

灌区实时灌溉供水模型研究^{*}

周 振 民

(水利部黄河水利委员会引黄灌溉局 河南新乡 453003)

摘 要 研究了灌溉系统供水计算模型。将灌区内作物概化为水稻和旱作物两种, 分别以水量平衡原理和土壤水分模拟理论为基础建立稻田和旱作物灌溉供水计算模型。模型中所需要的参数如水文气象、土壤和作物参数均可通过分析历史资料或实测得到。模型系统可进行实时计算操作, 并可预测下次灌溉方案, 并在取得实测资料后对原预报方案进行实时修正, 从而编制实时灌溉方案。模型还可研究灌溉系统内各子系统的优化供水流量和优化轮灌方案。

关键词 灌溉模型 优化供水 应用效益

分类号 S274. 1

1 模型建立与求解

1.1 稻田灌溉需水量计算

一定时段内, 稻田水量平衡方程可概化如下:

$$W_j = W_{j-1} + Rf_j - E_{ij} - S_j + Ir_j - Dr_j \quad (1)$$

式中 W_j 为时段末稻田水深; W_{j-1} 为时段初稻田水深; Rf_j 为时段内降雨; E_{ij} 为作物蒸腾量; S_j 为时段内平均渗漏量; Ir_j 为灌溉水深; Dr_j 为地面排水。

设 W_{\max} 为稻田最大水深 (由田间工程情况和水稻生长期需水特点确定, 本文取为 12cm), W_{opt} 为理想水深, 生长期前 30d 取为 7cm, 其余为 10cm, E_{ij} 和 S_j 可通过逐日计算得到。时段内降雨逐日加入水量平衡方程至到田间最大水深, 而多余的降雨作为排水排出。作为初始计算, 将 W_{j-1} 灌水至 W_{opt} , 以日为计算时段, 逐日计算水量平衡方程中各项, 可得时段末水深。

假定除了降雨 (采用预报值) 外, 其余气象资料都依本时段均值计, 则可应用上述水量平衡方程计算未来时段内水深。稻田实际水深与理想水深或最大水深之差值即为未来时段内灌溉或排水量。由于上述气象资料假定而产生的误差, 当取得实测资料并应用模型重新计算各参数时, 则预报误差即得到订正。

1.2 旱作物灌溉需水量计算

旱作物灌溉计算基于土壤水分过程模拟理论, 应用以下控制方程

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right] - \frac{\partial k(\theta)}{\partial Z} - S(\theta) \quad (2)$$

式中 θ 为土壤含水量; t 为时间; Z 为计算土壤剖面深度; $D(\theta)$ 为土壤水分扩散系数 (cm^2/s)

^{*} 本文于 1995 年 7 月 3 日收到, 1996 年 3 月 7 日收到修改稿。

h); $k(\theta)$ 为土壤入渗系数 (cm/h), $S(\theta)$ 为作物吸水耗水强度 (cm^3/d)。

方程 (2) 为非线性方程, 在求其数值解时, 考虑以下边界和初始条件:

$$\theta(0, t) = \theta_1(t) \quad t > 0, Z = 0$$

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

$$\theta(L, t) = \theta_2(t) \quad t > 0, Z = L$$

式中 L 为土壤剖面深度, 在地表 $\theta(0, t)$ 处土壤含水量由平均地面气温和周围空气相对湿度估算。应用隐式有限差分法解上述方程, 可得不同时段土壤水分剖面并用以确定灌溉时间和灌水深度。灌水或降水后, 式 (2) 中的 θ 值应以新的初始值开始计算。

同稻田灌溉计算方法一样, 预算的土壤水分成果要用未来的实测气象和田间资料进行修正, 成果修正后再预测下一时段土壤水分状态并计算灌溉方案。如果预报的下时段末土壤水分总含量小于土壤水分允许枯竭值, 就应当进行补充灌溉。本文将土壤水分允许最大枯竭值取为土壤总有效水分含量的 50%, 灌溉需水量中应当减掉下时段预报降雨量, 然后, 将作物种植面积乘以各相应点灌溉需水量即为旱作物灌溉水量。

1.3 参数分析计算

(1) 作物和土壤参数 求解方程 (2) 首先要确定方程中有关土壤和作物参数。本文假定土壤为均质, $D(\theta)$ 和 $K(\theta)$ 依据实测资料分析确定, 作物吸水耗水量为

$$S(\theta) = \alpha(\theta) \frac{T_P}{D_{RZ}} \quad (3)$$

式中 $S(\theta)$ 为作物吸水耗水强度 (cm/d); $\alpha(\theta)$ 为取决于土壤含水量的变量; T_P 为潜在蒸腾量 (cm/d); D_{RZ} 为根系层深度 (cm); 假定 $\alpha(\theta)$ 在凋萎点 ($\alpha(\theta) = 0$) 和田间持水量 ($\alpha(\theta) = 1$) 间成线性变化, 任意含水量 θ 条件下, $\alpha(\theta)$ 由下式计算:

$$\alpha(\theta) = \frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}} \quad (4)$$

