

缺水条件下非充分灌溉制度预报系统的研制*

丁日升¹, 康绍忠^{2,1}, 冯绍元², 王军涛², 周良臣¹

(1. 西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 以Jensen作物水分生产函数模型为基础, 运用动态规划方法, 建立了非充分灌溉条件下冬小麦、棉花、夏玉米的优化灌溉制度预报系统; 并编制了可视化的程序界面, 只要输入相关参数(土壤田间持水率、初始含水率、土壤容重、可供水量、不同阶段潜在作物蒸发蒸腾量, 各阶段不同水平年的有效降雨量值和作物不同阶段的计划湿润层深度), 就可得出适合于不同地区的优化灌溉制度, 操作简单, 具有实用性。以山西晋中和临汾地区为例验证, 系统计算显示上述3种作物比传统灌溉分别节水为9%, 7%和3%; 在供水量不足的情况下, 系统可指导如何在时间上分配水量以使减产最小, 且可得知在这种灌溉方式下的具体减产量。

关键词: 非充分灌溉; 水分生产函数; 动态规划; 灌溉制度; 可视化语言VB

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)02-0079-07

1 概述

中国是一个水资源短缺的国家, 在北方地区尤为突出, 据预测中国北方地区人均水量到2010年为 840 m^3 , 到2030年为 712 m^3 , 远低于国际公认的 1700 m^3 /人缺水警戒线^[1]。与此同时, 用水效率不高、用水严重浪费的现象普遍存在。由于技术和管理水平落后、灌溉设施老化失修等原因, 目前我国灌溉水利用率仅为45%左右, 与发达国家80%的水平相差甚远, 我国每千克粮食的耗水量是发达国家的2~3倍, 农业节水潜力很大。

非充分灌溉研究始于上世纪60年代中期, 80年代非充分灌溉技术开始在水资源紧缺的国家推广应用。非充分灌溉(Non-full irrigation), 也称有限灌溉(Limited irrigation)或蒸发蒸腾量亏缺灌溉(Evapotranspiration deficit irrigation 简称EDI), 是作物实际蒸发蒸腾量小于潜在蒸发蒸腾量的灌溉, 具体系指在供水水源不足的情况下, 允许作物某一时段遭受一定程度的水分亏缺, 把有限的灌溉水量用在作物产量贡献最大的生育时段, 以确保获得总产量和效益最佳的一种灌溉方式^[2]。它要求不能将有限的灌溉水量均匀地分配在整个生长期, 必须考虑供水量在各生育阶段的最佳分配。它允许作物在某一时期遭受一定程度的水分亏缺, 产量略

低于正常灌溉条件下的水平, 以节约灌溉用水, 扩大实际的灌溉面积, 使灌区农业生产的总经济效益达到最大。目前非充分灌溉在我国干旱地区农业生产中发挥着重要作用^[2]。

当水资源不足, 只能采用非充分灌溉时, 如何在时间(作物不同生长阶段)上合理地分配有限灌溉水量, 以获得最高的产量或收益, 或者使缺水造成的减产损失最小, 是实行非充分灌溉的关键之一, 而最优灌溉制度是整个研究的中心。非充分灌溉条件下最优灌溉制度的设计过程, 是一个将一定灌溉水量在作物各生育阶段进行合理分配的多阶段决策过程, 较适用用动态规划(Dynamic programming, 以下简称DP)求解^[3]。

1967年, Musgrave论证了DP法应用于有限灌溉水量时求解最优灌溉制度的可行性, 并以阶段初的可供水量为状态变量建立了相应的DP模型; 1968年, Hall和Butcher提出了一个包括阶段初可供水量和土壤含水量两个状态变量的二维DP模型, 决策变量为各阶段灌水量; 1988年Rao等提出用生育阶段和周时段的两级水平求解优化灌溉制度^[4,5]。1986年, 荣丰涛用DP法对山西冬小麦最优灌溉制度进行了研究; 1988年, 王维平用DP模型制定了牧草的最优灌溉制度; 1990年, 袁宏源^[6]等用二维DP模型求解了黑龙江地区多种旱作的最优灌溉制度。1993年, 张展羽^[7]等将模糊动态规划技术

