

作物非充分灌溉制度优化的0-1规划模型建立与应用*

毛晓敏¹ 尚松浩²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:以农田水量平衡模型及作物水分生产函数模型为基础,引入0-1变量描述在可能的灌溉期内是否进行灌溉,建立了非充分灌溉制度优化的0-1规划模型。模型利用Microsoft Excel的规划求解工具进行求解。将该模型应用于山西省潇河灌区冬小麦灌溉制度优化,结果与现有模拟-优化模型比较接近,但求解过程更为简单。结果表明研究区冬小麦灌溉的关键期是拔节末期(5月上旬);初始土壤含水率较低时,适宜灌水时间有所提前,灌溉的增产效果也更明显;冬小麦蒸散发量及相对产量均随灌水量的增加而增加,但边际产量却逐渐降低。

关键词:非充分灌溉 0-1规划模型 农田水量平衡 作物水分生产函数

中图分类号:S274.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2014)10-0153-06

引言

作物非充分灌溉制度是非充分灌溉理论研究的重要内容,也是提高灌溉水利用效率的重要途径。用于确定作物优化灌溉制度的传统方法主要有动态规划^[1-2]、线性与非线性规划^[3-5]等,近年来模拟退火算法^[6]、遗传算法^[7-8]等启发式全局优化算法也广泛应用于灌溉制度优化。这些优化模型一般以作物生育阶段灌水定额为决策变量,通过作物水分生产函数计算不同灌溉制度下的产量,从而解决不同生育阶段间的水量分配问题;但这些模型对不同灌溉制度下的农田蒸散发过程及其对作物产量的影响考虑比较简单,并且难以确定具体的灌水日期。

为了更准确地描述不同灌溉制度下的农田蒸散发过程及其对作物产量的影响,模拟-优化方法也已经应用于灌溉制度优化^[9-10]。这类方法以农田水量平衡模型、动态水分生产函数模型或作物生长模型为基础,可以较为准确地反映不同灌溉制度下的农田蒸散发过程及其对作物产量的影响,同时与一定的优化技术相结合得到具体的灌水日期。但这类方法应用较为复杂,不方便实际应用。

为了建立一个既能反映作物蒸散发过程及其对产量的影响,又便于应用操作的作物非充分灌溉制度优化模型,本文在农田土壤水分平衡模型与作物水分生产函数模型的基础上,引入0-1变量描述在可能的灌溉日期内是否进行灌溉,建立作物非充分灌溉制度优化的0-1规划模型,并利用Microsoft

Excel的规划求解工具进行求解。将该模型应用于山西省潇河灌区冬小麦灌溉制度优化,并与传统的模拟-优化方法进行对比。

1 模型及求解方法

1.1 灌溉制度优化的0-1规划模型

在一定的灌溉定额下,作物灌溉制度优化的主要目标是通过确定合理的灌水次数、每次灌水时间及定额实现产量(或效益)最大。灌水定额*I*可以根据具体的作物、土壤条件及灌溉方式来确定,因此作物灌溉制度优化可以简化为灌水次数一定条件下的合理灌溉时间。为了反映作物生长阶段内不同时间灌溉对作物蒸散发及产量的影响,可以将作物生育期划分为较短的时段,引入0-1变量描述时段内是否进行灌溉,建立作物非充分灌溉制度优化的0-1规划模型

$$\max Y = Y_m f(x_1, x_2, \cdots, x_p) \tag{1}$$

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_p = M \tag{2}$$

- 式中 *Y*——实际产量,kg/hm²
Y_m——充分灌溉时的最大产量,kg/hm²
f——作物产量对灌溉制度的响应函数
p——划分的阶段数
M——一定灌水定额下的灌水次数
x_i——第*i*阶段是否进行灌溉的0-1变量,
x_i = 1表示该阶段进行灌溉,*x_i* = 0表示该阶段不进行灌溉