式中 θ_{WP} 为永久凋萎点土壤含水量 (%); θ_{FC} 为田间持土壤含水量 (cm^3/cm^3)。

(2) 气象参数 为便于生产应用, 本文应用下式计算潜在蒸发:

$$E_P = C_1 \exp(-C_2 LAI) PET_c \quad (5)$$

式中 E_P 为潜在蒸发 (mm/d); PET_c 为潜在作物蒸腾量 (mm/d); LAI 为叶面系数; C_1 、 C_2 为回归系数, 由蒸发与蒸腾实验观测资料分析得: $C_1 = 1.0$, $C_2 = 0.6$ 。

潜在作物蒸腾量应用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的彭曼法 (penman) 计算。在预测下时段根系层土壤水分时, 将本时段逐日风速、相对湿度、蒸发、气温的均值做为下时段预估输入模型, 经逐日模拟计算, 可得下时段逐日土壤水分过程, 然后可计算出灌水方案。气象参数预报之误差在取得实测资料时可得订正。

2 灌区综合需水量计算

灌溉系统中每一子系统内需水量根据其相应作物布局计算。各子系统需水量由稻田需水和旱作物需水组成。对于稻田还必须考虑一定量的泡田用水, 本文研究的灌区内泡田需水量平均为 128mm, 稻田和旱作物需水量可用下式计算:

$$WR_{ai} = \frac{A_r WR_{ci}}{F_{ae}} \quad (i = 1, 2, \dots)$$
 (6)

式中 WR_{ai} 为时段内各子系统需水量 (万 m³)； A_r 为子系统作物种植面积 (hm²)； WR_{ci} 为子系统时段内作物需水量 (万 m³/hm²)； F_{ae} 为田间用水效率 (%)，本文研究依据实测资料分析平均取田间用水效率为 75%，灌区需水总量用下式计算：

$$WT_i = \sum_{i=1}^N WR_{ai} \quad (i = 1, 2, \dots)$$
 (7)

式中 WT_i 为时段内灌区需水总量 (万 m³)。

3 灌溉系统流量计算

将灌区内支渠系统作为一子系统研究，首先给定一部分支渠以其最大输水能力运行，则该支渠需水总量除以对应流量即可计算出该支渠运行时间。然后依据干支渠流量可计算出同时可供运行的支渠条数。当同时运行中的某一支渠完成运行后（灌完控制面积），打开未运行的支渠。由此，即可计算出全部干支渠系统的开启关闭时间和运行历时。

4 实时灌溉水量调配程序编制（RIWAP）

该程序由 7 个子程序组成（图略），其中包括：主程序（RIWAP）、历史资料分析和降雨量预报程序（SRA 和 RF 程序）、输入程序（INPUT）、稻田和旱作物灌溉需水量计算程序、灌溉计划编制程序（SCHED），本文应用 FORTRAN 语言编写了用户计算机程序。

5 实例应用及分析

本文以河南省原阳县韩董庄引黄灌区为例。该灌区多年平均降水量 558mm，灌区设计总面积 390.5km²，耕地面积 2.51 万 hm²，设计灌溉面积 2.28 万 hm²，灌区建有引黄穿堤闸 2 座，设计总引水流量 50m³/s，灌区内有总干渠一条，长 1.55km，干渠 4 条长 54.87km，本研究项目应用实例选择在一干渠控制系统范围内。一干渠全长 35km，设计流量 13m³/s，设计灌溉面积 1.54hm²，占灌区总设计灌溉面积的 67%，一干渠下设支渠 10 条，支渠平均长 7.5km，最长支渠为 13km，各支渠进水口均设有测流装置和水量调节闸，以控制水量大小。应用模型程序计算水稻和旱作物灌水量成果见表 1。

由表 1 可见，1991 年水稻灌溉需水总量为 814mm，泡田用水平均为 128mm，灌水总历时 71d，而旱作物生长期综合灌水量为 406.1mm，灌水总历时为 80d。同灌区以往灌水方法相比，相同年型条件下，以往水稻灌水总量为 1050mm，以往旱作物综合灌水量为 560mm 以上。而采用本文方法灌溉，水稻灌溉可实现节水 22% 以上，旱作物灌溉可实现节水 27% 以上。

