

喷灌条件下冬小麦田间水分运移 数学模拟及灌溉模式的研究*

胡 浩 云

(华北水利水电学院 郑州 450045)

谢森传 惠士博

(清华大学水利水电工程系 北京 100084)

提 要 为探讨节水高产喷灌模式,用数学模拟和田间试验相结合方法,研究了冬小麦在喷灌条件下田间水分运移规律。数学模拟结果与田间实测土壤含水率吻合良好。在此基础上模拟计算出不同喷灌定额下,消耗于作物蒸腾、表土蒸发和深层渗漏的水量,结果表明40~60mm喷灌定额下的农田水分无效消耗(表土蒸发+深层渗漏)最小,从而得出节水高产的冬小麦喷灌灌溉模式。经田间试验对比,获得相同产量条件下,本文提出的模式比现行喷灌模式节约灌溉水45%。

关键词 冬小麦 喷灌 水分运移 数学模拟 节水 灌溉模式

分类号 S275.5; P641.2

1 前 言

华北地区水资源紧缺,节水灌溉是缓解的重要措施。北京地区,近年来一直发展粮田喷灌,至1993年底,喷灌面积已达10万 hm^2 。在喷灌条件下,输水损失很少,但欲进一步节水,其潜力在田间。所以,研究喷灌条件下田间水分转化规律及其灌溉模式,对节水灌溉有重要意义。本文采用数学模拟和田间试验相结合的方法,研究了冬小麦在喷灌条件下的田间水分运移规律。结合田间试验,提出了节水高产的冬小麦喷灌灌溉模式,为制定合理喷灌模式和田间水分管理提供了科学依据。

2 数学模型

根据土壤水分运动和作物需水基本原理,将计算深度(2.5m)分为两部分,即冬小麦根系层和根系层以下层,在根系层中考虑了冬小麦根系吸水项 $S_r(Z, t)$ 。土壤水分运动数学模型如下:

基本方程

本文于1994年6月6日收到,1994年11月28日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} (D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z}) - \frac{\partial}{\partial Z} K(\theta) - S_r(Z, t), & 0 \leq Z \leq L_r(t) \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} (D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z}) - \frac{\partial}{\partial Z} K(\theta) & L_r(t) \leq Z \leq L \end{cases} \quad (1)$$

初始条件

$$\theta(Z, t) = \theta_0(Z) \quad t = 0 \quad (2)$$

上边界条件

$$\text{喷灌时} \quad D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} - K(\theta) = -R(t) \quad Z = 0, 0 \leq t \leq t_p \quad (3)$$

$$\text{无喷灌} \quad D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} - K(\theta) = E_s(t) \quad Z = 0, t > t_p \quad (4)$$

下边界条件 地下水位埋深大于 4m, 所以下边界采用土壤含水率不变的边界条件

$$\theta(Z, t) = \theta_0(Z) \quad Z = L \quad t > 0 \quad (5)$$

式中 θ 为土壤含水率 (体积比); Z 为位置坐标, 向下为正; t 为时间坐标; t_p 为喷灌时间; $R(t)$ 为喷灌强度; $L_r(t)$ 为根系层厚度; L 是计算土层厚度; $D(\theta)$ 和 $K(\theta)$ 分别为土壤水分运动扩散系数和导水率, 从试验田取土在室内测定, $E_s(t)$ 为土面蒸发强度; $S_r(Z, t)$ 为作物根系吸水率, 即根系在单位时间内从单位体积土壤中所吸收水分体积。

本文通过田间土面蒸发试验, 总结出计算土面蒸发的经验模式

$$\begin{cases} E_s = E'_s & \theta_b \geq 0.34 \\ E_s = (0.50354 \ln(\theta_b) + 1.53975)E'_s & 0.05 < \theta_b < 0.34 \\ E_s = 0 & \theta_b \leq 0.05 \end{cases} \quad (6)$$

