

# 基于 CROPWAT 模型的非充分灌溉研究

孙世坤,蔡焕杰,王 健

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为验证 FAO 的 CROPWAT 模型在非充分灌溉中的适用性和精确性,将民勤棉花和春小麦非充分灌溉的试验方案及当地气象资料输入模型,分析 CROPWAT 模型在模拟作物蒸发蒸腾量和非充分灌溉对产量影响的模拟效果。结果显示,棉花各生育期日平均蒸发蒸腾量的模拟值和实测值表现出相同的分布规律,但模拟值整体高于实测值 0.15~1 mm;模拟非充分灌溉对棉花和春小麦产量的影响时,模拟值和实测值显示出一致的变化规律,将结果进行统计分析,棉花和春小麦的 RMSE、EF、CRM 分别为 20.62% 和 10.35%、0.98 和 0.856、-0.00051 和 -0.0155,说明 CROPWAT 模型总体模拟效果较好,但模型的执行值较实测值偏高。模拟结果表明,模型在非充分灌溉的研究中有着较好的适用性,但为了使模拟结果更准确,使用前需根据当地实测资料对  $K_c$ 、 $K_p$  等参数进行校正。

**关键词:**非充分灌溉;CROPWAT 模型;模拟

**中图分类号:**S275.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7601(2010)01-0027-07

随着各行业的快速发展,水资源消耗量成倍增长,淡水资源短缺已经成为各国必须面临的问题。作为贫水国的中国,水资源紧缺的问题更加严重。为了实现可持续发展战略和建设节约型社会的要求,各行业必须合理利用有限的水资源。农业作为用水大户,占全国用水总量的 70% 左右<sup>[1]</sup>。因而,发展节水农业对于农业可持续发展有着重要的意义。

非充分灌溉,是作物实际蒸发蒸腾量小于潜在蒸发蒸腾量的灌溉模式。其理论基础是作物自身具有一系列对水分亏缺的适应机制和有限缺水效应(The benefits of limited water deficits),即作物在遭遇水分胁迫时具有自我保护作用,而在水分胁迫解除后,作物对以前在胁迫条件下生长发育所造成的损失具有“补偿作用”<sup>[2]</sup>。但是水分亏缺对作物产量的影响机理复杂,而且随着作物种类、栽培制度、生长阶段的不同而不同。因此,要准确了解各类作物在不同生育阶段、不同非充分灌溉水平下对作物最终产量及其他生理—生化指标的影响需要进行大量的田间试验,这不但增加了试验工作量,也增大了试验结果分析的难度。将模型引入非充分灌溉试验,不但能够减少田间工作量,同时能够验证试验结果并且可以模拟田间试验,进而优化试验方案、扩展试验结果。

目前已经有至少 100 种不同的模拟模型,这些模型中应用较为广泛且具有代表性的作物模型有农业科技转换决策支持系统(DSSAT)、Wageningen 模型、农业产量系统模拟(APSIM)等<sup>[3]</sup>。而对 CROP-

WAT 模型的研究较少,其中 M. Smith<sup>[4]</sup>在 2002 年利用土耳其、摩洛哥以及巴基斯坦分别在棉花、甜菜及马铃薯上进行的非充分灌溉试验,验证 CROPWAT 模型在非充分灌溉研究中的适用性。结果显示,CROPWAT 模型能较好反应水分亏缺对作物产量的影响,并且能够改进试验设计,系统分析试验结果。

本文将 FAO 的 CROPWAT 模型引入非充分灌溉的研究,利用民勤棉花和春小麦的非充分灌溉试验数据来验证 CROPWAT 模型在非充分灌溉中的适用性和精确性。

## 1 模型介绍

CROPWAT 是联合国粮农组织(FAO)在 1991 年开发的模型,它能帮助农业气象学家、农艺学家、灌溉工程人员对蒸发蒸腾量和灌溉需水量进行标准的计算,此外,CROPWAT 模型能够建议如何改进灌溉方法、规划不同供水条件下的灌溉日程、评价雨养条件或非充分灌溉条件下对作物产量的影响<sup>[5,6]</sup>。CROPWAT 的基本功能包括计算:(1)参考作物蒸发蒸腾量;(2)作物蒸发蒸腾量;(3)作物灌溉需水量;(4)制定灌溉制度;(5)评价雨养或非充分灌溉条件下的作物产量。

