化。该文结合淮北平原砂姜黑土地区实测土壤、气象、作物等资料, 用 DRAINMOD 模型进行长序列模拟, 得到不同排水管间距对作物产量的影响, 结果表明, 对于冬小麦来说, 排水间距的大小对其相对产量的影响较小, 棉花生长期出现涝渍的概率超过 50%, 若排水间距大于 40 m, 相对产量下降明显, 在该试验区地下排水系统的设计应以棉花的设计指标作为设计参数, 用于指导排水工程的设计。

关键词: DRAINMOD; 相对作物产量; 排水间距; 涝渍; 防御

中图分类号: S267.3; S277.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0020-05

温季, 宰松梅, 郭树龙, 等. 利用 DRAINMOD 模型模拟不同排水管间距下的作物产量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 20-24.

Wen Ji, Zai Songmei, Guo Shulong, et al. Simulation of crop yield for different spacing of drainage ditches by using DRAINMOD model[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 20-24.(in Chinese with English abstract)

0 引言

中国是世界上洪涝渍灾害频繁而严重的国家之一^[1], 全国洪涝渍灾害面积平均每年达 700 万 hm^2 , 造成粮棉油减产占全国总产量的 5%。据有关资料统计, 全国中低产田面积共有 0.56 亿 hm^2 , 其中易涝耕地 0.24 亿 hm^2 , 渍害 767 万 hm^2 , 这说明涝渍灾害是导致农田低产的主要原因之一, 产量低而不稳, 严重制约着农业生产的发展和人民生活水平的提高。

中国涝渍农田主要分布在北方地区的东北三江平原和松嫩平原、辽河中下游平原、黄淮海平原等; 南方地区的沿江平原圩区、滨湖地区、临海地区, 珠江三角洲以及山丘区的冲垄地等。涝渍灾害的主要治理措施是根据农作物对农田水分状况的要求, 修建排水系统, 及时排除农田中多余的水分, 为农作物生长创造良好的环境。全国已不同程度地治理易涝耕地 0.21 亿 hm^2 , 渍害田 300 多万 hm^2 。治理后产量增幅一般在 1500 kg/hm^2 以上, 并且生态环境也有明显改善, 为农业增产打下了良好的基础, 取得了明显的经济效益和社会效益。仅 1996 年到 1998 年 3 a 通过农田排涝, 使 0.2 亿 hm^2 农作物避免或减轻了涝灾损失, 排涝减灾效益达 800 多亿元。湖北江汉平原的四湖地区, 改造渍害低产后增产达 30%~40%, 增产粮食 1500~2250 kg/hm^2 , 高的可达 3000 kg/hm^2 。因此, 提高防御涝渍灾害的能力, 对加速发展农业生产有着重

要的现实意义和战略意义。

水文模型 DRAINMOD^[2]的开发是为了模拟排水过程及地下水位管理系统。Skaggs 和 Gilliam, Breve 等应用该模型研究了排水设计、地下灌溉系统和管理对作物生产率、收益率和硝酸盐运移的影响。类似的研究如农业排水及农药运移模型 (ADAPT)、土壤水分入渗运动^[3] (SWIM) 等, 运行结果表明, DRAINMOD 比其他水文模型具有同等或更好的精度, 需要输入的参数少而且简单, 因而运行时间更快。