* 收稿日期: 2005-08-22

基金项目: 国家“863”计划项目(2002AA6Z3031); 国家自然科学基金重点项目(50339030)

作者简介: 丁日升(1979-)男, 内蒙古乌盟人, 硕士, 研究方向为节水灌溉制度。

应用于非充分灌溉制度的优化设计;同年张展羽^[8]等基于Morgan模型,用二维DP模型求解了冬小麦的最优灌溉制度;1995年,崔远来^[9]等运用以上模型,求解了稻田非充分灌溉最优灌溉制度;1997年,崔远来^[10]建立了有限水量在多种作物之间进行最优分配的两层分解协调模型;1997年,李寿声^[11]等在Morgan模型中综合考虑水、肥对产量的影响,以此为基础用二维DP模型求解了稻田优化灌溉制度。郭宗楼^[12],陈亚新,邱林等^[13],杨路华^[14],上官周平^[15]均用DP模型求解了相关的作物最优灌溉制度。

上述的研究对非充分灌溉理论的研究及应用都做出了很大的贡献,同时在实际应用中也具有一定的作用。但是,随着计算机技术的迅猛发展,研发实用性和操作性比较强的可视化终端系统是需要的。本文就是基于此,运用了可视化的编程语言Visual Basic 6.0(VB)^[16,17],研制非充分灌溉制度预报系统。

2 数学模型

单作物灌溉制度的优化,是以作物水分生产函数为依据,用动态规划求解净灌溉水量在作物各生育期的最优分配,系统概化模型如图1,其中: R_i 为第*i*阶段可用于分配水量的增加量(m^3/hm^2), I_i 为各阶段初可用于分配的水量(m^3/hm^2), L_i 为第*i*阶段其它用水量(m^3/hm^2), m_i 为每阶段的灌水量(m^3/hm^2), P_i 为有效降雨量(m^3/hm^2), W_i 为计划湿润层内可供作物利用的总有效水量(m^3/hm^2), ET_i 为实际蒸发蒸腾量(m^3/hm^2), G_i 为地下水补给量(m^3/hm^2)。数学模型如下(以第*k*种作物为例):

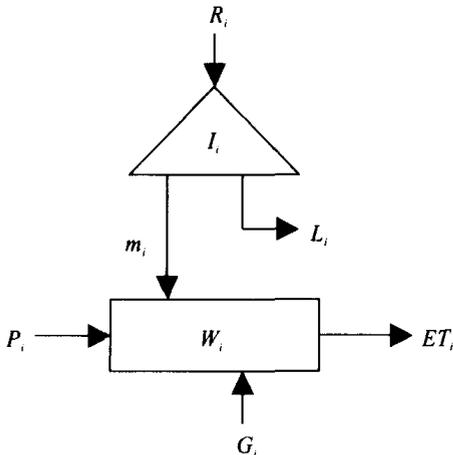


图1 系统概化模型

Fig. 1 Sketch of system model

(1) 阶段变量:根据作物生育过程,将其全生育期划分为*N*个生育阶段,以生育阶段*i*为阶段变量, $i=1,2,\dots,N$ 。

(2) 状态变量:状态变量为各阶段初可用于分配的水量 I_i 和计划湿润层内可供作物利用的总有效水量 W_i , $i=1,2,\dots,N$, W_i 计算如下:

$$W_i = 10\,000 \gamma H_i (\theta - \Theta) \quad (1)$$

式中, γ 为土壤干容重(t/m^3); H_i 为计划湿润层深度(m); θ 为计划湿润层内土壤平均含水率(g/g),以占干土重的百分数计; Θ 为土壤有效含水率(g/g),以占干土重的百分数计,对于旱作物,取田间持水率的60%,其它意义同前。

(3) 决策变量:决策变量为每阶段的灌水量 m_i , $i=1,2,\dots,N$ 。

(4) 状态转移方程:

