

冬小麦夏玉米土壤水分预报及优化灌溉模型

邓天宏^{1,2} 方文松¹ 付祥军² 刘荣花²

(1 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044; 2 河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

摘要 利用土壤水分平衡方程, 结合河南省冬小麦和夏玉米的生长规律和 1994 ~ 2000 年冬小麦、夏玉米田实测土壤湿度资料, 建立了河南省冬小麦、夏玉米土壤水分预报及优化灌溉的计算机模型。用 1998 ~ 1999 年郑州市麦田实测土壤湿度资料验证该模型模拟结果, 未来 10、20、30 天土壤湿度相对误差分别为 - 7.3% ~ 7.7%、- 8.3% ~ 6.8%、- 7.6% ~ 7.7%, 表明利用该模型, 可以较为准确地预报未来 1 个月的土壤水分变化, 并可根据小麦、玉米不同发育期特点, 给出以最高产量和最佳经济效益为目标的灌溉建议。

关键词 墒情 优化灌溉 预报模型

引言

河南省是水资源严重缺乏的地区之一。目前, 水资源的消耗主要用于农田灌溉, 在农业生产中如何科学合理用水, 提高水分利用效率, 使有限的水资源发挥更大的经济效益, 是迫切需要解决的一个重大问题。科学合理的灌溉方案是农业节水的一项重要技术途径, 其关键是准确预报未来不同时段内土壤水分。在多年试验研究的基础上, 总结自 1989 年以来在河南省中北部地区推广的冬小麦优化灌溉技术成果, 开发了“冬小麦、夏玉米土壤水分预报及优化灌溉模型”软件 Windows 版本。该模型根据土壤水分平衡方程, 结合中长期天气预报, 可由实测土壤湿度, 计算出未来 1 个月逐日或逐旬土壤湿度, 并将未来土壤湿度与小麦不同时段的适宜水分指标和干旱指标进行对比, 从最高产量和最佳经济效益两个角度进行灌溉决策分析, 确定是否灌溉, 以及最佳灌溉期和灌溉量, 并给出灌溉建议。

1 土壤水分预报模型

土壤水分预报涉及到许多因素, 主要是气象、作物、土壤 3 方面因素。本模型综合考虑了这 3 方面的影响, 从系统角度建立了土壤水分预报模型^[1,2]。

土壤水分预报模型建立的依据是土壤水分平衡方程:

$$W_{T+1} = W_T + P + G - E_T \quad (1)$$

式中, W_{T+1} 为时段末的土壤含水量 (mm), W_T 为时段初的土壤含水量 (mm), P 为时段内的有效降水量 (mm), G 为时段内地下水补给量 (mm), E_T 为时段内作物耗水量 (mm)。

1.1 时段初土壤含水量 W_T

时段初土壤含水量 W_T 由实测土壤湿度 m 计算得到:

$$W_T = 10 \times m \times \rho \times h \quad (2)$$

式中, m 为用烘干法测得的重量土壤湿度 (%) 的分子项; ρ 为土壤容重 (g/cm^3); h 为土层厚度 (m), 模型中取 1 m; 10 为单位换算系数。

为了解决部分台站没有 60 ~ 100 cm 测墒数据的问题, 我们利用郑州农业气象试验站(沙壤土质, 地下水位 8 m 以下) 1994 ~ 2000 年小麦、玉米田实测土壤湿度, 建立了深层土壤湿度与 40 ~ 50 cm 土壤湿度的关系式(式(3)至式(7)), 供缺乏深层土壤湿度的台站参考。

$$S_{60} = - 0.0103 S_{50}^2 + 1.1116 S_{50} + 2.0865 \quad (R = 0.9722) \quad (3)$$

$$S_{70} = - 0.0099 S_{50}^2 + 0.9657 S_{50} + 4.6223$$

$$(R = 0.9298) \quad (4)$$

$$S_{80} = -0.0064 S_{50}^2 + 0.7912 S_{50} + 6.2572$$

$$(R = 0.8778) \quad (5)$$

$$S_{90} = -0.0007 S_{50}^2 + 0.5389 S_{50} + 8.3103$$

$$(R = 0.7952) \quad (6)$$

$$S_{100} = -0.0018 S_{50}^2 + 0.5016 S_{50} + 9.1872$$

$$(R = 0.6762) \quad (7)$$

式中 S_{50} 、 S_{60} 、 S_{70} 、 S_{80} 、 S_{90} 、 S_{100} 分别为 40 ~ 50、50 ~ 60、60 ~ 70、70 ~ 80、80 ~ 90、90 ~ 100 cm 深度土壤湿度, R 为相关系数。