DRAINMOD 预报地下水位抬升和暗管排水量的可靠性, 已经在世界许多地区的不同土壤、作物和气候条件下经过测试^[4-6]。DRAINMOD 预报的精度取决于田间具体输入资料的量。DRAINMOD 模型的模拟是基于简单的水平衡原理, 模型中对各平衡变量间的关系描述较为简单明了, 该模型可用于研究排水系统设计和对作物生长和各水文要素的影响, 适应于湿润地区浅地下水埋深, 包括防治涝渍的地下排水和地面排水, 以及抗御干旱的地下灌溉和地面灌溉, 可以很好地预测地下水位、排水速率和排水总量。地下排水设计要求暗管系统可以有效地控制地下水位, 减少农田渍害。使易产生渍害地区的作物产量不受减产影响。地下排水系统间距是影响排水效果和工程造价的主要因素之一, 文中以淮北平原砂姜黑土地区为例, 用实际观测的土壤、气象和作物等资料, 通过 DRAINMOD 模型模拟了不同地下排水管间距对作物产量的影响, 其方法和结果可用于指导排水工程设计和对排水工程设计进行校核, 对今后中国南方地区农田排水工程系统的建设提供理论依据。目前, 利用 DRAINMOD 模型预测地下排水条件对作物产量的影响的文章鲜见报道。

收稿日期: 2008-03-31 修订日期: 2008-07-23

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2006AA100213)

作者简介: 温季 (1960—), 男, 河南郑州人, 研究员, 博士生, 主要从事农田排水与节水灌溉方面的研究。西安 西安理工大学水利水电学院, 710054。Email: wenji60@yahoo.com.cn

1 研究方法

1.1 DRAINMOD 模型的基本原理

DRAINMOD 是由美国卡罗来纳州立大学生物及农业工程系 R.W.Skags 等人于 20 世纪 70 年代末开发的, 目前已发展到版本 5.0, 可以在 Windows 下使用。输入的资料包括气象资料(日最高气温、日最低气温、逐时降雨量等)、土壤(土壤水分特征曲线, 饱和水力传导度, 不透水层深等)、作物资料(种植及收获日期, 各生育阶段对水分过多及亏缺的敏感性参数等)以及排水系统的设计参数(排水沟深度、间距、有效半径等)等, 用以模拟在所设计参数的条件下地下水位波动过程, 并统计作物各生育阶段地下水埋深小于 30 cm 累计超标水位(SEW₃₀)、作物的受旱天数等。该软件还可以根据用户的要求, 模拟土壤中盐分的积累和氮素的转化。

图 1 是 DRAINMOD 的水量平衡要素图, 所考虑的各项要素分别为: 降水(P), 地面径流(RO), 作物蒸腾及地表蒸发(ET), 排水(D), 深层渗漏量(DS)。设单宽沟(暗管)间地段上、下边界土壤表面分别为不透水层顶板, 土体的两边分别为排水沟(管), 则时间单元 Δt 的地下水量平衡方程为

$$\Delta V = D + ET + DS - F \quad (1)$$

式中 ΔV ——土体中的水量变化, cm; D ——水平方向的排水量, cm; ET ——腾发量, cm; DS ——深层渗漏量, cm; F ——地表入渗量, cm。

时段 Δt 内地面水的平衡方程为

$$P = F + \Delta S + RO \quad (2)$$

式中 P ——降雨量, cm; ΔS ——土壤表面的贮水量变化, cm; RO ——径流量, cm。

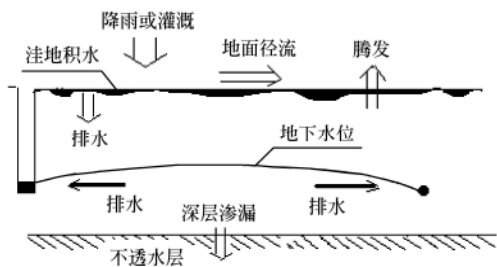


图 1 DRAINMOD 水量平衡要素图

Fig.1 All the factors of water balance system for DRAINMOD

图中, Δt 的基本单元为 1 h, 当没有降雨以及腾发很慢时, 地下水位变化很慢, 取 $\Delta t=1$ d, 当排水很快且无降雨时, 取 $\Delta t=2$ h, 当降雨速率超过入渗速率时, 取 $\Delta t=0.05$ h。