① 水量分配方程:

$$I_{i+1} = I_i + R_i - m_i - L_i \quad (2)$$

式中,意义同前。

② 田间水量平衡方程:

$$ET_i = W_i - W_{i+1} + P_i + m_i + G_i \quad (3)$$

式中,意义同前。

(5) 目标函数:以作物单位面积实际产量 Y_i (m^3/hm^2)同最高产量 Y_m (m^3/hm^2)的比值最大为目标,并以连乘的作物生育期内水分生产函数Jensen模型计算,即:

$$F^* = \max\left(\frac{Y}{Y_m}\right) = \max_{i=1}^N \prod \left(\frac{ET_i}{ET_{mi}}\right) \lambda \quad (4)$$

式中, λ 为第*i*阶段作物敏感指数, ET_{mi} 为第*i*阶段的潜在蒸发蒸腾量(m^3/hm^2)。

(6) 约束条件:

$$0 \leq m_i \leq I_i \quad (5)$$

$$0 \leq ET_i \leq ET_{mi} \quad (6)$$

$$0 \leq W_i \leq W_{mi} \quad (7)$$

$$\Theta \leq \theta \leq \theta \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N (m_i + L_i - R_i) \leq Q_k/A_k \quad (9)$$

$$0 \leq I_i \leq Q_k/A_k + \sum_{j=1}^i (R_j - L_j - m_j) \quad (10)$$

式中, Q_k 为全生育期可用于分配的净水量(m^3),即分配给第*k*种作物的净水量, A_k 为第*k*种作物的种植面积(hm^2), W_{mi} 为田间蓄水上限值(即饱和含水率下的土壤计划湿润层内的水量)(m^3/hm^2); θ 为田间持水率(g/g),以占干土重的百分数计。

(7) 初始条件:

$$\theta = \theta \quad (11)$$

$$I_1 = Q_k/A_k \quad (12)$$

式中, θ 为初始计划湿润层土壤平均含水率(g/g), 以占干土重的百分数计。

(8) 递推方程:子模型为具有两个状态变量和一个决策变量的动态规划问题,采用逆序递推,顺序决策计算,递推方程为:

$$\begin{cases} F_i^*(I_i, W_i) = \max_{m_i} \{ ET_i / ET_{m_i} \}^\lambda \\ F_{i+1}^*(I_{i+1}, W_{i+1}) \} & i = 1, 2, \dots, N \\ F_{N+1}^*(I_{N+1}, W_{N+1}) = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $F^*(I_{i+1}, W_{i+1})$ 为当前状态 I_i 和 W_i 下, 决策为 m_i 时, 其后阶段的最大相对产量。

3 模型求解

该模型为具有两个状态变量及一个决策变量的二维动态规划问题,使用动态规划逐次渐近法对模型进行求解^[2,18],步骤如下:

(1) 作物各生育阶段初土壤中可供利用的水量 W_i 作为已知的虚拟轨迹,以每阶段初可分配的水量 I_i 作为第一个状态变量,将其离散成 N_1 (作物阶段数目) 个水平。这样二维问题降为一维问题,采用常规动态规划的逆序递推,顺序决策的方法进行计算,其递推方程为:

$$F_i(I_i) = \max_{m_i} \{ R_i(I_i, m_i) \times F_{i+1}(I_{i+1}) \} \\ i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

式中, $R_i(I_i, m_i)$ 为在状态 I_i 下, 作决策 m_i 时所得面临阶段效益,用下式计算:

$$R_i(I_i, m_i) = (ET_a / ET_{m_i})^\lambda \\ i = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (15)$$

$F_{i+1}^*(I_{i+1})$ 为余留阶段的最大效益,用下式计算:

$$F_N^*(I_N) = (ET_{aN} / ET_{mN})^\lambda \\ i = N \quad (16)$$

经优化计算,得出给定条件下的最优状态序列 $\{I_i^*\}$ 及最优决策序列 $\{m_i^*\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

(2) 将第一步的优化结果 $\{I_i^*\}$ 和 $\{m_i^*\}$ 固定,在给定的初始条件下,求解土壤可利用水量 W_i 和各生育阶段实际腾发量 ET_i 的最优值,将第二个状态变量 W_i 离散成 N_2 (作物阶段数目) 个水平,决策变量不离散,以免内插,其递推方程为:

$$F_i(W_i) = \max_{ET_i} \{ R_i(W_i, ET_i) \times F_{i+1}(W_{i+1}) \} \\ i = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (17)$$