1.2 时段内有效降水量 P

有效降水量是指进入计算土层的净降水量,其计算公式为:

$$P = R - T - L - I_t \quad (8)$$

式中, P 为有效降水量 (mm); R 为预报降水量 (mm), 根据各级气象台站发布的中长期天气预报获得; T 为径流量 (mm), 是一个与降水强度、降水持续时间等因素有关的量, 河南省在小麦生长季降水量一般不大, 径流量 T 可视为零; L 为深层渗漏量 (mm), 当土壤水分不超过田间持水量时, 渗漏量忽略不计, 当土壤含水量超过田间持水量时 (灌溉或降水后), 超过部分作为渗漏处理; 对于夏玉米径流量 T 和渗漏量 L 一并处理, 即当土壤含水量超过田间持水量时 (灌溉或降水后), 超过部分作为损失量处理; I_t 为植被截留量 (mm), 其随作物生长发育阶段不同而不同, 冬小麦分蘖前截留量可以忽略不计, 分蘖至拔节期一次降水截留量为 0.5 mm, 拔节至孕穗期为 2.8 mm, 孕穗至成熟期为 4.2 mm。夏玉米不同时期的截留量约 1 ~ 4 mm。

1.3 时段内地下水补给量 G

地下水补给量主要决定于地下水埋深和土壤性质, 小麦拔节前根系较浅, 地下水补给量可不予考虑。小麦拔节后及夏玉米地下水补给量 G 的计算公式为:

$$G = E_T / e^{2H} \quad (9)$$

H 为地下水埋深 (m), E_T 为阶段实际耗水量 (mm)。

1.4 作物耗水量 E_T

未来作物耗水量与土壤水分、作物群体和未来气象条件有着密切关系。本模型从计算农田潜在蒸散入手, 经过土壤水分和作物叶面积系数的二级订

正, 进而求得未来某时段耗水量。

目前世界上计算潜在蒸散的方法很多, 本文用 1979 年经 FAO 修订的 Penman 公式^[1]:

$$E_{T_0} = [(p_0/p)(\Delta/\gamma)R_n + E_a] / [(p_0/p)(\Delta/\gamma) + 1.00] \quad (10)$$

式中, E_{T_0} 为未来某日的潜在蒸散 (mm/d), p_0 和 p 分别为海平面气压和本站气压 (hPa), R_n 为辐射差额水分项 (mm/d), E_a 为空气动力学项 (mm/d), Δ 为饱和水汽压斜率 (hPa/°C), γ 为干湿球湿度公式常数 (0.66 hPa/°C)。

对潜在蒸散值进行订正, 可得农田实际蒸散量:

$$E_T = KE_{T_0} \quad (11)$$

式中, E_T 为麦田实际蒸散量即作物耗水量; K 为作物系数, 是土壤含水量和叶面积系数的函数。冬小麦的 K 用式 (12)、(13) 计算。

$$K = -1.5 + 2.8^{[W+0.3351 \cdot \ln(I_{LA}+1)]} \quad (12)$$

式中, W 为 100 cm 深土层土壤相对湿度, 即土壤湿度占田间持水量的百分比; I_{LA} 为叶面积系数, 由实测或由下式求得:

$$I_{LA} = -0.604 + 4.0353 \times 10^{-2}t + 7.087 \times 10^{-4}t^2 - 2.5231 \times 10^{-5}t^3 + 2.0269 \times 10^{-7}t^4 - 4.7598 \times 10^{-10}t^5 \quad (13)$$