式中 θ_b 为表层 5cm 土壤平均含水率 (体积比)。

作物根系吸收的水分, 只有很小一部分留在植物体内, 95% 以上的水分消耗于叶面蒸腾^[1]。所以, 可用叶面蒸腾率来代表作物根系吸水率。由于根系吸水率一方面与根系层的土壤含水率有关, 另一方面还和根系分布有关^[1,3], 采用如下经验模式:

$$\begin{cases} S_r(Z, t) = S_0(Z, t) \left(\frac{\theta_z - \theta_{wr}}{\theta_f - \theta_{wr}} \right)^A \\ S_0(Z, t) = \left(\frac{1.8}{L_r(t)} - \frac{1.6Z}{L_r^2(t)} \right) T(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中 θ_z 为深度 Z 处的土壤含水率; θ_f 是田间持水率 (体积比); θ_{wr} 是凋萎含水率; $T(t)$ 为 t 时刻的叶面蒸腾率; $L_r(t)$ 为相应时刻的根系层厚度; A 是经验系数, 本模型取 $A = 0.6967$ ^[3]。

3 模型检验

首先对无作物情况, 用室内土柱试验进行检验。然后对有作物情况, 用试验地田间实测资料进行检验。现仅把田间试验检验结果介绍如下。由于田间作物蒸腾和裸间土面蒸发不易测定, 所以主要用田间实测土壤含水率进行检验。

喷灌试验地, 每个处理面积 0.33hm^2 , 土质为中粉质壤土, 田间持水率 $\theta_f = 0.31$, 饱和含水率 $\theta_s = 0.45$, 地下水位埋深 5m, 室内测定的土壤水分运动参数拟合的经验公式为

$$\begin{cases} D = 0.26(\theta/\theta_s)^{1.79}, (\text{cm}^2/\text{min}) & \theta < 0.27 \\ D = 14.50(\theta/\theta_s)^{9.68} & \theta \geq 0.27 \end{cases} \quad (8)$$

$$K = 0.021(\theta/\theta_s)^{9.11}, (\text{cm}/\text{min}) \quad (9)$$

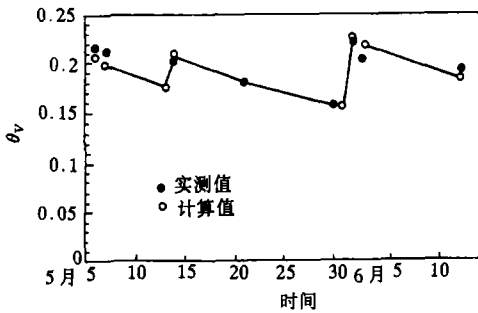


图1 0~40cm 平均土壤含水率对比

Fig. 1. Comparison of average soil moistures at 0~40cm for measured and calculated values

冬小麦根系层厚度,返青—拔节为 60cm,拔节—成熟为 80cm,土壤含水率采用中子仪和取土烘干法测定,深度至 1m,每周测一次。

从 1992 年 3 月 10 日至小麦收割前的 6 月 12 日,共降雨 39.8mm,除 5 月 14 日降雨 13.8mm 外,其余日降雨均小于 5mm。所以,此期间共喷灌 4 次,每次 60mm。对上述过程,采用模型进行了模拟计算,用实测土壤含水率与计算结果进行比较。图 1 表示 5 月 5 日~6 月 12 日期间,田间 0~40cm 土壤平均含水率变化过程的对比,其中 5 月 14 日降雨 13.8mm,5 月 30 日喷灌 60mm。图中可见,土壤水分变化吻合良好。

此期间,土壤剖面上各深度的含水率,实测值与计算值之差,均在 0.02 以内。图 2 则是 3 月 27 日和 5 月 7 日两个实测土壤含水率剖面与计算结果的比较,也说明吻合良好。