目前,CROPWAT 已经开发出许多版本,如 CROPWAT version 5.7, CROPWAT version 7.0, CROPWAT for WINDOWS 等。

CROPWAT 模型用于灌溉水管理的流程,见图 1<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2009-06-01

基金项目:国家“863”计划重点项目(2006AA100202);国家科技支撑计划(2007BAD88B10)

作者简介:孙世坤(1984—),男,山东济宁人,在读硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: feissk@163.com。

通讯作者:蔡焕杰(1962—),男,河北藁城人,教授,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn。

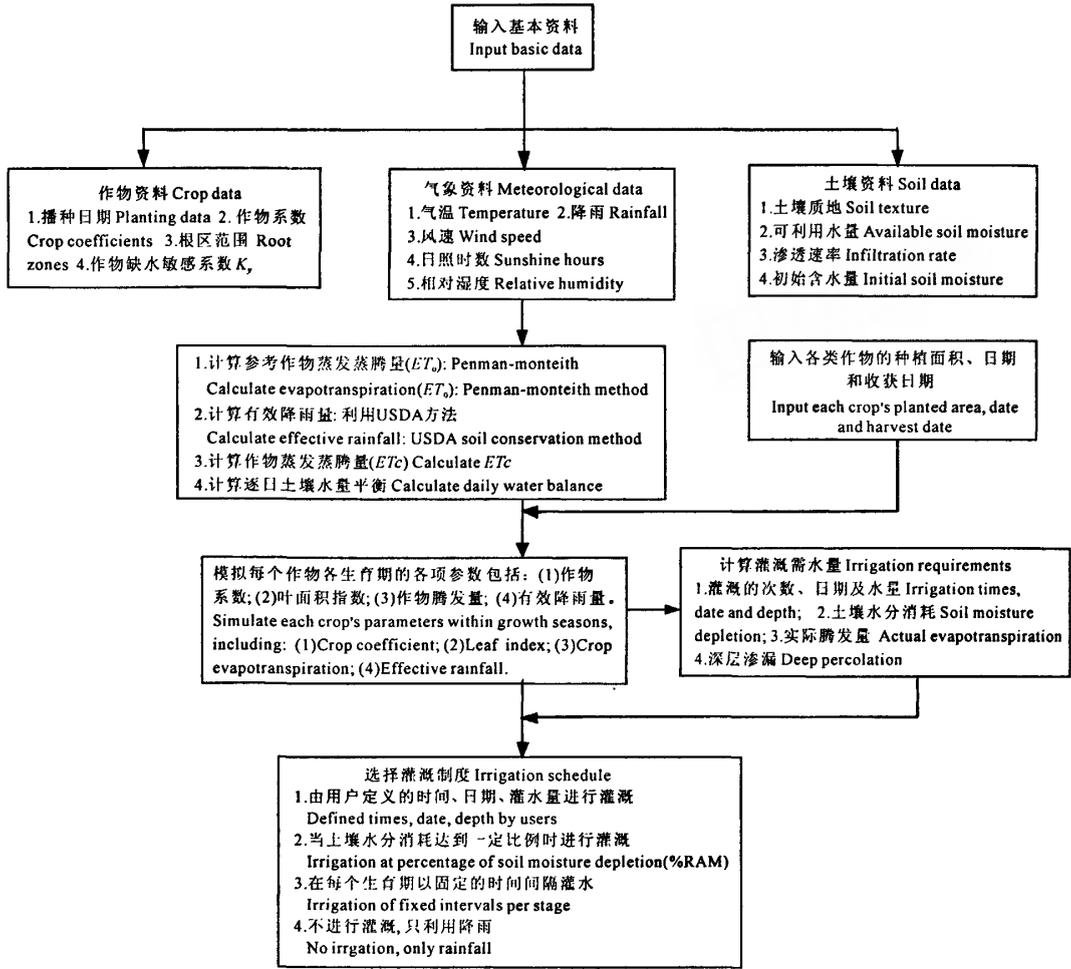


图 1 CROPWAT 模型灌溉管理流程图

Fig. 1 Flow chart of the CROPWAT crop water management model

2 模型的验证

非充分灌溉试验数据为基础,验证 CROPWAT 模型用于非充分灌溉的可行性。棉花、春小麦作物生育期气象参数见表 1。

本文以 1991 年甘肃民勤进行的棉花和春小麦

表 1 作物生育期气象参数

Table 1 The meteorological parameters during the crop growth period

气象参数 Meteorological parameter	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October
平均最低气温(℃) Min. temperature	-3.4	2.5	9.5	13.6	16.6	15.2	16.4	8.0
平均最高气温(℃) Max. temperature	11.4	17.4	25.0	29.5	31.5	30.2	24.6	15.6
相对湿度 Humidity(%)	40.0	45.5	45.9	51.5	54.8	49.0	44.0	47.0
风速 Wind speed(m/s)	3.1	3.1	3.6	3.5	2.4	2.9	2.2	2.6
日照时数 Sunshine(h)	7.8	9.4	9.12	9.5	10.89	10.8	9.5	7.1
月降雨量 Rainfall(mm)	5.1	17.5	12.9	3.8	11.4	7.9	3.3	13.0
日总辐射(MJ/(m <sup>2</sup> ·d)) Solar rad.	14.3	16.5	17.9	19.1	20.1	18.9	15.3	10.4

2.1 棉花蒸发蒸腾量及非充分灌溉对产量影响的模拟