DRAINMOD 可用于一个水均衡系统长期(多年)的水动态模拟, 模型可以提供不同水位管理措施条件下的作物产量, 统计作物各生育阶段地下水埋深小于 30 cm 的累计超标水位 SEW₃₀ 指标、作物的受旱天数等, 并输出地下水位的波动过程和作物相对产量的计算结果。模型为准二维模型, 非饱和区为一维垂向土壤水运动, 其中作物相对产量反映水分不足、水分过多以及种植推迟的

综合影响, 作物最终相对产量模型为

$$R_y = \frac{y}{y_0} = R_{yp} \cdot R_{yw} \cdot R_{yd} \quad (3)$$

式中 R_y ——作物相对产量; y ——计算年份作物的实际产量; y_0 ——作物正常生长条件下计算年份的最高产量; R_{yp} ——只有种植日期推迟而造成减产时的相对产量; R_{yw} ——只有水分过多(渍害)情况发生时而减产的相对产量; R_{yd} ——只有干旱发生而减产时的相对产量。

1) 种植推迟时相对产量(R_{yp})的计算

为了计算 R_{yp} , 需要输入的资料为: 理想的播种日期(PD), 生长季节长度(I_{GROW}), 不会造成减产的最后种植日期(J_{LAST})。DRAINMOD 根据可耕性条件模拟计算, 确定可供整地及播种的日期, 并进行相对产量 R_{yp} 的计算。模型考虑了 2 个减产因素: PDRF 和 PDRF2。如果播种发生在最优种植日期以后, 但在第一个减产期(时间为 DELAY1d)以前, 则每推迟 1 d 按 PDRF 减产, 推迟到第一个减产期以后, 则每天按 PDRF2 减产。种植日推迟的相对产量为:

$$R_{yp} = 1 - PDRF \cdot PDELAY, \quad PDELAY < DELAY1 \quad (4)$$

$$R_{yp} = 1 - PDRF \cdot DELAY1 - PDRF2 \cdot (PDELAY - DELAY1), \quad PDELAY > DELAY1 \quad (5)$$

式中 PDELAY——从 J_{LAST} 开始的第 2 天起算的播种日期。

2) 水分过多时的相对产量计算

地下水位过高对作物产量的影响采用 Hiler 提出的抑制天数指标的概念(SDI), 按下式计算

$$R_{yw} = R_{y\max} - \alpha SDI_w \quad (6)$$

式中 $R_{y\max}$ ——相对产量与 SDI_w 关系的截距, 当作物可以忍受一定的高水位条件而不减产时, $R_{y\max}$ 可能大于 1; SDI_w ——水分过多的抑制天数指标, 可按下式计算

$$SDI_w = \sum_{j=1}^N CS_{wj} \cdot SDW_j \quad (7)$$

式中 N ——生长期的生长天数序号, CS_{wj} ——第 j 天的敏感因子。

1.2 淮北砂姜黑土区的模型输入参数

1.2.1 试验区简介

安徽省淮北平原地处 114°58'~118°10'E, 32°45'~34°35'N, 全区土地面积为 3.74 万 km², 耕地面积为 210 万 hm², 总人口 2550 万。地势平坦, 属黄淮海平原的一部分, 是安徽省重要的商品粮、棉、油生产基地。多年平均降水量为 770~950 mm, 自北向南递增; 降水的年际间和年内分布不均, 年际间最大与最小比值达 3~4, 年内则主要集中在 6~9 月份, 其降雨量约占全年总雨量的 60%~70%, 且多以暴雨形式出现^[7]。易形成涝渍灾害的原因一是多暴雨, 降雨强度较大, 并且经常会出现较长时间的连阴雨, 尤其在汛期, 这种连阴雨经常与暴雨交织发生。二是淮北平原主要分布的砂姜黑土和潮土占土壤总面积的 86.4%。这种土壤有明显的棱柱状、块状结构, 垂直裂隙发达, 干缩湿胀性强。易引起作物遭受涝