灌溉制度对作物产量的影响通过灌溉制度对作

收稿日期: 2013-09-06 修回日期: 2013-12-03
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102904)和国家自然科学基金资助项目(51279077)
作者简介: 毛晓敏,副教授,博士生导师,主要从事水文水资源与农业水土工程研究,E-mail: maoxiaomin@cau.edu.cn

物蒸散发过程的影响及蒸散发过程对作物产量的影响来体现,因此响应函数 f 在不同灌溉制度下的取值可通过农田土壤水分平衡模拟模型及作物水分生产函数来估算。

1.2 农田蒸散发计算及土壤水分平衡模型

一定时段内农田蒸散发取决于大气蒸发能力(以参考作物蒸散发表示)、作物类型及生长状况(以作物系数 K_c 表示)、土壤供水情况(以土壤水分胁迫系数 K_s 表示),其计算公式为^[11]

$$E = K_s E_m \tag{3}$$

其中 $E_m = K_c E_0 \tag{4}$

式中 E ——农田蒸散发,mm
 E_m ——不受水分胁迫时的农田最大蒸散发(作物需水量),mm
 E_0 ——参考作物蒸散发,mm

在农田蒸散发的计算中, E_0 与气象因素有关,可利用FAO推荐的Penman-Monteith公式^[11]计算。对于特定作物, K_c 与作物生育阶段和生长状况有关,可将其近似为生育时间 t 的函数,计算公式为^[12]

$$K_c = K_{cm} \exp(- (t - t_m)^2 / c^2) \tag{5}$$

式中 K_{cm} ——生育期最大作物系数
 t_m —— K_{cm} 对应的时间,d
 c ——形状参数,d

K_s 主要与土壤含水状况有关,计算公式为^[13]

$$K_s = \begin{cases} 0 & (W < W_p) \\ [(W - W_p) / (W_j - W_p)]^n & (W_p \leq W \leq W_j) \\ 1 & (W > W_j) \end{cases} \tag{6}$$

式中 W ——根系层贮水量,mm
 W_p ——凋萎点对应的根系层贮水量,mm
 W_j ——蒸散发受胁迫的临界贮水量,mm
 n ——经验指数

由于蒸散发计算中需要已知根系层贮水量 W ,但 W 的动态变化又与 E 相关,可建立农田土壤水分平衡模型用以推求 W 与 E 的动态变化过程。农田水量平衡的基本方程^[9, 14]为

$$\Delta W = W_2 - W_1 = P + I - E - Q - R \tag{7}$$

式中 W_1 、 W_2 ——时段始、末的根系层贮水量,mm
 ΔW ——根系层贮水量的变化量,mm
 P ——阶段降水量,mm
 I ——阶段灌水量,mm
 Q ——阶段根系层底部水分交换量(以渗漏为正),mm
 R ——阶段径流量,mm

在半干旱、半湿润地区径流量 R 一般比较小,

且主要出现在汛期,可以根据一定的产流机制(如蓄满产流)来估算,在枯水期可以忽略径流量。

农田水量平衡中的根系层底部水分交换量 Q 多采用简化法(近似认为 $Q=0$)、零通量面法、经验方法等进行估算。本模型采用文献[14]中提出的经验公式计算,即

$$Q = a (W / W_f)^d (W - W_c) \tag{8}$$

式中 a 、 d ——经验参数
 W_f ——根系层田间持水量,mm
 W_c ——根系层底部水分交换的临界贮水量,mm

W_c 与土壤持水能力、地下水埋深等因素有关,在地下水位变化不大时,可近似视为常数,作为模型参数根据实测土壤贮水量资料进行率定。

农田蒸散发计算及土壤水分平衡模拟模型的主要参数包括:式(5)的参数 K_{cm} 、 t_m 、 c ;式(6)的参数 W_p 、 W_j 、 n ;式(8)的参数 W_c 、 a 、 d 。根据土壤特性及实测的土壤水分动态变化过程来率定以上参数,进而可以进行不同灌溉制度下土壤水分的动态模拟,得到相应的田间蒸散发过程。蒸散发计算中采用时段初的土壤含水率计算水分胁迫系数,这种方法在以日为步长的蒸散发计算中误差很小,可以忽略不计^[15]。