经模型检验,说明本数学模型是正确的,模拟计算结果可信。

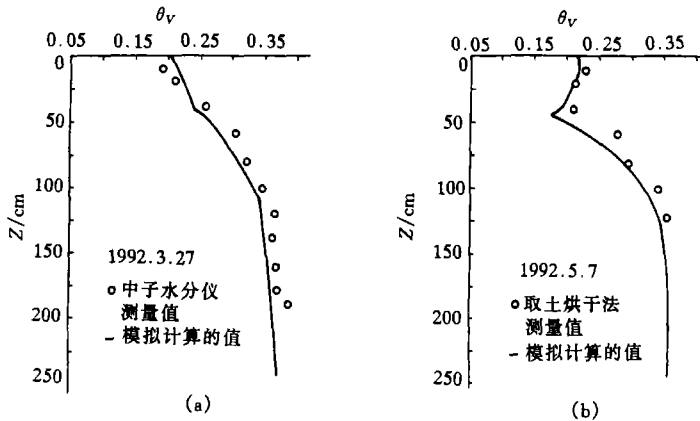


图 2 实测土壤含水率剖面与计算结果对比

Fig. 2. Comparison of soil water contents for measured and calculated data

4 模拟计算结果及分析

4.1 模拟计算

本模型可对冬小麦整个生长期田间水分运移进行模拟计算,但对冬小麦的田间水分管理来说,主要是冬灌和返青以后至麦黄阶段的灌溉,现分别就这两个阶段的田间水分运移进行

模拟计算分析。模拟计算的土壤为中粉质壤土, 地下水埋深和运动参数等同第 3 节所述。气象条件相当于北京地区的干旱年, 冬小麦生长期降雨 54mm。按本文数学模型要求, 计算了冬小麦各生育阶段的潜在蒸发 ET_0 、作物系数 K_c 、作物蒸发 ET_c 、裸露率 r 、土面蒸发 E'_s 和蒸腾率 T , 结果如表 1 所列。

表 1 冬小麦腾发率

单位: mm/d

Table 1. Evapotranspiration rate from winter wheat

生长阶段	ET_0	K_c	ET_c	r	E'_s	T
播种~越冬 (9月25日~11月20日)	1.52	0.62	0.94	0.90	0.85	0.09
越冬~返青 (11月21日~3月10日)	0.91	0.65	0.59	0.90	0.53	0.06
返青~拔节 (3月11日~4月10日)	2.58	1.03	2.66	0.60	1.59	1.07
拔节~抽穗 (4月11日~5月1日)	4.34	0.94	4.30	0.30	1.29	3.01
抽穗~灌浆 (5月2日~5月20日)	4.92	1.17	5.76	0.10	1.15	4.61
灌浆~黄熟 (5月21日~6月10日)	5.17	1.00	5.17	0.20	1.55	3.62

(1) 冬小麦越冬期

北京地区冬小麦越冬期一般为第一年的 11 月 20 日至第二年的 3 月 10 日。计算了 40mm、60mm、80mm 三种不同喷灌定额 (见表 2)。

表 2 三种不同冬灌水量的土层含水率模拟计算结果

Table 2. Soil water computed for three irrigation waters in winter

厚度 (cm)	灌水量 (mm)					
	40		60		80	
	含水率	贮水 (mm)	含水率	贮水 (mm)	含水率	贮水 (mm)
30	0.145	43.7	0.154	46.3	0.161	48.2
50	0.155	77.6	0.164	81.9	0.170	85.0
70	0.172	120.5	0.180	126.1	0.186	130.2
100	0.195	194.8	0.202	202.0	0.207	207.4
土面蒸发 (mm)	51.9		54.5		56.3	
1m 深渗漏 (mm)	4.1		11.2		19.9	

从表 2 可知, 三种冬灌水量到越冬期结束, 麦田 1m 土层内的贮水量差别并不大, 特别是 60mm 和 80mm 两种方案仅相差 5.4mm, 而土面蒸发和 1m 深渗漏则相差 10.5mm, 说明多灌的水量并不能都存贮于作物利用的有效土层内, 反而会增加无效消耗。这一点从 1992 年田间试验实测结果也得到了证明。所以冬灌定额不是越大越好, 应取 60mm 为宜。

(2) 冬小麦返青至收割时期

返青至收割是冬小麦主要耗水期, 在降雨少且地下水位深的地区, 主要靠灌溉。对该时期进行田间水分运移模拟计算, 目的是为了寻求一个使灌溉水量的无效消耗 (深层渗漏和土面蒸发) 最小的喷灌定额。计算方案按喷灌定额 20、30、40、60、80、100 (mm) 区分共计算了 6 个方案、计算日期是 3 月 10 日~6 月 10 日, 当根系层土壤含水率下降至 60% 田间持水率即进行喷灌, 各方案模拟计算的结果如表 3。