渍威胁。三是淮北平原地势平坦，微地形起伏，自然坡度约为 1/7000~1/10000，汛期易积涝成灾。淮北平原易涝（渍）面积大，危害程度、发生机率高。据统计资料分析，淮北平原易涝面积 173 万 hm^2 ，占该区耕地面积 83.1%。多年平均受灾面积 55 万 hm^2 ，约占该区耕地面积 1/4，占全省涝灾面积 78.5%。涝渍发生的时间多在汛期 6~9 月，尤其是在汛期连续集中降雨及连阴雨过程中发生。在汛期以 7、8 月份发生机率最高，其次为 6、9 月份。

试验区处于中国南北过渡带的淮北平原砂姜黑土区，该地区是典型的涝渍灾害区，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，同时该地区降雨集中，因此涝渍灾害十分突出^[8]，及时地排除涝渍来保证作物产量最大化意义重大。

1.2.2 DRAINMOD 模型输入参数

DRAINMOD 模型输入参数包括 4 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、蒸发资料。

2) 土壤资料

表 1 所列为试验地区实际所测得的土壤分层、每层厚度及其土壤侧向导水率和饱和导水率。

表 1 DRAINMOD 模型土壤参数
Table 1 Soil input parameters for DRAINMOD model

土层/cm	0~20	20~50	>50
θ_s	0.35	0.394	0.41
θ_r	0.07	0.1	0.16
a	0.005	0.008	0.007
n	1.725	1.386	1.749
m	0.420	0.278	0.428
侧向导水率/ $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$		2.8	
饱和导水率/ $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$		4.8	

注： θ_s ——土壤饱和含水率； θ_r ——土壤初始含水率； a ， n ， m ——拟合参数。

3) 排水系统参数

试验区实际的排水深度为 1 m，排水暗管的管径为 50 mm，平整状态按照 0.5 mm，排水距离作为变量进行分析。

4) 作物资料

作物为冬小麦和棉花，其模型输入参数如表 2 所示。其中试验区栽种的冬小麦和棉花种植和收获日期、生育期阶段的划分，根据生产实际统计；根深的确定按照模型介绍的方法，根据作物系数查表计算确定^[8,9]；模型计算公式中的截距值和斜率，冬小麦是由实测资料计算出来的，棉花的实测资料采用的指标是超标准累积水深 SFEW_{30} ，因为都是同样的线性模型，因此直接借用了该指标拟合后确定的参数值，作物敏感因子冬小麦是根据实测资料^[1]反推求得的数据，棉花由于没有实测资料，则是根据模型自带的实测棉花资料推出的参数值。

表 2 DRAINMOD 模型作物输入参数

Table 2 Crop input parameters for DRAINMOD model

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)/d	苗期	1~31	1~124	
	营养生长期	32~81	125~174	
	花铃、抽穗期	82~135	175~214	
	成熟期	136~180	215~234	
根深 /cm	苗期	3	3	
	营养生长期	4~60	3~30	
	花铃、抽穗期	60	30	
	成熟期	60~20	30~3	
YRD_{max}		109	100	
α		0.51	0.42	
敏感因子	种植后天数/d	CS_{Wj}	种植后天数/d	CS_{Wj}
	0	0.2	0	0.15
	30	0.22	124	0.15
	50	0.32	144	0.15
	70	0.19	159	0.3
	90	0.08	174	0.3
	110	0.02	186	0.3
			214	0.25

注： YRD_{max} ， α ——涝渍模型计算中的截距值和斜率。

2 模拟结果与分析

2.1 小麦的模拟结果

从小麦产量的模拟结果（图 2）可知，1987~2005 年 19 年中，1987~1990 年、1992~1996 年、1999 年、2002~2005 年总共 14 a 的模拟结果显示，相对产量都为 100%，2000 年排水间距从 10 m 增加到 200 m，相对产量只下降了 4.5%，排水间距的大小对其相对产量的影响较小，说明试验区现有的地面排水系统可以满足其排水需求，同时也说明确定该地区地下排水系统的设计参数时可以不考虑对冬小麦的影响。