式中, $R_i(W_i, ET_i)$ 为在状态 W_i 下, 作出决策 ET_i 时所得面临阶段效益,用下式计算:

$$R_i(W_i, ET_i) = (ET_a / ET_{m_i})^\lambda$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (18)$$

$F_{i+1}^*(W_{i+1})$ 为余留阶段的最大效益,用下式计算:

$$F_N^*(W_N) = (ET_{aN} / ET_{mN})^\lambda \\ i = N \quad (19)$$

经优化计算,得出给定条件下的最优状态序列 $\{W_i^*\}$ 及最优决策序列 $\{ET_i^*\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

(3) 比较前两步的计算结果。如果第二步的优化结果与第一步的虚拟轨迹不同,则以第二步的优化结果 $\{W_i^*\}$ 为虚拟轨迹,重复上述优化过程,直到对两个状态变量进行最优化计算都得到相同的目标函数值(在拟定的精度范围内)为止。

4 预报系统构造及实例验证

基于VB 6.0 具有面向对象的可视化设计工具,事件驱动的编程机制和结构化的程序设计语言等特点编制可视化的非充分灌溉预报系统。主窗体上面一行包括作物类型框(提供冬小麦、夏玉米和棉花三种作物)、田间持水率 θ (g/g) 框、初始含水率 θ (g/g) 框、生育期可供水量 I_1 (m^3/hm^2) 框、土壤容重 γ (t/ m^3) 框。 θ (g/g) 框架包括初始含水率 $\theta = \theta, \theta \dots \theta_{i+1}$ (作物有 i 个生育阶段,故有 $i+1$ 个分界点) 为模型求解时给定的初始土壤含水率(为迭代方便,可取田间含水率的70%~80%); λ 框架为各生育阶段的敏感指数值; P_i 框架为各生育阶段的有效降雨量 (m^3/hm^2); ET_{m_i} 框架为各生育阶段的潜在腾发量 (m^3/hm^2); H_i 框架为各生育阶段的计划湿润层深度 (m) (取 $i+1$ 个值,原因同 θ 框架)。窗体左下方有“计算”(运行程序)、“重置可供水量(只要求输入 I_1 的值,其他输入值不变,主要是为了节省用户在同种作物不同灌溉定额下的输入时间)、“全部重新赋值”(重新选择作物种类以及输入相应的参数值)“返回主菜单”(此按钮结束本系统运行)4个命令按钮。计算结果框架中包括各阶段实际腾发量、各阶段初可分配水量,各阶段灌溉水量和最优相对产量值框。

程序按照前面介绍的动态规划逐次逼近法求解过程进行编写,考虑生产实际需要,每阶段的灌水定额 m_i 以 $150(m^3/hm^2)$ 为步长,即可能的灌水量为 0 、 150 、 300 、 450 、 $600 \dots (m^3/hm^2)$; 第 i 阶段可用于分配水量的增加量 R_i , 其它用水量 L_i 以及地下水补给量 G_i 均取为 0 。程序运行界面如图2,可根据各地的不同情况输入界面要求的参数。当程序运行时,如果可供水量 I_1 的输入值不是 150 的倍数,出现提示框要求输入符合的值;同样, $\theta \sim \theta_{i+1}$ 的值如果不是田间含水率的70%~80%的值,会出现提示; λ 的值要

求在0~1之间,否则会出现提示; H_i 的值要求在0~1,如果不在这个范围,会出现提示。本系统计算结果框显示如下值:各生育阶段实际腾发量 $ET_i(i=1, 2, \dots, N)$;各阶段初剩余的可供水量;全生育期可供水量在作物各阶段的灌水定额分配;以及在此种灌溉制度下的最优相对产量比值。

以山西省晋中、临汾地区为例进行验证。系统所需的基本资料如表1,选用 $P=75\%$ 的中等干旱年,分别计算棉花、夏玉米、冬小麦在不同的供水量时的最优灌溉制度。



图2 运行界面

Fig.2 Interface of system

图3 山西临汾地区中等干旱年供水量为 $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 夏玉米灌溉制度结果

Fig.3 Irrigation scheduling results of summer maize at allocable water $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ for Linfen, Shanxi, in dry hydrological year ($P=75\%$)