2.1.1 棉花蒸发蒸腾量的模拟 棉花于 4 月 20 日播种,10 月 20 日收获,生育期约为 180 d。从实测值来看,棉花需水高峰期出现在 6 月下旬至 7 月中旬,日蒸发蒸腾量峰值为 4.8 mm 左右。

CROPWAT 模型计算作物蒸发蒸腾量的程序为:首先利用 Penman - Monteith 公式,结合当地的气象数据计算参考作物蒸发蒸腾量,然后通过棉花各个生育阶段的作物系数得到棉花的实际蒸发蒸腾量<sup>[8]</sup>。

(1) 利用 Penman - Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量<sup>[9]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times 900 / (T_a + 273) \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中,  $ET_0$  为参考作物蒸发蒸腾量(mm/d);  $\Delta$  为饱和水汽压与温度曲线的斜率(kPa/°C);  $R_n$  为参考作物冠层表面净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $G$  为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $\gamma$  为干湿表常数(kPa/°C);  $T_a$  为 2 m 高处的日平均气温(°C);  $u_2$  为 2 m 高处的风速(m/s);  $e_s$  为饱和水汽压差(kPa);  $e_a$  为实际水汽压(kPa)。

CROPWAT 模拟的棉花生育期参考作物日蒸发蒸腾量见图 2。从图中我们可以看到民勤地区在 4 月中旬的参考作物日平均蒸发蒸腾量为 3 mm/d 左右,之后随着当地气温、日照时数、太阳辐射的增加,参考作物日蒸发蒸腾量在 6 月中旬至 7 月上旬达到顶峰,约为 5.2 ~ 5.5 mm/d 之间。随后,由于气温、日照时数、太阳辐射的降低,参照作物日蒸发蒸腾量开始逐渐减少,其变化规律呈单峰曲线。

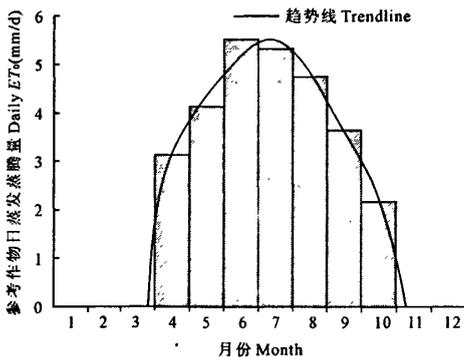


图 2 棉花生育期参考作物蒸发蒸腾量

Fig.2 Reference evapotranspiration during cotton growth period

(2) 根据棉花不同阶段的作物系数可得到棉花的实际蒸发蒸腾量<sup>[4]</sup>:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中,  $ET_c$  为作物蒸发蒸腾量(mm/d);  $K_c$  为作物系数。

根据 CROPWAT 模型的作物属性数据库,棉花生育期初期、中期、末期  $K_c$  分别取为 0.35、1.15、0.65。利用公式(2)可以得到棉花日蒸发蒸腾量(见图 3)。