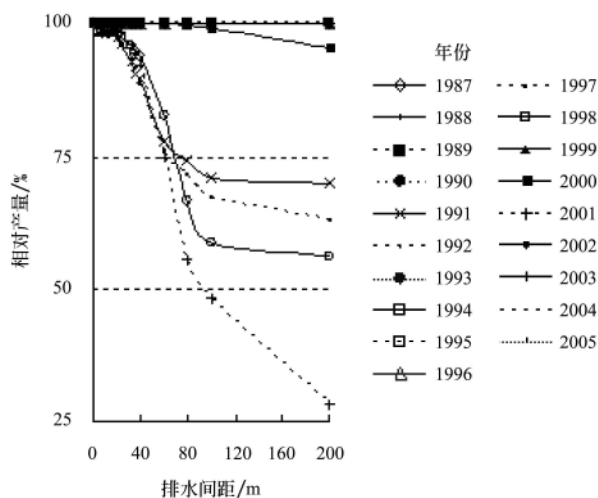


图 2 1987~2005 年小麦相对产量随排水间距变化
Fig.2 Changes of relative wheat yield for different spacing of drainage ditches from 1987 to 2005

其余 4 a (1991, 1997, 1998, 2001 年) 出现随排水间距增加, 产量有明显下降的趋势, 排水间距从 40 m 开始产量明显下降, 从图 2 小麦生育期总降雨量可以看到, 这 4 年中, 1991、1997、1998 年是因为小麦整个生育期 (10 月 1 日~翌年 5 月 31 日) 总降雨量超过 400 mm 时出现涝渍灾害, 而 2001 年总降雨量仅为 296.6 mm, 但涝渍灾害反而更为严重, 从图 3 生育期日降雨与 1987 年 (降雨总量为 347.1 mm) 对比可以看到, 在生育期中后期, 2001 年日降雨量出现 4 次高峰值, 造成中后期出现涝渍灾害, 产量急剧下降; 而 1987 年总雨量虽然大于 2001 年, 但其日降雨量分布均匀, 没有大的峰值, 因而并没有造成涝渍灾害。从以上分析可以看出, 除了特殊的降雨强度与分布外, 对小麦的生长来说, 涝渍灾害不是影响产量的主要因素, 所以该区的排水设计可以不考虑涝渍灾害对小麦的影响, 这也与涝渍排水试验的结果一致^[10,11]。

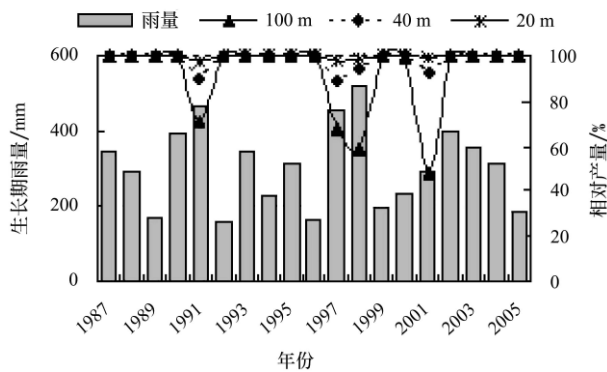


图 3 小麦产量随生育期降雨总量变化

Fig.3 Changes of relative wheat yield for the total rainfall during growing period

2.2 棉花的模拟结果

涝渍对棉花单株成铃数和产量的影响较大。随着涝渍胁迫的增加, 涝渍程度加重, 棉花根系严重缺氧, 呼吸受阻, 根系吸水吸肥困难, 棉花生长受抑制的时间延长, 从而造成棉花蕾铃脱落增加, 单株成铃数减少, 减产增大^[12]。从棉花产量的模拟结果 (图 4) 可知, 1986~2005 年 20a 中, 1986、1988、1989、1992、1994、1999、2001、2002、2004 年 9a 的模拟相对产量与排水间距没有关系, 即没有涝渍现象, 而其余的 11 年均出现了涝渍灾害, 这表明该区域种植棉花, 自然降水会造成一半以上涝渍灾害, 棉花的生育期 (4~10 月) 刚好经过该地区雨季 (6~9 月), 这表明在该区域雨季容易出现涝渍, 概率超过了 50%; 在排水间距小于 40 m 时, 作物产量在最大产量附近, 基本变化不大, 当排水间距大于 40 m 以后, 产量随间距增大迅速下降。