1.3 作物水分生产函数

作物水分生产函数反映了农田水分消耗与产量之间的关系,在灌溉制度优化中常采用Jensen模型^[16]进行描述,即

$$y = \frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{E_{m,i}} \right)^{\lambda_i} \tag{9}$$

式中 y ——作物相对产量
 n ——作物生育阶段数
 E_i 、 $E_{m,i}$ ——第 i 阶段实际蒸散发和充分供水条件下的最大蒸散发,mm
 λ_i ——第 i 阶段的水分敏感指数

为适应灌溉制度优化中划分时段较短的特点,需要根据作物生育阶段水分敏感指数估算不同灌溉时段的水分敏感指数,一般采用水分敏感指数累积函数进行插值或拟合得到。水分敏感指数累积函数 $Z(t)$ 是指各阶段水分敏感指数的累积值^[17],即

$$Z(t) = \sum_{\tau=0}^t \lambda(\tau) \tag{10}$$

利用适当的方法对水分敏感指数累积函数 $Z(t)$ 进行插值,可以将生育阶段水分敏感指数降尺度到需要的灌溉阶段^[18];也可以采用一定的经验公式来拟合水分敏感指数累积函数^[19],进而得到灌溉阶段的水分敏感指数。作物水分敏感指数一般具有

生育期始、末较小而中间较大的特点,可以用 Logistic 曲线来描述 $Z(t)$ 的动态变化^[19],即

$$Z(t) = C / (1 + \exp(A - Bt)) \tag{11}$$

式中 A 、 B 、 C ——拟合系数

得到累积函数 $Z(t)$ 后,任意时段 $[t_{i-1}, t_i]$ 的水分敏感指数计算公式为^[17-18]

$$\lambda_i = Z(t_i) - Z(t_{i-1}) \tag{12}$$

1.4 模型求解方法

以上灌溉制度优化模型采用 Microsoft Excel 的规划求解工具求解。规划求解工具是 Excel 内置的优化模型求解工具,可以求解线性规划、整数规划(包括 0-1 规划)、非线性规划等优化模型^[20]。模型中的农田蒸散发计算及土壤水分平衡模拟、作物产量计算、优化模型求解均在 Excel 中实现,因此便于在实际中操作应用。主要求解步骤(图 1)包括:

- (1) 设定一定的灌溉制度(灌水次数及灌水日期、灌水定额),利用农田蒸散发计算及土壤水分平衡模拟模型进行农田水分平衡模拟,得到逐日的蒸散发量。
- (2) 根据作物水分敏感指数累积函数计算逐日的水分敏感指数,结合逐日蒸散发量利用水分生产函数计算设定灌溉制度下的相对产量。
- (3) 利用 Excel 规划求解工具,求解灌溉制度优化的 0-1 规划模型得到最优灌水日期,其中需要多次重复步骤(1)、(2)中有关蒸散发及产量计算。

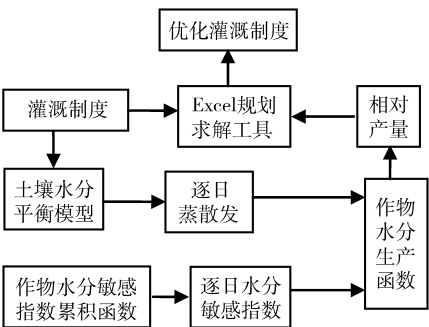


图 1 作物优化灌溉制度 Excel 规划求解过程图
Fig.1 Processes to determine the optimal irrigation scheduling using the Excel solver