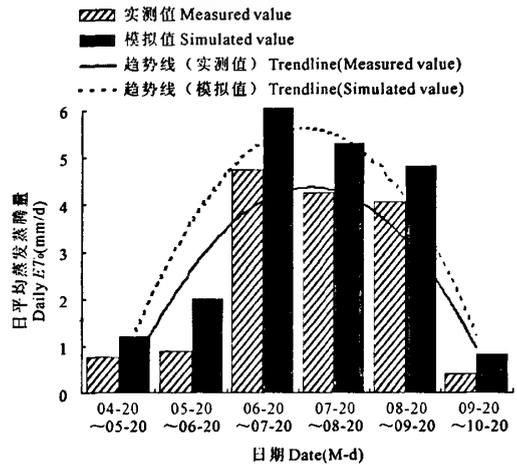


图 3 棉花生育期日平均蒸发蒸腾量

Fig.3 Daily mean evapotranspiration of cotton

从图 3 中可以看出棉花生育初期日蒸发蒸腾量实测值为 0.8 mm/d 左右,随着作物生长,日蒸发蒸腾量逐步增加,在 6 月下旬至 7 月中旬达到峰值 4.8 mm/d 左右,随后逐渐降低,到棉花生育末期降到 0.4 ~ 0.5 mm/d。总体上,棉花生育期日平均蒸发蒸腾量模拟值表现出与实测值相同的变化趋势,但从整个生育期来看,模拟值比实测值大 0.15 ~ 1 mm/d,其中在生育初期,模拟值比实测值大 0.3 ~ 0.4 mm/d 左右,在生育中期模拟值比实测值大 0.6 ~ 1 mm/d 左右,在棉花生育末期模拟值比实测值大 0.3 ~ 0.4 mm/d 左右。这种结果可能是由于在 CROPWAT 模型中,棉花作物系数  $K_c$  取值相对偏大造成的。因而,在使用 CROPWAT 计算作物日蒸发蒸腾量前,需根据当地多年实测数据校核作物系数,这样才能使模拟结果更加接近实际。

2.1.2 非充分灌溉对棉花产量的影响模拟 民勤棉花非充分灌溉试验共设 4 个水分处理<sup>[10]</sup>,各处理灌溉制度及产量见表 2。

表 2 棉花试验方案及产量

Table 2 The experiment scheme and yield of cotton

处理 Treatments	灌水定额 Irrigating water quota(mm)			灌溉定额(mm) Irrigation quota	皮棉产量(kg/hm <sup>2</sup> ) Lint yield
	现蕾 Budding	花铃开始 Early blossoming and boll-forming stage	花铃中期 Middle blossoming and boll-forming stage		
1	—	90	—	90	1222.5
2	75	90	—	165	1534.5
3	75	—	90	165	1297.5
CK	75	90	75	240	1639.5

CROPWAT 模型利用 FAO 研究的作物产量对水分响应的结论<sup>[11]</sup>, 见公式(3)。根据缺水敏感系数、实际蒸发蒸腾量、充分供水时作物潜在蒸发蒸腾量和产量得到非充分灌溉对作物产量的影响。

$$1 - \frac{Y_a}{Y_{max}} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (3)$$

式中,  $Y_a$  为出现水分亏缺时所取得的实际产量(kg/hm<sup>2</sup>);  $Y_{max}$  为生育期充分供水时作物所取得的产量(kg/hm<sup>2</sup>);  $K_y$  为缺水敏感系数;  $ET_a$  为生育期出现水分亏缺时的实际耗水量(mm);  $ET_m$  为生育期充分供水的最大耗水量(mm)。

根据 CROPWAT 模型的作物属性数据库, 棉花生育期 4 个阶段的缺水敏感系数分别为:  $K_{y1} = 0.40$ ;  $K_{y2} = 0.40$ ;  $K_{y3} = 0.50$ ;  $K_{y4} = 0.40$ 。