表 1 韩董庄灌区一干渠 1991 年作物灌水量与灌溉时间计算成果

Table 1. Computations on crop water requirement and time table in the first main canal of Handongzhuang irrigation area (1991)

灌 溉 日 期		水 稻			旱 作 物		
起	止	供水次数	灌水历时 (d)	灌水量 (mm)	供水次数	灌水历时 (d)	灌水量 (mm)
1991-3-13	1991-3-25				1	13	60.4
4-3	4-16				2	14	60.4
4-22	4-30				3	9	60.4
5-23	5-31				4	9	42.4
6-1	6-8	1	8	128.0			
6-12	6-20				5	9	42.4
6-21	6-29	2	9	98.0	6	9	42.4
7-1	7-9	3	9	98.0	7	9	55.3
7-11	7-18	4	8	98.0	8	8	42.4
7-22	7-31	5	10	98.0			
8-1	8-10	6	10	98.0			
8-11	8-19	7	9	98.0			
9-3	9-10	8	8	98.0			
合	计		71	814.0		80	406.1

一干渠控制 10 条支渠 1992 年 6 月 21 日~30 日一次引水轮灌计划计算结果见表 2, 该时期内水稻、旱作物皆需引水灌溉, 由计算结果知, 引水期要求一干渠以最大过水能力引水, 这有助于缩短轮灌时间、节水、提高灌溉效率。一次轮灌一干渠总运行历时 225h。同以往灌水方法相比, 相同条件下, 以往一次轮灌一干渠总运行历时 24h, 采用本方法可缩短轮灌时间 20% 以上。

表 2 引水轮灌计划成果

Table 2. Irrigation rotation schedule

支渠号	运行流量 (m ³ /s)	开启日期			关闭日期			运行历时	
		月	日	时	月	日	时	(d)	(h)
1	2.50	6	28	9: 00	6	30	10: 00	2	1
2	9.50	6	28	9: 00	6	30	17: 00	2	8
3	4.50	6	26	9: 00	6	28	19: 00	2	0
4	4.50	6	26	9: 00	6	28	10: 00	2	1
5	4.00	6	24	9: 00	6	27	5: 00	2	20
6	3.00	6	24	9: 00	6	27	6: 00	2	21
7	5.00	6	24	9: 00	6	27	7: 00	2	22
8	4.00	6	21	8: 00	6	24	9: 00	3	1
9	3.50	6	21	8: 00	6	24	8: 00	3	0
10	3.50	6	21	8: 00	6	24	9: 00	3	1

注：一干渠平均运行流量：12. 2m³/s； 运行历时：225h。

6 结 语

- (1) 针对灌溉系统供水和水量调配的要求, 基于稻田水量平衡理论和旱作物土壤水分模拟理论建立计算模型, 概念明确、简便易用, 实践证明效果满意。
- (2) 在计算作物需水量编制灌溉计划时, 本文应用了当地气象台站降雨量短期预报值和

其它参数的本时段均值，来预测下阶段土壤水分变化情况和编制灌溉排水计划，并且在下时段取得实测资料后对原计算参数及时订正，既增加了预见期又保证了连续计算的精度。

(3) 实时水量调配计算机程序 (RIWAP) 综合考虑灌溉需水量和水文气象因素及灌溉工程条件，对指导干支渠引水与合理灌溉、提高管理水平和增加灌溉效益具有重要作用。

(4) 为了进一步提高计算机在水量调配中的应用效果，应对灌溉系统做更详细深入的分析研究，如灌区土壤类型划分、不同旱作物需水特性以及计算时段的选取等。

参 考 文 献

- 1 Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation Water Delivery Models. 1994
- 2 FAO Crop Water, 1989, (24)
- 3 康绍忠, 熊运章. 作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究. 水利学报. 1991, (1): 34~39

Research on Irrigation Water Delivery Models

Zhou Zhenmin

(Yellow River Irrigation Bureau, Yellow River Water Conservancy Commission, Xinxiang 453003)

Abstract: This paper mainly deals with water delivery models in the irrigation systems. First, Crop pattern in the irrigation area was categorized into paddy and upland crops. Based on water balance and soil moisture simulation theory, the irrigation water delivery models both for paddy and upland crops were established. Secondly, the parameters in the models such as hydrometeorology, soil and crops were obtained through historic data analysis or field measurement. The studied models can be calculated in real-time basis, and can forecast and revise next irrigation schedule according to real data. Finally, the optimum real-time irrigation schedule were achieved. The optimum canal discharge and irrigation rotation schedule were also studied in the models.

Key words: irrigation model; optimum water delivery; application benefits.