具体求解过程将结合应用实例进行说明。

2 模型应用

2.1 基本资料

为便于与其他模型结果进行比较,采用文献[9]中山西省潇河试验站 2003 年冬小麦返青后的有关试验资料进行不同灌溉定额下的优化灌溉制度分析。该试验站位于山西省晋中市潇河灌区(地理坐标:112°40'E,37°38'N,海拔高度 782.6 m),试验区土壤为中壤土,干容重 1.435 g/cm³,田间持水

率、饱和含水率分别为 39.6%、48.0%。年均降水量约 450 mm,其中冬小麦生长期(10 月初至次年 6 月底)降水量约 150 mm,仅为当地冬小麦需水量(约为 512 mm^[14])的 29%,远不能满足小麦生长对水分的需求。冬小麦生长对土壤底墒(取决于播种前汛期降水量及农田灌溉水量)、灌溉的依赖性很大,因此在以下研究中主要考虑不同初始土壤含水率情况下的灌溉制度优化问题,而降水量采用接近多年平均状况的 2003 年冬小麦生长期实际降水量。

由于冬小麦返青后水分胁迫对产量的影响较大,因此只考虑返青初期不同土壤含水率条件下的灌溉制度优化。2003 年冬小麦返青后生长期 110 d,分为 4 个生育阶段,包括返青期(3 月 6 日—4 月 4 日)、拔节期(4 月 5 日—5 月 10 日)、抽穗期(5 月 11 日—5 月 31 日)、灌浆期(6 月 1 日—6 月 23 日)。

期间降水总量为 111 mm,接近多年平均水平;根据 Penman - Monteith 公式^[11]计算得到的参考作物蒸散发为 430 mm。根据田间实测土壤贮水量变化过程进行模型参数率定,结果为^[9]:式(5)中的参数为 $K_{cm} = 1.28$, $t_m = 72$ d, $c = 50$ d;式(6)中的参数为 $W_p = 158$ mm, $W_j = 248$ mm, $n = 1$;式(8)中的参数为 $W_f = 396$ mm, $W_c = 255$ mm, $a = 0.03$, $d = 1$;式(11)水分敏感指数累积函数的参数为 $A = 4.82$, $B = 0.0778$, $C = 1.026$ 。根据作物系数和逐日参考作物蒸散发计算出返青以后冬小麦总需水量为 410 mm,日均需水量 3.7 mm/d;其中 5 月需水量最大,日均需水量 5.8 mm/d。根据水分敏感指数累积函数拟合结果计算逐日的水分敏感指数,结果表明拔节期和抽穗期水分敏感指数较大,其中拔节末期的 5 月上旬水分敏感指数最大。

2.2 模型求解过程及结果

在灌溉制度优化中,以 10 d 作为一个灌溉周期,每月的 5、15、25 日作为可能的灌水日期,这样冬小麦返青后的 110 d 生长期内可能的灌水日期共有 10 个。考虑到当地地面灌溉的实际情况,灌水定额设定为 600 m³/hm²,因此优化变量为可能的灌水日期内是否灌溉。

模型求解过程利用 Excel 的有关功能实现,表 1 为表格中的一部分,在表中第 1 行 A、B、…、N 表示 Excel 表格的列号,而第 1 列 1、2、…、112 表示行号,表中各列的含义及计算方法说明见表 2。

在调用 Excel 规划求解工具求解优化灌溉制度中(图 2),主要步骤包括:

- (1) 将作物最终相对产量(表 1 中的 N112 单元格)设为目标单元格。

表 1 用于求解作物最优灌溉制度的 Excel 表格(部分)

Tab. 1 Excel sheet used for the optimization of deficit irrigation (Part)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	D	t	E_0	K_c	P	x_i	E_m	$Z(t)$	$\lambda(t)$	W	K_s	E	Q	y
2		0			2	2		0.008 2						1.000
3	3-6	1	1.35	0.17	0		0.23	0.008 9	0.000 7	317.0	1.00	0.23	1.49	1.000
⋮														
12	3-15	10	0.92	0.28	3.2	0	0.25	0.017 7	0.001 3	304.4	1.00	0.25	1.14	1.000
⋮														
104	6-15	102	4.87	0.89	0	0	4.35	0.982 4	0.003 4	197.8	0.44	1.92	-0.86	0.882
⋮														
112	6-23	110	5.68	0.72	0		4.08	1.002 1	0.001 9	208.6	0.56	2.29	-0.73	0.867