根据上述棉花生育期各阶段缺水敏感系数, 利用公式(3)可以得到不同灌溉制度下棉花产量的模拟值, 见表 3。

表 3 非充分灌溉对棉花产量影响的模拟

Table 3 Simulation of the influence of deficit irrigation on cotton yield

处理 Treatments	实测值 Measured value		模拟值 Simulated value	
	产量 Lint yield (kg/hm <sup>2</sup> )	减产 Yield reduction (%)	产量 Lint yield (kg/hm <sup>2</sup> )	减产 Yield reduction (%)
	1	1222.5	25.4	1205.5
2	1534.5	6.4	1519.8	8.3
3	1297.5	20.8	1332.1	18.7
CK	1639.5	0.0	1639.5	0.0

由表 3 可以看出, 在模拟非充分灌溉对产量的影响方面, CROPWAT 模拟值和实测值有着较好的一致性。各处理模拟值和实测值较为接近, 其中, 处理 1、2 的模拟值比实测值减产偏大, 处理 3 的模拟值比实测值减产偏小, 这可能是由于 CROPWAT 模型中花铃中期缺水敏感系数  $K_y$  取值偏大, 花铃开始

期  $K_y$  取值偏小造成的。因为本文中缺水敏感系数是根据 CROPWAT 模型的作物属性数据库所得, 而不是当地实测数据。因而, 为了使模型更好地在当地应用, 需根据多年棉花产量、耗水量等数据进行校正。

## 2.2 土壤水分状况及非充分灌溉下对春小麦产量影响的模拟

### 2.2.1 土壤水分状况的模拟

CROPWAT 模型可以根据逐日水量平衡模拟出不同灌溉制度下土壤水分的变化。其原理为根据根区范围内的总有效水、灌溉水量、有效降雨、蒸发蒸腾量计算出储存在根系活动层中的水分含量, 从而判断是否需要灌溉、灌溉水是否损失等, 进而为灌溉决策提供依据。

现用 CROPWAT 模拟表 4 所示的春小麦 4 个处理不同灌溉制度下土壤水分变化。首先, 在模型中选择“由用户定义特定的日期、灌水量进行灌溉”选项, 采用自定义灌溉制度, 见图 1。然后, 分别按 4 个处理的灌水时间、灌水量输入模型。随后, CROPWAT 模型将模拟出不同的处理下的土壤水分变化, 见图 4。从图中可以看到, CK 组和处理 3 都出现了灌溉水损失, 说明这两个处理出现了过度灌溉, 这是因为 CK 和处理 3 的一水和二水的灌水时间间隔较短造成的。相对而言, 处理 2 的灌溉制度较为合理, 在不明显降低产量的情况下, 节约了灌溉用水。这一模拟结果和实际的试验结果也相吻合。

由此可见, CROPWAT 模型可以为非充分灌溉在制定灌溉制度方面提供依据, 它能够根据作物生育期内根系长度、蒸发蒸腾量、降雨量、土壤渗透速率等数据动态的计算并预测土壤水分变化规律, 避免出现过度灌溉, 或使作物出现长时间缺水状态, 所以模型对优选灌溉制度方面有较好的参考作用。