表1 山西晋中和临汾地区系统所需基本参数表^[19]

Table 1 Required parameters of system at Jinzhong and Linfen areas, Shanxi

作物名称 Name of crops	生育阶段 Phases of growing	起止日期 (月-日~月-日) Date of beginning to end (M-d~M-d)	λ	ET_{mi} (mm)	P_i (mm)	H_i (m)	备注 Remark
冬小麦 Winter wheat	播种~越冬 Sowing~overwintering	09-22~11-10	0.1232	98.1	51.3	0.4	$Y_m=7\ 710 \text{ kg}/\text{hm}^2$ $\theta=27\%$ $\theta=22\%$
	越冬~返青 Overwintering~reviving	11-11~03-20	0.1889	58.8	3.8	0.5	
	返青~拔节 Reviving~elongation	03-21~04-20	0.0450	83.4	4.8	0.6	
	拔节~抽穗 Elongation~tasselling	04-21~05-13	0.1677	94.4	38.4	0.6	
	抽穗~灌浆 Tasselling~milk filling	05-14~06-01	0.1386	116.0	11.3	0.8	
	灌浆~收获 Milk filling~harvesting	06-02~06-29	0.2107	60.9	40.8	0.8	
夏玉米 Summer corn	播种~拔节 Sowing~elongation	06-11~07-10	0.0484	71.4	29.6	0.4	$Y_m=6\ 765 \text{ kg}/\text{hm}^2$ $\theta=24\%$ $\theta=17\%$
	拔节~抽穗 Elongation~tasselling	07-11~08-10	0.1111	150.5	120.5	0.6	
	抽穗~灌浆 Tasselling~milk filling	08-11~08-30	0.1539	131.3	38.3	0.6	
	灌浆~收获 Milk filling~harvesting	08-31~09-30	0.1423	74.7	85.1	0.8	
棉花 Cotton	播种~现蕾 Sowing~budding	04-15~06-13	0.0880	105.8	88.7	0.4	$Y_m=1\ 380 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (皮棉 Lint cotton) $\theta=22\%$ $\theta=17\%$
	现蕾~开花 Budding~flowering	06-14~07-10	0.2581	91.7	76.5	0.6	
	开花~结铃 Flowering~boll setting	07-11~08-04	0.2896	121.8	55.7	0.6	
	结铃~吐絮 Boll setting~boll opening	08-05~08-30	0.3011	126.6	55.7	0.8	
	吐絮~收获 Boll opening~harvesting	08-31~10-14	0.2408	113.4	86.1	0.8	

注:冬小麦为晋中地区,夏玉米和棉花为临汾地区

Note: Winter wheat in Jinzhong area; summer corn and cotton in Linfen area.

由上表可以看出,冬小麦在越冬~返青及灌浆~收获阶段作物敏感系数值 λ 大,在播种~越冬阶

段其值最小。夏玉米在抽穗~灌浆及灌浆~收获阶段作物敏感系数值 λ 大,在播种~拔节阶段其值最

小。棉花在开花~结铃及结铃~吐絮阶段作物敏感系数值 λ 大,在播种~现蕾阶段其值最小。

土壤干容重取 $\gamma = 1.41 \text{ t/m}^3$,以可供水量为 $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,降水概率 $P = 75\%$ 的中等干旱年为例,在选取作物框中选择夏玉米(程序开始运行时作物为棉花,如图2),在界面中输入表1中夏玉米以下参数值: $\theta = 24$; $\theta = 17$; $I_1 = 900$; $\gamma = 1.41$; θ_0 (为初始含水率): 17 ; $\theta \sim \theta$ 的值为 θ 的 $70\% \sim 80\%$ 之间的任意值(本例为 18); $\lambda = 0.0484$; $\lambda = 0.1111$; $\lambda = 0$ 。

1539 ; $\lambda = 0.1423$; $P_1 = 29.55$; $P_2 = 120.45$; $P_3 = 38.25$; $P_4 = 85.05$; $ET_{m1} = 71.4$; $ET_{m2} = 150.45$; $ET_{m3} = 131.25$; $ET_{m4} = 74.7$; $H_1 = 0.4$; $H_2 = 0.6$; $H_3 = 0.6$; $H_4 = 0.8$; $H_5 = 0.8$ 。然后单击“计算”按钮,可以得到如图3的结果。单击“退出”按钮,则退出此程序的运行。类似地,当对冬小麦及棉花进行求解时,经过上述同样的步骤,可得到各自的结果如表2,绘制不同供水量与其相对产量的关系如图4。