式中 t 为小麦发育天数。夏玉米的作物系数由下式计算:

$$K = -1.96078 \times 10^{-11}t^6 + 8.60671 \times 10^{-9}t^5 - 1.29025 \times 10^{-6}t^4 + 7.89959 \times 10^{-5}t^3 - 1.77232 \times 10^{-3}t^2 + 0.0134788t - 1.310474 + 2.8^W \quad (14)$$

式中 t 为小麦发育天数, W 同式 (12)。式 (12) 和式 (14) 中作物系数的计算以 0 ~ 100 cm 土层为预报对象, 对小范围的水分预报准确性更好, 但不便于与气象部门的常规业务相结合。为利用台站 0 ~ 50 cm 测墒数据开展河南省全省的墒情预报, 并方便对预报结果的验证, 我们利用郑州农业气象试验站 1994 ~ 2000 年小麦、玉米田实测土壤湿度, 建立了冬小麦、夏玉米不同发育期 0 ~ 50 cm 土层深度土壤相对湿度 W 与作物系数 K 的关系式, 并应用于省级墒情预报模型中 (表 1)。

利用式 (2) ~ (14) 及表 1, 将水分各收支项代入式 (1), 利用递推方法, 即可进行土壤水分预报。

表 1 冬小麦、夏玉米不同发育期 0 ~ 50 cm 土壤相对湿度 W 与作物系数 K 的关系

小麦			玉米		
发育期	关系式	相关系数	发育期	关系式	相关系数
备播 — 播种	$K = 3.6158 \times 10^{-5} W^{2.2307}$	0.8793	播种、出苗	$K = 3.2384 \times 10^{-3} W^{1.1520}$	0.862
出苗 — 三叶	$K = 5.6279 \times 10^{-7} W^{3.2307}$	0.8639	七叶	$K = 3.3087 \times 10^{-4} W^{1.7389}$	0.864
分蘖	$K = 7.4958 \times 10^{-8} W^{3.6747}$	0.7374	拔节	$K = 7.9852 \times 10^{-3} W^{1.0896}$	0.864
越冬	$K = 1.8935 \times 10^{-6} W^{2.9144}$	0.6342	抽雄	$K = 3.7006 \times 10^{-4} W^{1.7838}$	0.937
返青	$K = 5.6806 \times 10^{-7} W^{3.1992}$	0.6852	灌浆	$K = 6.1867 \times 10^{-2} W^{0.6361}$	0.428
拔节	$K = 4.4079 \times 10^{-3} W^{1.2379}$	0.6622	乳熟 — 成熟	$K = 1.3754 \times 10^{-3} W^{1.3803}$	0.412
抽穗 — 灌浆	$K = 9.5605 \times \ln(W) - 3.0731$	0.7206			
乳熟 — 成熟	$K = 2.7615 \times 10^{-8} W^{3.7804}$	0.6621			

2 节水灌溉决策模型

根据作物的需水规律、适宜水分指标及干旱指标,通过对土壤水分的实时监测和预测,并从经济效益的角度分析,制定科学合理的灌溉方案,以保证作物对水分的需求,使有限的水资源发挥最大的效益。

农作物并非耗水越多越好。小麦及玉米产量与耗水量之间呈抛物线关系^[3],它们的最佳耗水量为 340 ~ 360 mm。当耗水量过大时,产量增加并不明显,甚至有减产现象;耗水量偏小时,产量会明显下降。要保证全生育期适宜的耗水量,就需要控制各生育阶段的土壤湿度,使其满足小麦生长的需要。

2.1 冬小麦和夏玉米的适宜水分指标和干旱指标

多年来通过对不同生育阶段进行不同土壤水分等级处理的小麦、玉米的气孔阻力、蒸腾强度、光合

作用、灌浆速度、产量要素等大量资料的分析,利用作物生理生态特征的突变和最优分割理论,并参考其它研究成果,确定了不同土壤类型下两种作物各生育期的适宜水分指标下限和干旱指标(表 2、表 3),并将其应用到计算模型中。