从图 4 棉花生育期多年总降雨量分布可以看到, 总降雨量超过 718 mm 时就出现涝渍灾害, 但涝渍灾害的程度并不是随着总雨量的增加而增加, 以总降雨量最大的 2005 年 (1115.2 mm) 和减产最多的 1998 年对比, 2005 年总雨量最多反而涝渍程度最小, 1998 年总雨量为 755.9 mm, 但是因为涝渍减产程度最大。

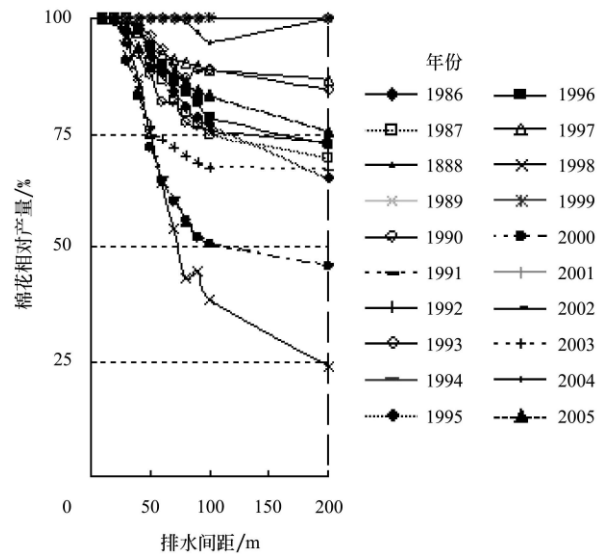


图 4 1987~2005 年棉花相对产量随排水间距变化

Fig.4 Changes of relative cotton yield for different spacing of drainage ditches from 1987 to 2005

从图 5 生育期日降雨分布可以看到, 2005 年与 1998 年相比, 在生育期早中期, 1998 年日降雨量出现 4 次高峰值, 造成花铃期以前出现涝渍灾害, 产量急剧下降, 从前面敏感系数值也可以看到棉花营养生长期对涝渍更为敏感一些; 而 2005 年总雨量虽然大于 1998 年, 但其日降雨量峰值在棉花生育花铃后期出现, 因而并没有造成涝渍灾害。

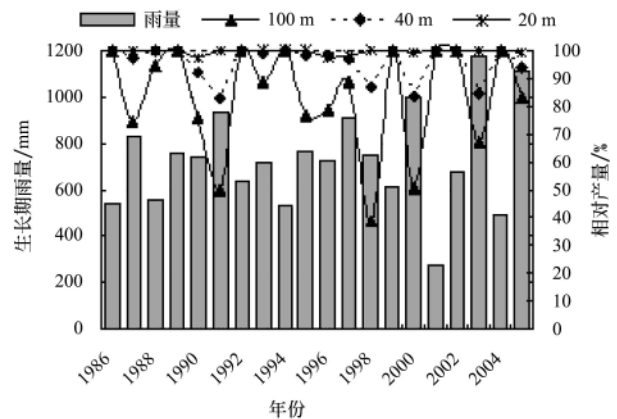


图 5 棉花产量随生育期降雨总量变化

Fig.5 Changes of relative cotton yield for the total rainfall during growing period