表 2 表 1 中部分变量的说明

Tab. 2 Explanation of the variables in Tab. 1

列号	符号	单位	说明
A	D	月-日	冬小麦从返青(3月6日)至成熟(6月23日)日期
B	t	d	自返青开始的天数(3月6日 $t=1$)
E	P	mm	实测日降水量(第3行起),E2单元格为设定的灌水次数(表1中以2次灌水为例)
F	x_i		表示第 <i>i</i> 阶段是否进行灌溉的0-1变量($x_i=1$ 表示该阶段进行灌溉),只考虑在每月5、15、25日可能进行灌溉;F2单元格为所有0-1变量的和
J	W	mm	土壤根层贮水量,J3为其初值,以下的值根据式(8)递推得到
N	y		作物相对产量,根据式(10)计算



图 2 作物优化灌溉制度 Excel 规划求解示意图

Fig. 2 Sketch of the Excel solver to determine the optimal irrigation scheduling

(2) 将表示在可能的灌水日期是否进行灌溉的0-1变量(表1中的F12、F22、F33、F43、F53、F63、F73、F83、F94、F104单元格)设为可变单元格(决策变量)。

(3) 设置约束条件,包括灌水次数约束(表1中所有0-1变量的和应该等于设定的灌水次数,即F2与E2单元格数值相等)和0-1约束(所有的可变单元格均为0-1变量)。

(4) 点击“求解(S)”即可对模型进行求解。

利用 Excel 规划求解工具求解得到返青初期不同贮水量、不同灌溉定额下的最优灌水日期及最大相对产量(表3),其中返青初期不同贮水量分别代表初始水分充足(317 mm)、中等(248 mm)和不足(200 mm)等3种情景;灌水次数从1逐步增加,直至相对产量达到或超过0.95。

2.3 结果分析

文献[9]中利用相同的资料和模拟-优化模型

得到了不同情景下的优化灌溉制度。将表3中的结果与文献[9]中的结果相比较,可以发现二者基本一致。在最优灌水日期方面,2个模型的差值多数(91%)小于等于5 d,这与本文模型以10 d为灌水周期相对应。在最大相对产量方面,本文中的结果略低于文献[9]中的结果,但最大差别为2.6%。由于本文中模型求解过程更加方便,不需要编程,可直接在 Excel 中实现,同时求解结果对初值的依赖性较小,实用性明显优于模拟-优化模型。

不同灌溉定额(或灌水次数)时最优灌水日期、作物相对产量与土壤初始贮水量有一定关系,不同灌溉定额时的最优灌水日期及增产效果表现为:

(1) 当灌溉定额为60 mm(灌水1次)时,不同土壤初始贮水量下的最优灌水日期均在5月上旬,与水分敏感指数最大的时间一致,相对于不灌水情况增产比例为25%(初始水分充分)~29%(初始水分不足)。

(2) 当灌溉定额为120 mm(灌水2次)时,不同土壤初始贮水量下的最优灌水日期均在4月下旬至5月中旬,这段时间内土壤水分敏感指数均较大,初始土壤水分不足时灌水时间相对较早,相对于不灌水情况增产比例为42%~52%。

(3) 当灌溉定额为180 mm(灌水3次)时,不同土壤初始贮水量下的最优灌水日期均在4月下旬至5月下旬,初始土壤水分不足时灌水时间也相对较

表 3 返青初期不同贮水量、不同灌溉定额下的最优灌水日期及相应的作物蒸散发量、最大相对产量

Tab.3 Optimal irrigation date and corresponding evapotranspiration and maximum relative yield at different initial soil water regime and irrigation quota