表 2 冬小麦适宜水分指标下限和干旱指标 %

土壤类型	播种—返青		拔节—灌浆		乳熟—成熟	
	适宜下限	干旱	适宜下限	干旱	适宜下限	干旱
沙土	54	36	60	32	50	32
沙壤土	56	39	62	34	54	36
轻壤土	60	42	66	38	56	39
中壤土	63	45	67	43	60	42
重壤土	67	49	70	47	63	45
轻粘土	70	52	72	51	67	49
中粘土	72	55	73	53	70	52
重粘土	74	56	75	57	72	55

注:适宜下限和干旱指标均指土壤含水量占田间持水量百分比。

表 3 夏玉米拔节—成熟期干旱指标和适宜水分指标

极旱		重旱		轻旱		适宜	
土壤湿度	相对湿度	土壤湿度	相对湿度	土壤湿度	相对湿度	土壤湿度	相对湿度
≤8.5	≤40.0	8.6 ~ 12.5	40.1 ~ 55.0	12.6 ~ 15.0	55.1 ~ 70.0	15.1 ~ 18.0	70.1 ~ 85.0

2.2 小麦玉米水分—产量反应系数

试验表明,作物在不同的生育阶段出现水分亏缺,将对最终产量的形成产生影响。各发育阶段不同的耗水量引起的产量变化可表示为: $\Delta Y_i = K_i (Y_m/E_{T_m}) \cdot \Delta E_{T_i}$, ΔY_i 为作物某生育阶段由于耗水量变化而引起的产量变化(kg/hm²), Y_m 为最高产量(kg/hm²), E_{T_m} 为取得最高产量时的耗水量(m³/hm²), Y_m/E_{T_m} 即为最大水分利用效率,试验得出小麦 $Y_m/E_{T_m} = 1.275$ kg/m³, 玉米 $Y_m/E_{T_m} = 1.40$ kg/m³, ΔE_{T_i} 为某生育阶段耗水量。实际工作中,为方便阶段耗水量的计算,近似地认为 900 m³/hm²

以下的灌溉量 H 即为某生育阶段耗水量 ΔE_{T_i} ,从而能够进行节水浇灌的决策。

由不同生育期的 K_i 值^[3](表 4、表 5)可以看出,冬小麦和夏玉米的水分—产量反应系数在生育期内具有前期和后期小,中间籽粒形成期大的特点,其中两种作物在拔节期和抽穗、抽雄期的 K_i 值大于 1,表明这两个阶段缺水对作物产量的影响较大,是灌溉增产的关键时期,在水资源有限的地区,应优先满足这两个阶段的水分需求。

表 4 冬小麦不同生育阶段的水分—产量反应系数

	苗期	越冬期	返青期	拔节期	抽穗—开花	灌浆—成熟
K_i	0.74	0.62	0.69	1.14	1.29	0.76

表 5 夏玉米不同生育阶段的水分 - 产量反应系数				
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆成熟期
K_i	0.56	1.17	1.38	0.78

2.3 优化灌溉决策

将未来逐日土壤湿度 W_T 计算出之后,与小麦各生育期的适宜水分指标下限 W_P 和干旱指标 W_D 进行比较,当 $W_T > W_P$ 时,不进行灌溉;当 $W_T < W_D$ 时,则进行灌溉。当土壤湿度处于适宜水分下限和干旱指标之间时,是否进行灌溉,以及灌溉量是多少,则应进行经济效益分析。引入目标函数: $B_{ij} = C_1 \Delta Y_{ij} - C_2 H_{ij} - C_3 S_i$,其约束条件为: $H_{ij} \leqslant (F_c - I_f - W_T)$,式中, H_{ij} 为第 i 个生育阶段实施的第 j 个灌溉量; B_{ij} 为第 i 个生育阶段实施第 j 个灌溉量后所取得的经济效益; ΔY_{ij} 为第 i 个生育阶段实施第 j 个灌溉量所引起的产量变化; S_i 为灌溉开关因子,表示第 i 个生育阶段是否实施灌溉, $S_i = 0$ 时不灌, $S_i = 1$ 时灌溉; C_1 、 C_2 和 C_3 分别为小麦价格、水