表2 山西晋中和临汾地区中等干旱年($P = 75\%$)的优化灌溉制度计算结果表

Table 2 Optimized irrigation schedules in moderate dry years (75%) in Jinzhong and Linfen areas in Shanxi

作物名称 Crops	生育期可供水量 Total allocated water supply (m^3/hm^2)	生育阶段灌水量(m^3/hm^2) Irrigation quota in different growing stages						最大相对产量 Maximum relative output	减产量 Reduction of output (kg/hm^2)
		①	②	③	④	⑤	⑥		
冬小麦 Winter wheat	0	0	0	0	0	0	0	0.3666	4883.51
	300	0	0	0	0	150	150	0.4368	4342.27
	600	0	150	0	150	150	150	0.5168	3725.47
	900	0	300	0	150	150	300	0.5830	3215.07
	1200	0	300	0	300	300	300	0.6497	2700.81
	1500	0	450	150	300	300	300	0.7154	2194.27
	1800	0	450	150	450	450	300	0.7748	1736.29
	2400	150	600	150	600	600	300	0.8838	895.90
	2700	300	600	150	600	750	300	0.9294	544.33
	3000	450	600	300	600	750	300	0.9718	217.42
3150	450	600	300	600	900	300	1.0	0.00	
棉花 Cotton	0	0	0	0	0	0	0	0.6232	519.98
	150	0	0	0	150	0	0	0.6543	477.07
	300	0	0	150	150	0	0	0.6864	432.77
	450	0	150	150	150	0	0	0.72	386.40
	600	0	150	150	150	150	0	0.7548	338.38
	750	0	150	150	300	150	0	0.7869	294.08
	900	0	150	300	300	150	0	0.8199	248.54
	1050	0	150	300	300	300	0	0.8529	203.00
	1200	0	150	300	450	300	0	0.8847	159.11
	1350	0	150	450	450	300	0	0.9171	114.40
1500	0	150	450	600	300	0	0.9475	72.45	
1650	0	150	600	600	300	0	0.9788	29.26	
1800	150	150	600	600	300	0	1.0	0.00	
夏玉米 Summer corn	0	0	0	0	0	0	0	0.8228	1198.76
	150	0	0	150	0	0	0	0.8437	1057.37
	300	0	150	150	0	0	0	0.8644	917.33
	450	0	150	300	0	0	0	0.8832	790.15
	600	0	300	300	0	0	0	0.9009	670.41
	750	0	300	450	0	0	0	0.9181	554.05
	900	0	450	450	0	0	0	0.9337	448.52
	1050	0	450	600	0	0	0	0.9495	341.63
	1200	150	450	600	0	0	0	0.9642	242.19
	1350	150	450	750	0	0	0	0.9789	142.74
1500	150	600	750	0	0	0	1.0	0.00	

注:对冬小麦,①~⑥分别代表:播种~越冬;越冬~返青;返青~拔节;拔节~抽穗;抽穗~灌浆;灌浆~收获。对棉花,①~⑤分别代表:播种~现蕾;现蕾~开花;开花~结铃;结铃~吐絮;吐絮~收获。对玉米,①~④分别代表:播种~拔节;拔节~抽穗;抽穗~灌浆;灌浆~收获。

Notes: Winter wheat, ①~⑥ represent sowing~overwintering, overwintering~reviving, reviving~elongation, elongation~tasselling, tasselling~milk filling and milk filling~harvesting stages. Cotton, ①~⑤ represent sowing~budding, budding~flowering, flowering~boll setting, boll setting~boll opening and boll opening~harvesting stages. Corn, ①~④ represent sowing~elongation, elongation~tasselling, tasselling~milk filling and milk filling~harvesting stages.