根系层初始 贮水量/mm	灌水 次数	灌溉 定额/mm	最优灌水日期					总蒸散 发量/mm	相对产量	
			1	2	3	4	5		本文	文献[9]
317	0	0						239	0.609	0.609
	1	60	5-5					285	0.761	0.763
	2	120	4-25	5-15				327	0.867	0.877
	3	180	4-25	5-5	5-25			363	0.939	0.952
	4	240	4-25	5-5	5-15	5-25		392	0.986	0.990
248	0	0						218	0.552	0.552
	1	60	5-5					265	0.704	0.708
	2	120	5-5	5-15				309	0.804	0.826
	3	180	4-25	5-5	5-15			345	0.906	0.909
	4	240	4-15	5-5	5-15	5-25		378	0.956	0.967
200	0	0						192	0.497	0.497
	1	60	5-5					240	0.640	0.646
	2	120	4-25	5-5				282	0.756	0.757
	3	180	4-25	5-5	5-15			323	0.840	0.855
	4	240	3-25	4-25	5-5	5-25		354	0.915	0.928
	5	300	3-15	4-25	5-5	5-15	5-25	385	0.968	0.966

早,相对于不灌水情况增产比例为 54%~69%。

(4) 当灌溉定额为 240 mm(灌水 4 次)时,不同土壤初始贮水量下的最优灌水日期均在 3 月下旬至 5 月下旬,初始土壤水分不足时灌水时间也相对较早,相对于不灌水情况增产比例为 62%~84%。此时初始水分充足或中等情景下相对产量均达到 0.95;而初始水分不足时相对产量只有 0.915,再增加一次灌水(第 1 次灌水时间提前到 3 月中旬)可使相对产量达到 0.968,相对于不灌水情况增产比例达到 94.8%。总体来说,有限的灌溉水量应首先保证水分亏缺影响较大(水分敏感指数较大)的阶段,对本研究区,须首先保证拔节末期(5 月上旬)的灌溉用水,然后是其前后拔节期、抽穗期的灌溉用水。初始土壤含水率越低,适宜的灌水时间越提前,同时灌溉的增产效果也越明显。

在最优灌溉制度下,随着可供水量(W_0+I)的增加,冬小麦蒸散发量 E 也随之增加(图 3),二者之

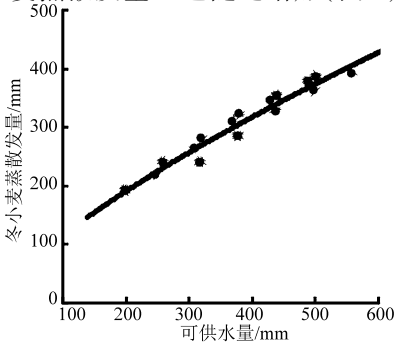


图 3 冬小麦蒸散发量与可供水量的关系
Fig.3 Relationship between evapotranspiration of winter wheat and available water

间呈现幂函数关系,即 $E=3.8304(W_0+I)^{0.7375}$, $R^2=0.9545$ 。

冬小麦相对产量 y 与相对蒸散发 r (即实际蒸散发和最大蒸散发的比值)之间呈二次多项式关系(图 4),在非充分灌溉条件下冬小麦产量随蒸散发(或可供水量)的增加而增加,但边际效益递减。

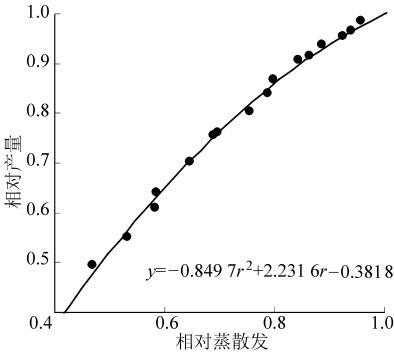


图 4 冬小麦相对产量与相对蒸散发的关系
Fig.4 Relationship between relative yield and evapotranspiration of winter wheat