费和单位面积土地进行一次 $900\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 灌溉量所需要投入的劳力、机器折旧等费用(元/次); F_c 为田间持水量, I_f 为可能降水量,约束条件控制灌水量,以免发生渗漏流失。决策时首先设 $S_i = 1$,即进行灌溉,然后给定一组灌溉量,从 $300\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 至 $1200\text{ m}^3/\text{hm}^2$,每次递增 $50\text{ m}^3/\text{hm}^2$,计算其经济效益 B_{ij} 。当 $B_{ij} \leqslant 0$ 时,则不进行灌溉;当 $B_{ij} \geqslant 0$ 时,取不同灌溉量情况下的 B_{ij} 最大值,则与之相对应的 H_{ij} 即为该阶段的灌溉量。在水资源有限的地区,小麦应优先保证拔节和灌浆期用水,玉米则优先保证播种期和抽雄期用水;而小麦返青至拔节初期、玉米苗期的适当水分胁迫,可促使其根系下伸,增加深层土壤水的利用^[4,5]。

3 模型的检验

应用郑州市气象局 1998 ~ 1999 年度的气象资料和麦田测墒数据,对该模型进行了验证(表6),结

表 6 模型检验

日期 (月 - 日)	土壤含水量/ mm			绝对误差/ mm			相对误差/ %			备注	
	实测值	模拟值									
		10 天	20 天	30 天	10 天	20 天	30 天	10 天	20 天		30 天
09 - 18	238.4										
09 - 28	214.6	216.1			1.5			0.7			
10 - 08	199.7	196.7	196.7		- 3.0	- 3.0		- 1.5	- 1.5		
10 - 18	278.6	193.7	190.7	190.7	- 84.9 *	- 87.9 *	- 87.9 *	- 30.5 *	- 31.6 *	- 31.6 *	1998 年10月
10 - 28	266.7	262.2	186.3	183.3	- 4.5	- 80.4 *	- 83.4 *	- 1.7	- 30.2 *	- 31.3 *	15 日灌溉
11 - 08	251.8	253.3	248.8	180.3	1.5	- 3.0	- 71.5 *	0.6	- 1.2	- 29.4 *	
11 - 08	233.9	239.9	241.4	236.9	6.0	7.5	3.0	2.5	3.2	1.3	
11 - 28	233.9	229.5	235.4	236.9	- 4.5	1.5	3.0	- 1.9	0.6	1.3	
12 - 08	238.4	232.4	229.5	235.4	- 6.0	- 8.9	- 3.0	- 2.5	- 3.8	- 1.3	
12 - 18	226.5	232.4	228.0	225.0	6.0	1.5	- 1.5	2.6	0.7	- 0.7	
12 - 28	223.5	222.0	228.0	223.5	- 1.5	4.5	0.0	- 0.7	2.0	0.0	
01 - 08	214.6	219.0	216.1	223.5	4.5	1.5	8.9	2.1	0.7	4.2	
01 - 18	207.1	210.1	214.6	213.1	3.0	7.4	6.0	1.4	3.6	2.9	
01 - 28	199.7	201.2	204.1	208.6	1.5	4.5	8.9	0.7	2.2	4.5	
02 - 08	204.1	192.2	193.7	196.7	- 11.9	- 10.4	- 7.4	- 5.8	- 5.1	- 3.6	
02 - 18	174.3	187.7	186.3	187.7	13.4	11.9	13.4	7.7	6.8	7.7	
02 - 28	169.9	168.4	180.3	177.3	- 1.5	10.4	7.4	- 0.9	6.1	4.4	
03 - 08	289.1	165.4	162.4	174.3	- 123.7 *	- 126.7 *	- 114.7 *	- 42.8 *	- 43.8 *	- 39.7 *	1999 年3月
03 - 18	302.5	286.1	178.8	177.3	- 16.4	- 123.7 *	- 125.2 *	- 5.4	- 40.9 *	- 41.4 *	4 日灌溉
03 - 28	287.6	266.7	263.7	168.4	- 20.9	- 23.8	- 119.2 *	- 7.3	- 8.3	- 41.5 *	
04 - 08	254.8	251.8	238.4	235.4	- 3.0	- 16.4	- 19.4	- 1.2	- 6.4	- 7.6	
04 - 18	223.5	229.5	226.5	216.1	6.0	3.0	- 7.4	2.7	1.3	- 3.3	
04 - 28	202.6	198.2	202.6	201.2	- 4.5	0.0	- 1.5	- 2.2	0.0	- 0.7	
05 - 08	163.9	174.3	171.4	174.3	10.4	7.5	10.4	6.4	4.5	6.4	
05 - 18	149.0	138.6	146.0	143.0	- 10.4	- 3.0	- 6.0	- 7.0	- 2.0	- 4.0	1999 年5月
05 - 28	245.9	135.6	128.1	134.1	- 110.3 *	- 117.7 *	- 111.8 *	- 44.8 *	- 47.9 *	- 45.5 *	19 日灌溉