表 3 不同喷灌定额的土面蒸发和深层渗漏

Table 3. Surface evaporation and deep percolation under different sprinkler irrigation quota

喷灌定额 (mm)	灌水量 (mm)	喷灌次数	土面蒸发 (mm)	土面蒸发		1m 渗 漏量 (mm)	渗透量		蒸发+渗透 灌水量 (%)
				灌水量 (%)	渗透量 (%)				
20	200	10	80.2	40.1	3.1	1.5	41.6		
30	210	7	82.2	39.1	3.8	1.8	40.9		
40	200	5	75.4	37.7	4.6	2.3	40.0		
60	240	4	81.6	34.0	8.5	3.6	37.6		
80	320	4	103.5	32.3	17.0	5.3	37.6		
100	300	3	90.9	30.3	24.6	8.2	38.5		

从表 3 可见，同样保证冬小麦根系层达到适宜土壤含水率情况下，各方案在该生长期内的喷灌水量由小变大，但喷灌次数却由多变少。显然，在作物需水高峰期，小定额方案则 3~5d 就需喷一次，这是不切合实际的。再把表 3 中有关数据画在图 3、图 4，则清楚地表明：土面蒸发随喷灌定额由小变大的变化规律是波动式的，这是由于土面蒸发与气候条件、裸露率以及表层土壤含水率等诸多因素有关，而 1m 土层深的渗漏量则随喷灌定额增大而加大。从土面蒸发和深层渗漏之和的数值看，40mm 喷灌定额情况下最小（图 4），而从土面蒸发与深层渗漏和与喷灌水量的比值看，60mm 喷灌定额方案为最小。所以，从无效消耗量最小出发，技术上可行的最优喷灌定额为 40~60mm。

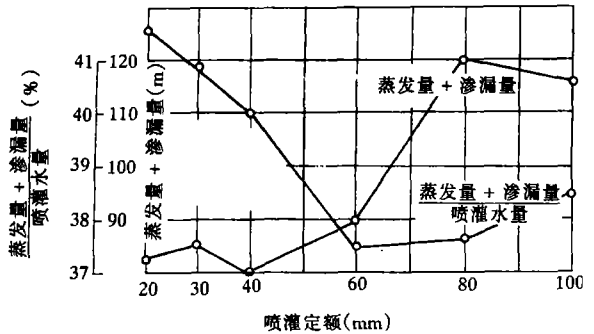
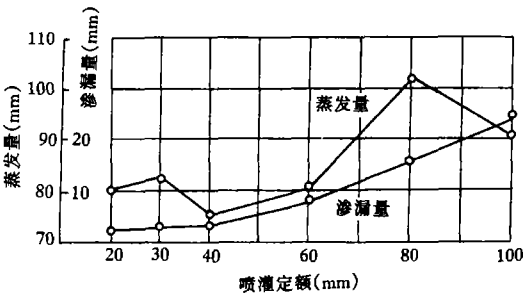


图 3 不同喷灌定额的土面蒸发和深层渗漏

图 4 (蒸发+渗透)/喷灌水与喷灌定额关系

Fig. 3. Surface evaporation and deep percolation under different sprinkler irrigation quota

Fig. 4. Relationship between $(E + P/IW)$ ratio and sprinkler irrigation quota (E —surface evaporation; P —deep percolation; IW —irrigating water)

4.2 合理喷灌模式和典型年喷灌水量

根据上述模拟计算结果，冬小麦的喷灌定额以 60~40~60 (mm) 为宜，即冬灌 60mm，返青 40mm，拔节至灌浆都是 60mm，这就是本文推荐的最优喷灌定额。至于冬小麦的喷灌制度或称喷灌模式，还要根据降水情况、品种特性和苗情等因素才能具体制定。

应用上述成果，对典型年的喷灌水量进行模拟计算。以北京昌平站 33 年降水资料为依据，对冬小麦生长期内降水进行统计分析，选出 4 个典型年：丰水年 (25%)，平水年 (50%)，干旱年 (75%) 和特旱年 (90%)，分别对典型年进行潜在腾发量计算和选定降水分布，应用本