### 2.2.2 灌水时间对产量影响的模拟

民勤春小麦非充分灌溉共分为 4 个处理, 各处理灌水时间及产量见表 4<sup>[10]</sup>。

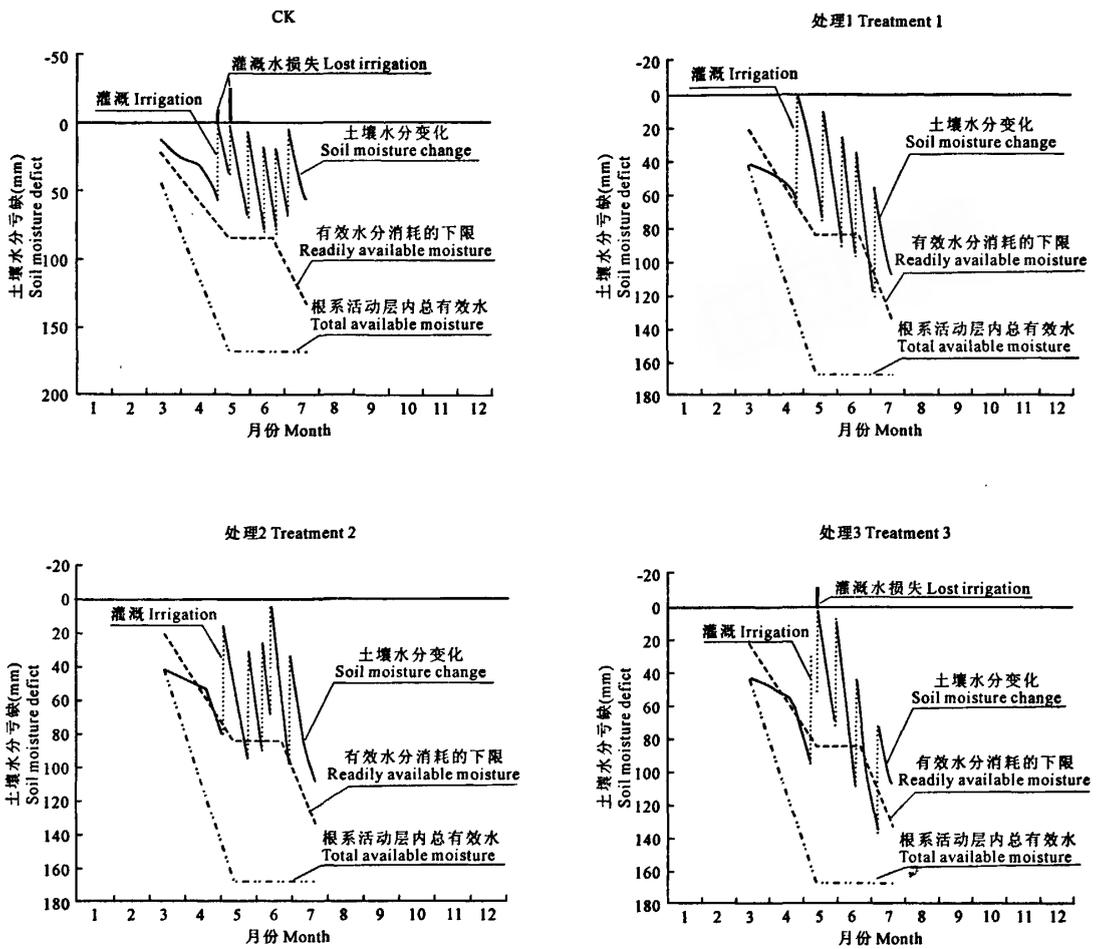


图 4 不同处理下土壤水分变化的模拟

Fig.4 The simulation of soil moisture change under different treatments

表 4 春小麦试验方案及产量

Table 4 The experiment scheme and yield of spring wheat

处理 Treatments	灌水时间 Irrigation time (M - d)						灌溉定额 (mm) Irrigation quota	产量 (kg/hm <sup>2</sup> ) Yield
	一水 1 <sup>st</sup> irrigation	二水 2 <sup>nd</sup> irrigation	三水 3 <sup>rd</sup> irrigation	四水 4 <sup>th</sup> irrigation	五水 5 <sup>th</sup> irrigation	六水 6 <sup>th</sup> irrigation		
1	04 - 28	05 - 21	06 - 07	06 - 20	07 - 06	—	390	8187.9
2	05 - 05	05 - 26	06 - 07	06 - 15	07 - 01	—	390	8733.0
3	05 - 10	05 - 16	06 - 01	06 - 20	07 - 10	—	390	7962.9
CK	05 - 05	05 - 16	06 - 01	06 - 15	06 - 26	07 - 06	450	8988.0

由表 4 可以看出,全生育期灌六次水的 CK 组取得最高的产量,虽然处理 1、2、3 的灌溉定额都为 390 mm,但因为灌水时间的不同而得到不同的产量,结果显示适当推迟灌头水的时间的处理 2 在 3 个处理中产量最高。

现用 CROPWAT 模型模拟这一试验设计。将 4

个处理的灌水时间、灌水量输入 CROPWAT 模型中,从 CROPWAT 模型的作物属性数据库查得,春小麦生育期 4 个阶段的缺水敏感系数分别为:  $K_{y1} = 0.40$ ;  $K_{y2} = 0.60$ ;  $K_{y3} = 0.80$ ;  $K_{y4} = 0.40$ ,利用式(3)可以得到处理 1、2、3 分别和对照相比减产 5.5%、1.5%、9.2%,模拟结果见表 5。