3 结 论

1) 除了特殊的降雨强度与分布外, 对小麦的生长来说, 不必考虑增加另外的排水设施, 这也与实际的排水工程设计时所考虑的因素相一致。

2) 随着涝渍胁迫的增加, 涝渍程度加重, 棉花根系严重缺氧, 棉花生长受抑制的时间延长, 从而造成棉花蕾铃脱落增加, 单株成铃数减少, 减产增大。试验区棉花生长期出现涝渍的概率超过 50%, 若排水间距大于 40 m, 相对产量下降明显, 对于该试验区和同类地区来说, 地下排水系统的设计应以棉花的设计指标作为设计

参数。

3) 田间暗管排水设计, 是为了排出过量的水, 保持根区土壤适宜的孔隙率, 提高作物生产力。DRAINMOD 预报和比较了不同排水管间距的作物产量, 该模型正确地预报了小麦和棉花的相对产量。模拟结果较好的反应了实际情况, 可以认为该模型对水文变量具有良好的模拟性能, 可为地表地下排水系统的设计提供理论依据。DRAINMOD 模型用于湿润地区浅地下水位, 模型应用简单, 要求的输入参数较少, 是我国今后农田排水工程设计和水管理的一个有效工具, 特别是对雨水较多、地下水位较高的南方湿润地区的地下排水等研究提供了借鉴。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] Skaggs R W. A water management model for shallow watertable soils[R]. Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, NC State University, Raleigh, NC, 1978.
- [3] Ross P J. Efficient numerical methods for infiltration using Richards' equation[J]. Water Resour Res, 1990, 26 (2): 279—290.
- [4] Amatya D M, Skaggs R W. Hydrologic modeling of a drained pine plantation on poorly drained soils[J]. Forest Sci, 2001, 47 (1): 103—114.
- [5] Borin M, Morari F, Bonaiti G, et al. Analysis of DRAINMOD performances with different detail of soil input data in the Veneto region of Italy[J]. Agric Water Manage, 2000, 42 (3): 259—272.
- [6] Helwig T G, Madramootoo C A, Dodds G T. Modelling nitrate losses in drainage water using DRAINMOD 5.0[J]. Agric Water Manage, 2002, 56(2): 153—168.
- [7] 王友贞, 叶乃杰. 安徽淮北平原农田排水问题[J]. 中国农村水利水电, 2008, (2): 5—7.
- [8] 温 季, 郭树龙, 卢闻航. 淮北平原涝渍兼治的组合排水工程形式[J]. 中国农村水利水电, 2004, (6): 7—9.
- [9] Skaggs R W. Drainmod Reference Report Methods for Design and Evaluation of Drainage-water Management Systems for Soil with High Water Tables[D]. North Carolina: North Carolina State University, 1988: 5—36.
- [10] Richard G, Allen, Luis S, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56.
- [11] SL109—1995, 农田排水试验规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [12] 沈荣开, 王修贵, 张瑜芳, 等. 涝渍排水控制指标的初步研究[J]. 水利学报, 1999, (3): 71—74.

Simulation of crop yield for different spacing of drainage ditches by using DRAINMOD model

Wen Ji^{1,2}, Zai Songmei^{2,3}, Guo Shulong², Wang Quanjiu¹, Luo Wan¹

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Ministry of Water Resources, Xinxiang 453003, China;

3. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Farmland drainage works play an active role in preventing water-logging disasters, promoting crop growth, improving the management of farming fields. Reasonable drainage works may reduce or eliminate the impact of water-logging disasters, and it is the main way to increase crop production. DRAINMOD model can be used in the water table management system to simulate the subsurface drain flow and crop yield. Based in the datum of Shajiang black soil, weather, crops, and other information measured in the Huaibei Plain, DRAINMOD model was run for a long sequence in the simulation of crop yields for different drain spacing. The results show that the effect of spacing of drainage ditches on winter wheat's relative yield is smaller. In the period of cotton growing, the probability of water-logging more than 50 percent, if the drainage ditches distance greater than 40 m, the relative yield of cotton declined significantly. In order to guide the design of drainage works, the design parameters of underground drainage system in this area should be designed according to the cotton's design index.

Key words: DRAINMOD; relative crop yield; spacing of drainage ditches; water-logging; defense