3 结束语

在农田土壤水分平衡模型与作物水分生产函数模型的基础上,引入 0-1 变量描述在可能的灌溉日期内是否进行灌溉,建立了作物非充分灌溉制度优化的 0-1 规划模型,并利用 Microsoft Excel 的规划求解工具进行求解。将该模型应用于山西潇河灌区冬小麦灌溉制度优化,结果表明模型求解结果较为合理,并且模型求解不需要编程,可直接在 Excel 中实现,求解结果对初值的依赖性较小,因此模型具有

较强的实用性。

山西省潇河灌区冬小麦灌溉制度优化结果表明,为提高灌溉水利用效率,首先要保证拔节末期(5月上旬)的灌溉用水,其次是其前后拔节期、抽穗

期的灌溉用水。初始土壤含水率越低,适宜的灌水时间越提前,同时灌溉的增产效果也越明显。随着可供水量的增加,冬小麦蒸散发量及相对产量均逐渐增加,但灌水的边际效益却逐渐降低。

参 考 文 献

- 1 Rao N H, Sarma P B S, Chander S. Irrigation scheduling under a limited water supply[J]. *Agricultural Water Management*, 1988, 15(2): 165 – 175.
- 2 Naadimuthu G, Raju K S, Lee E S. A heuristic dynamic optimization algorithm for irrigation scheduling[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 1999, 30(7 – 8): 169 – 183.
- 3 Ghahraman B, Sepaskhah A R. Use of a water deficit sensitivity index for partial irrigation scheduling of wheat and barley[J]. *Irrigation Science*, 1997, 18(1): 11 – 16.
- 4 Domínguez A, de Juan J A, Tarjuelo J M, et al. Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110: 67 – 77.
- 5 郑建华,黄冠华,黄权中,等. 干旱区膜下滴灌条件下洋葱水分生产函数与优化灌溉制度[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 25 – 30.
Zheng Jianhua, Huang Guanhua, Huang Quanzhong, et al. Water production function and optimal irrigation schedules for onion with drip irrigation and mulch of plastic film in arid region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 25 – 30. (in Chinese)
- 6 Brown P D, Cochrane T A, Krom T D. Optimal on-farm irrigation scheduling with a seasonal water limit using simulated annealing[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(6): 892 – 900.
- 7 吴鑫森,王晶,郅志红. 基于多年降雨资料的作物灌溉制度多目标优化[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4): 108 – 112.
Wu Xinmiao, Wang Jing, Qie Zhihong. Multi-objective optimization of crop irrigation schedule based on years of rainfall data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 108 – 112. (in Chinese)
- 8 付强,王立坤,门宝辉,等. 推求水稻非充分灌溉下优化灌溉制度的新方法——基于实码加速遗传算法的多维动态规划法[J]. *水利学报*, 2003, 34(1): 123 – 128.
Fu Qiang, Wang Likun, Men Baohui, et al. A new method of optimizing irrigation system under non-sufficient irrigation-multidimensional dynamic planning based on RAGA[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(1): 123 – 128. (in Chinese)
- 9 Shang Songhao, Mao Xiaomin. Application of a simulation based optimization model for winter wheat irrigation scheduling in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 314 – 322.
- 10 Botes J H F, Bosch D J, Oosthuizen L K. A simulation and optimization approach for evaluating irrigation information[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 51(2): 165 – 183.
- 11 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO, 1998: 1 – 28.
- 12 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998: 204 – 205.
- 13 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及应用[M]. 北京:水利电力出版社, 1994: 131 – 133.
- 14 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: 66 – 85.
- 15 Shang S. Calculating actual crop evapotranspiration under soil water stress conditions with appropriate numerical methods and time step[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(22): 3338 – 3343.
- 16 Jensen M E. Water consumption by agricultural plants[C] // Kozlowski T T. Water deficit and plant growth, volume II: plant water consumption and response. New York: Academic Press, 1968: 1 – 22.
- 17 Tsakiris G P. A method for applying crop sensitivity factors in irrigation scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 1982, 5(4): 335 – 343.
- 18 Shang S. Downscaling crop water sensitivity index of growing stages using monotone piecewise cubic interpolation [J]. *Pedosphere*, 2013, 23(5): 662 – 667.
- 19 王仰仁,雷志栋,杨诗秀. 冬小麦水分敏感指数累积函数研究[J]. *水利学报*, 1997, 28(5): 28 – 35.
Wang Yangren, Lei Zhidong, Yang Shixiu. Cumulative function of sensitive index for winter wheat[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 28(5): 28 – 35. (in Chinese)
- 20 Winston W L. Microsoft excel data analysis and business modeling[M]. Redmond: Microsoft Press, 2004: 191 – 208.
- 21 王峰,孙景生,刘祖贵,等. 不同灌溉制度对棉田盐分分布与脱盐效果的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(12): 120 – 127.
Wang Feng, Sun Jingsheng, Liu Zugui, et al. Effect of different irrigation scheduling on salt distribution and leaching in cotton field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12): 120 – 127. (in Chinese)