表 5 非充分灌溉对春小麦产量影响的模拟

Table 5 Simulation of the influence of deficit irrigation on wheat yield

处理 Treatments	实测值 Measured value		CROPWAT 模拟值 CROPWAT simulated value	
	产量 Lint yield	减产 Yield reduction	产量 Lint yield	减产 Yield reduction
	(kg/hm <sup>2</sup> )	(%)	(kg/hm <sup>2</sup> )	(%)
1	8187.9	8.9	8493.66	5.5
2	8733.0	1.11	8853.15	1.5
3	7962.9	11.4	8161.05	9.2
CK	8988.0	0.0	8988.0	0.0

表 5 显示, CROPWAT 模型模拟的不同灌溉制度下相对对照组的减产趋势和实测值相关性较高, 处理 2 的实测值和模拟值减产最小, 处理 3 的实测值

和模拟值减产最大。但从表中可以看出, 在相同的灌溉制度下, CROPWAT 模型模拟的产量高于实测值, 这可能是由两个因素造成的。一是 CROPWAT 模型模拟的产量是在一种无病害及其他影响产量的因素存在, 而仅有气候条件和灌水量决定的相对理想状态。二是 CROPWAT 模型中所取得春小麦各阶段的缺水敏感系数偏小。所以, 为了使 CROPWAT 模型取得更好的模拟效果, 需对作物系数、缺水敏感系数进行校正。

为进一步分析 CROPWAT 模型对非充分灌溉下对产量的模拟效果, 将棉花、春小麦实测数据与模拟数据进行均方根误差、模型性能指数、残差聚集系数等统计分析。各参数意义及范围见表 6<sup>[12]</sup>。

表 6 统计参数含义及取值范围

Table 6 Meanings and their ranges of statistical parameters

参数名 Parameters	参数定义 Parameter definition	计算公式 Calculation formula	取值范围 Value range	最佳值 Optimum value	注释 Annotation
RMSE	均方根误差 Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	$\geq 0$	0	RMSE 越小, 表明模拟效果越好。The simulation result is better when the RMSE is smaller.
EF	模型性能指数 EF index	$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	$\leq 1$	1	EF 越接近 1, 表明总体模拟效果越好。The simulation effect is better when the EF is close to 1.
CRM	残差聚集系数 Congregate residual modulus	$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n O_i}$	$\leq 1$	0	CRM < 0, 表明模型模拟值偏高; CRM > 0, 表明模型模拟值偏低。CRM < 0 shows that stimulated value is higher than measured value; while CRM > 0 shows that stimulated value is lower than measured value.

注: 表中  $P_i$  为模拟值;  $O_i$  为实测值;  $\bar{O}$  为实测平均值;  $n$  为数据对的数目。

Note:  $P_i$  means simulated value;  $O_i$  means measured value;  $\bar{O}$  means average measured value and  $n$  means the corresponding number of the data.

表 7 CROPWAT 模型对产量模拟结果精度分析

Table 7 Accuracy analysis of simulated results of yield by CROPWAT model

作物 Crops	实测平均值(kg/hm <sup>2</sup> ) Mean measured value	模拟平均值(kg/hm <sup>2</sup> ) Mean simulated value	RMSE	EF	CRM
棉花 Cotton	1423.5	1424.23	20.62	0.98	-0.00051
小麦 Spring wheat	8467.95	8599.238	10.35	0.86	-0.0155

经计算, CROPWAT 模型模拟棉花、春小麦非充分灌溉对产量的影响 RMSE 分别为 20.62% 和 10.35%, 说明模型模拟效果较好; EF 分别为 0.98 和 0.856, 说明总体模拟效果较好; CRM 为 -0.00051 和 -0.0155, 都为负值, 说明模型的执行值较实测值偏高。

由此可见, CROPWAT 模型在模拟非充分灌溉对作物产量的影响方面有着较好的适用性。

### 3 结论与讨论

CROPWAT 模型根据当地气象资料, 利用 Penman - Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量, 再利用作物不同阶段的作物系数得到作物蒸发蒸腾量, 结果显示, 利用 CROPWAT 模型计算的棉花的日蒸发蒸腾量与实测值的逐日变化规律有着较高的一致性, 但整个生育期的日蒸发蒸腾量较实测值偏大, 这可能是由于棉花的作物系数取值偏高引起的, 这就