模型模拟计算结果如表 4。

表 4 各典型年冬小麦喷灌水量

单位：mm

Table 4. Sprinkler irrigation water for different typical year

典型年	降水		喷灌		降水+喷灌
	降水量	次数	水量	次数	
特旱年	32.4	9	300	6	332.4
干旱年	56.4	8	300	6	356.4
平水年	83.4	7	300	6	383.4
丰水年	111.0	7	260	5	371.0

从表 4 看，北京地区的冬小麦，在生长期内降水量很少，要取得稳产高产，主要靠灌溉来调节农田水分，由特旱年到平水年，其喷灌水量都是相同的，丰水年也就减少一次喷灌。可见认真进行冬小麦的田间水分管理，对节水和增产都是很重要的。

4.3 田间试验结果

试验是在北京市昌平区南部喷灌节水示范区进行的，试区土壤同本文第 3 节所述，按本文最优喷灌定额进行试验，结果如表 5。

表 5 冬小麦喷灌田间试验结果

Table 5. Field experimental results for winter wheat with sprinkler irrigation

年份	地块	降水量 (mm)	喷灌		1m 土壤 水利用 (mm)	总耗水 (mm)	亩产 (kg)	总水分 效率 (kg/mm)	灌溉水 效率 (kg/mm)
			降水量 (mm)	次数					
1992	试验 1	54	240	6	59	353	350	0.99	1.46
	试验 2		200	5	63	317	326	1.03	1.63
	群众 1		490	6	0	544	352	0.65	0.72
	群众 2		450	5	0	504	367	0.73	0.82
1993	试验 1	61	240	4	50	351	374	1.07	1.56
	试验 2		300	5	20	381	385	1.01	1.28
	群众 1		400	5	0	461	427	0.93	1.07
	群众 2		450	5	0	510	317	0.62	0.70

1992、1993 连续 2 年都属于旱年，试验地的平均情况是：喷灌 245mm，喷 5 次，总耗水 358mm。这和表 4 中模拟计算的结果非常接近，说明模拟计算分析得出的喷灌模式和喷灌定额是可行的。和当年群众习惯性喷灌相比较，在获得相同产量的情况下，可节水 45%。可见在喷灌条件下，搞好田间水分管理，其节水潜力是很大的。

5 结 论

(1) 利用所建数学模拟方法，对喷灌条件下冬小麦田间水分运移进行模拟计算，模拟结果与田间试验资料吻合，说明所建数学模型合理，模拟计算结果可靠。

(2) 模拟计算得出的田间水分转化规律，为制定合理的喷灌定额和喷灌模式提供了科学依据，对加强喷灌田间水分管理有理论指导作用。

(3) 得出的 60~40~60 (mm) 合理喷灌定额，具有节水、高产、高效的优点，可在类似地区推广。

参 考 文 献

- 1 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988. 206~218
- 2 刘昌明, 窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算. 水科学进展. 1993, 3 (4): 252~263
- 3 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 冬小麦根系吸水模式的研究. 西北农业大学学报. 1992, (2): 8~15

Study on the Field Moisture Movement Numerical Simulation for Winter Wheat and the Irrigation Model under Sprinkler Irrigation Condition

Hu haoyun

(*Hubei Hydraulic and Hydropower Engineering Institute, Zhengzhou 450045*)

Xie senchuan and Hui shibo

(*Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract: To investigate water-saving sprinkler model, both numerical simulation and field experiment methods are used to study the field moisture movement of winter wheat under sprinkler irrigation. Compared of the soil moisture between numerical simulation and the field experiment data, the results are satisfactory and indicate that the numerical model is reliable. Based on the model, the transpiration, surface evaporation and deep percolation under different sprinkler irrigation quota are simulated. The results show that the surface evaporation and deep percolation under 40—60mm sprinkler irrigation quota is minimal. Thus, the reasonable sprinkler irrigation model for winter wheat is proposed. Relative to the present sprinkler irrigation farmer's usage water use of the suggested model is reduced by 45%.

Key words: winter wheat; sprinkler irrigation; water movement; numerical simulation; water-saving irrigation model.