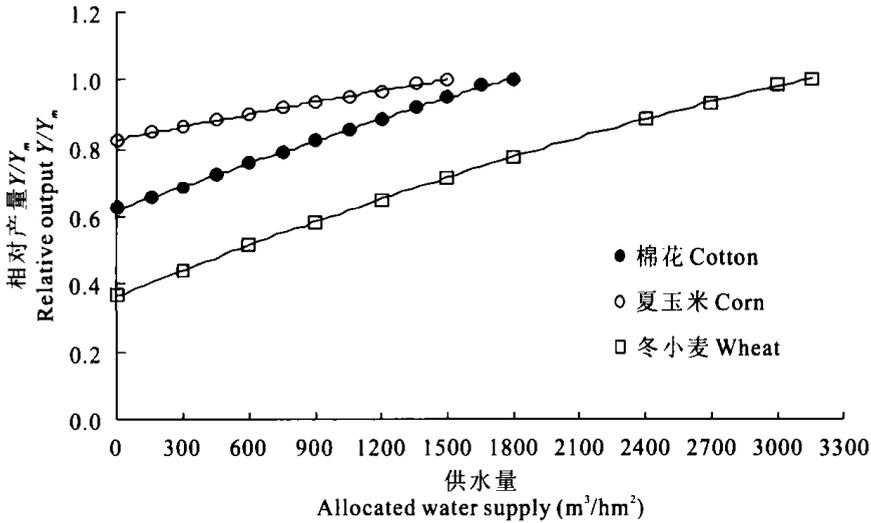


图4 供水量与相对产量关系

Fig. 4 Relationship between allocable water and relative output

由表2及图4可知:

(1) 冬小麦、棉花、夏玉米产量随灌水量的增加而增加。在灌溉定额较小时,增长幅度大,随灌溉定额增大,产量增加梯度渐小,即灌水的边际效益减小。优化灌溉制度不仅提供了产量随供水量而变化的过程,也指明了丰产所需的灌溉定额。本例中,在丰产条件下,冬小麦灌溉定额需 $3\ 150\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,棉花为 $1\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,夏玉米为 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

(2) 由于优化灌溉制度系按各阶段供水量对产量的综合影响而确定,能以较小的灌溉定额取得较高的产量。例如晋中冬小麦充分灌溉耗水 $5\ 115\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,生育期有效降雨量为 $1\ 501.5\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,仍需灌水 $3\ 613.5\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,而系统得出丰产灌溉定额为 $3\ 150\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,节水9%左右;临汾棉花充分灌溉耗水 $5\ 592\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,生育期有效降雨量为 $3\ 625.5\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,仍需灌水 $1\ 966.5\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,而系统得出丰产灌溉定额为 $1\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,节水8%;临汾夏玉米充分灌溉耗水 $4\ 278\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,生育期有效降雨量为 $2\ 733\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,仍需灌水 $1\ 545\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,而系统得出丰产灌溉定额为 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,节水3%。

(3) 愈是供水量不足,优化灌溉制度的指导意义愈大。传统的灌溉方式,在水量不足时多是凭经验灌“关键水”,优化灌溉制度则可指导在不同的缺水程度下如何在时间上分配水量,以使减产最小,且可直接估计减产损失。例如当棉花供水量为 $300\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 时,由表2中可查出在开花~结铃、结铃~吐絮期各灌水 $150\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,由于这两个阶段的 λ 值大,理论上也应该是在这两个阶段灌水,系统结果与

理论相吻合,且可定量知减产量为 $432.77\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

(4) 表2中给出了作物各生育阶段灌水量,具体灌溉方式是地面灌溉。如果系统决策得到作物某一生育期灌水量太小,例如 $150\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,而且这个生育期不是关键需水期,则可以不灌水,水可灌到临近的关键需水期;如果系统决策得到作物某一生育期灌水量太大,可以在这个生育期分几次灌水,提供给用户的灵活性比较大。

5 结论

本文采用 Jensen 产量模型,运用动态规划方法,建立了非充分灌溉条件下冬小麦、棉花、夏玉米的优化灌溉制度,较好地解决了可供水量在各生育期合理分配的问题,并且编制了可视化的程序界面;只要输入不同地区程序界面所需的相关参数,就可制定出适合于该地区的优化灌溉制度,操作简单,具有适用性。以山西地区冬小麦、夏玉米和棉花为例验证,结果显示比传统的充分灌溉节水;在供水量不足的情况下,系统可指导如何在时间上分配水量以使减产最小,且可得知在这种灌溉方式下的具体减产量。系统决策结果可为计划用水、灌区管理以及技术人员提供指导,为节约用水提供技术支持。