要求在使用 CROPWAT 模型前,需用当地实测数据校核作物系数。

通过用 CROPWAT 模拟棉花与春小麦的非充分灌溉试验,我们可以看到 CROPWAT 模型在模拟水分胁迫程度、灌水时间对产量的影响有着较好的适用性。它能够反映出不同的胁迫程度、灌水时间对作物产量的影响,但模拟值和实测值之间存在一定偏差,这就要求在应用该模型前,要根据当地实测数据对作物系数  $K_c$ 、缺水敏感系数  $K_s$  进行校正。此外,CROPWAT 模型还可以通过逐日土壤水量平衡来获得作物根系活动层土壤水分变化,为非充分灌溉在制定灌溉制度方面提供依据,避免出现过度灌溉,或作物出现长时间缺水状态,进而优化非充分灌溉试验设计。

致谢:本文所用数据取自甘肃武威水科所与西北农林科技大学 1991 年的实验数据,在此致以衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 逢焕成.我国节水灌溉技术现状与发展趋势分析[J].中国土壤与肥料,2006,(5):1—6.
- [2] 赵永,蔡焕杰,张朝勇.非充分灌溉研究现状及存在问题[J].中国农村水利水电,2004,(4):1—4.
- [3] 王亚莉,贺立源.作物生长模拟模型研究和应用综述[J].华中农业大学学报,2005,(5):107—113.
- [4] Smith M, Kivumbi D, Heng L K. Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies[J]. Deficit Irrigation Practices, 22:17—27.
- [5] 宋春雨,韩晓增,于莉,等.CROPWAT 模型在调亏灌溉研究中的应用[J].农业系统科学与综合研究,2003,(3):214—217.
- [6] Dr Derek Clarke. CROPWAT for Windows: User Guide [M]. Southampton: University of Southampton Press, 1998:2—6.
- [7] Ernest L Molua, Cornelius M Lambi. Assessing the Impact of Climate on Crop Water Use and Crop Water Productivity[D]. Buca: University of Buca, 2006:43—44.
- [8] Kang Shuijiang, Payne William A. Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity[J]. Agri-cultural Water Management, 2009, 96(1):167—178.
- [9] Feng Zhiming, Liu Dengwei, Zhang Yuehong. Water Requirements and Irrigation Scheduling of Spring Maize Using GIS and CROPWAT Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Chinese Geographical Science, 2007, 17(1):56—63.
- [10] 蔡焕杰,康绍忠.作物非充分灌溉的适宜时间与非充分程度的研究[J].农业工程学报,2000,16(3):24—27.
- [11] Doorenbos J, Kassam A. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33 [M]. Rome: FAO, 1979:46—49.
- [12] 王宗明,张柏,宋开山,等.CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J].农业工程学报,2005,21(5):47—50.

## Study on deficit irrigation based on CROPWAT model

SUN Shi-kun, CAI Huan-jie, WANG Jian

(Key Laboratory of Agricultural Soil & Water Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to verify the applicability and accuracy of FAO CROPWAT model in deficit irrigation study, both the deficit irrigation experimental scheme of cotton and spring wheat and the local meteorological data were input into the model. Then, analysis was made of the simulation effect of the application of CROPWAT model study in crop evapotranspiration and the impact of deficit irrigation on crop yield. The results showed that the simulated values and measured values of cotton's daily evapotranspiration showed the same distribution regulation, but the simulated values were 0.15 ~ 1 mm higher than the measured ones as a whole; the simulation of the impact of deficit irrigation on cotton and spring wheat yield indicated that the simulated values and measured values showed the same tendency, and the statistical analysis of the results showed that the RMSE, EF and CRM of cotton and spring wheat were 20.62% and 10.35%; 0.98 and 0.856; -0.00051 and -0.0155 respectively, it meant that the simulated effect of CROPWAT model was preferably well, but the stimulated values were higher than measured values in general. Simulation results show that the model is applicable in deficit irrigation study, however, in order to obtain more accurate simulation results, it is necessary to correct the  $K_c$  and  $K_s$  parameters before using the model.

**Keywords:** deficit irrigation; CROPWAT model; simulation