Effects of Different Pretreated Straw on Soil Water Content and Water Consumption Characteristics of Winter Wheat

Yu Kun¹ Feng Hao^{1,2} Li Zhengpeng¹ Wang Zengli³

(1. Chinese National Academy of Water-saving agriculture in arid region, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China
2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shannxi 712100, China
3. Wuwei Integrated Service Centre on Water Conservancy Technologies of China, Wuwei 733099, China)

Abstract: Two-year (2011—2013) field experiment was carried out to investigate the effects of straw pretreatment (comminuted or ammoniated) on soil moisture dynamics (0 ~ 100 cm depth) in the whole growth period of winter wheat, crop water consumption, water use efficiency (W_{UE}) and precipitation use efficiency (P_{UE}). The results showed that the changes in soil water storage (0 ~ 100 cm depth) under all experimental treatments were similar in the whole winter wheat growing period in 2 -consecutive-year. The ammoniated straw application increased soil water storage (0 ~ 100 cm depth) by 4.95% and 1.82% at the maturity stage significantly in two years respectively more than conventional straw mulching, and by 4.24% and 1.75% more than unammoniated straw application. In terms of crop water consumption, conventional straw mulching, compared with conventional straw incorporation, effectively reduced the total water consumption in the growing periods of winter wheat. In addition, the comminuted-ammoniated straw application, compared with unammoniated straw application, also observably reduced the total water consumption at the late growth stage of winter wheat, which promoted the use of irrigation and precipitation by winter wheat. Pretreatment (comminuted-ammoniated) straw application, compared with conventional straw mulching, significantly increased the grain yield of winter wheat by 9.07% and 11.42% in 2 years respectively, which improved winter wheat W_{UE} and P_{UE} significantly as well.

Key words: Comminuted Ammoniated Straw Soil water storage Winter wheat Water consumption characteristics

(上接第 158 页)

Application of 0 – 1 Programming Model on Optimization of Crop Deficit Irrigation Schedule

Mao Xiaomin¹ Shang Songhao²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A 0 – 1 programming model was proposed to optimize the deficit irrigation schedule. It is based on the concept of field water balance and the crop water production function, and introduces a 0 – 1 variable to describe the irrigation decision in possible irrigation periods. Microsoft Excel solver is applied for finding the solution. This model was applied in the irrigation schedule optimization of winter wheat in Xiaohe irrigation district in Shanxi Province. The result compares well with a previous developed simulation based optimization model, while the present model is much simpler in the solving procedure. Results demonstrate that the key period for winter wheat irrigation is the later jointing stage in early May. If the initial soil water content is low, the suitable irrigation time should be earlier in order to achieve higher crop yield. The evapotranspiration and relative crop yield increase with the irrigation volume, while the marginal yield decreases with the irrigation volume.

Key words: Deficit irrigation 0 – 1 programming Farmland water balance Crop water production function