注: * 表示未考虑灌溉项。

果表明:去除灌溉因素的影响,100 cm 土层 10 天、20 天和 30 天预报绝对误差分别为 - 20.9 ~ 13.4、- 23.8 ~ 11.9 和 - 19.4 ~ 13.4 mm,相对误差分别为 - 7.3 % ~ 7.7 %、- 8.3 % ~ 6.8 %、- 7.6 % ~ 7.7 %。由于预报模型考虑了气象、作物和土壤 3 种因素的综合作用,而作物和土壤因素有相对的稳定性,因而客观上可以减少中长期天气预报的风险。

4 小结

根据农田土壤水分平衡原理,建立了河南省冬小麦、夏玉米土壤水分预报及优化灌溉的计算机模型,解决了该模型在实际应用中的一些问题。

(1)建立了 50 cm 土壤湿度与深层土壤湿度转换的关系模型,为缺乏深层测墒数据的台站使用该模型提供深层土壤湿度资料。

(2)分别建立了 0 ~ 100 cm 和 0 ~ 50 cm 土层潜

在蒸散与实际蒸散的关系方程,以满足不同的需求。

(3)在计算机上实现了优化灌溉决策模型理论。

(4)经检验,该模型 10 天、20 天、30 天模拟的土壤湿度相对误差分别为 - 7.3 % ~ 7.7 %、- 8.3 % ~ 6.8 %、- 7.6 % ~ 7.7 %。

参考文献

- 1 朱自玺,赵国强,邓天宏. 冬小麦优化灌溉模型研究及其应用. 华北农学报, 1995, 10(4): 36 - 33
- 2 冯广龙,徐凤先,王坚. 计算与预报土壤水分动态的模拟模型. 土壤水分和养分的有效利用. 北京:北京农业大学出版社, 1994. 91 - 98
- 3 钱蕴璧,李英能,杨刚,等. 节水农业新技术研究. 郑州:黄河水利出版社, 2002. 305 - 308
- 4 “华北平原作物水分胁迫与干旱研究”课题组. 作物水分胁迫与干旱研究. 郑州:河南省科学技术出版社, 1991. 166 - 172
- 5 赵聚宝,赵琪. 抗旱增产技术. 北京:中国农业出版社, 1998. 98 - 99

Soil Water Prediction Model and Optimal Irrigation Technique for Winter Wheat and Summer Corn

Deng Tianhong^{1,2} Fang Wensong¹ Fu Xiangjun² Liu Ronghua²

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;

2 Henan Institute of Meteorology, Zhengzhou 450003)

Abstract: Based on winter wheat and summer corn growth regularities in Henan Province and application experiences in optimal irrigation techniques for winter wheat, as well as observed soil moisture data for winter wheat and summer corn from 1994 to 2000, a computer model of soil water prediction and optimal irrigation of winter wheat and summer corn was set up according to the soil water balance equation. The model results were verified by the observed data from wheat fields in Zhengzhou in 1998 and 1999. The relative errors of soil moisture for the next 10, 20, 30 days are - 7.3 % to 7.7 %, - 8.3 % to 6.8 %, - 7.6 % to 7.7 %, respectively. It indicates that soil water can be predicted in one month ahead accurately with this model. Some irrigation suggestions with respect to different wheat and corn growth phases are given, aiming to obtain the maximum yield and the optimal economic benefits.

Key words: soil water, optimal irrigation technique, prediction model