为了完善这个子系统,还要研究其他类型的作物水分生产函数(如加法模型)作为目标函数后,得出的优化结果和本文的优化结果进行比较,用户可以有比较性地选出最优的灌溉制度。

参考文献:

- [1] 刘昌明, 陈志恺. 中国可持续发展水资源战略研究报告集(第2卷): 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] 陈亚新, 康绍忠. 非充分灌溉原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [3] 何坚勇. 运筹学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 崔远来. 非充分灌溉优化配水技术研究综述[J]. 灌溉排水, 2000, 19(1): 66~70.
- [5] 袁宏源, 刘肇. 高产省水灌溉制度优化模型研究[J]. 水利学报, 1990, (11): 1~7.
- [6] 张展羽, 李寿声. 非充分灌溉制度的模糊优化设计[J]. 水利学报, 1993, (5): 38~43.
- [7] 张展羽, 李寿声, 何俊生, 等. 非充分灌溉制度设计优化模型[J]. 水科学进展, 1993, 4(3): 207~214.
- [8] 崔远来, 李远华, 李新健, 等. 非充分灌溉条件下稻田优化灌溉制度的研究[J]. 水利学报, 1995, (10): 29~34.
- [9] 崔远来, 李远华. 作物缺水条件下灌溉供水量最优分配[J]. 水利学报, 1997, (3): 37~42.
- [10] 李寿声, 沈菊琴. 水稻水、肥生产函数及优化灌溉模式[J]. 水利学报, 1997, (10): 18~24.
- [11] 郭宗楼. 灌溉水资源最优分配的 DP-DP 法[J]. 水科学进展, 1994, 5(4): 303~308.
- [12] 邱林, 陈守煜, 张振伟, 等. 作物灌溉制度设计的多目标优化模型及方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3): 90~93.
- [13] 杨路华, 夏辉, 王富庆, 等. 非充分灌溉制度制定过程中 Jensen 模型的求解与应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 13~15.
- [14] Rao, NH Sarma PBS, Chander Subhash. Irrigation scheduling under a limited water supply [J]. Agricultural Water Management, 1988, 15: 165-175.
- [15] Zhouping Shangguan, Mingan Shao, Robert Horton, et al. A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications [J]. Agricultural Water Management, 2002, 52: 139-154.
- [16] 龚沛曾, 陆慰民, 杨志强. Visual Basic 程序设计简明教程(6.0版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [17] 林永, 张乐强. Visual Basic 6.0 用户编程手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [18] 郭元裕, 李寿声. 灌排工程最优规划与管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [19] 王仰仁, 孙小平. 山西农业节水理论与作物高效用水模式[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.

Development of forecasting system on deficit irrigation scheduling under water shortage

DING Ri-sheng¹, KANG Shao-zhong^{2,1}, FENG Shao-yuan², WANG Jun-tao², ZHOU Liang-chen¹

(¹. Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

². Center for Agricultural Water Research in China, College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: According to Jensen water-production function model of crops, the optimal irrigation schedules for winter wheat, cotton and summer maize have been established by means of dynamic programming. The visual program interface has been developed, and the suitable optimal irrigation schedule could be made for different regions as long as the related parameters (field water capacity, initial soil moisture, soil bulk density, allocated water supply, potential evapotranspiration of crops at different stages, effective precipitation at various stages in different hydrological years, and the planned wetted depth at each stage) are input. Exemplary computation was conducted for Jinzhong and Linfen areas in Shanxi, showing that the water consumption of these three foregoing crops may be saved by 9%, 7% and 3% respectively, compared with the conventional irrigation method. Under the condition of water shortage, the system might supervise the allocation of water amount on the basis of time so as to minimize the reduction of output, and the quantity of yield reduction under optimal irrigation schedule could be forecasted.

Key words: deficit irrigation; water-production function; dynamic programming; irrigation scheduling; visual basic 6.0