

实时灌溉预报

茆智¹, 李远华², 李会昌³

(1. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100053;
3. 河北省水利技术试验推广中心, 石家庄 050061)

[摘要] 实时灌溉预报是制定动态灌溉用水计划的基础, 对灌区节水, 增加作物产量和提高经济效益起着重要作用。其重点与难点内容是作物需水量实时预报。国内外已有的作物需水量预报方法与模型, 是建立在历史典型水文年资料基础之上的, 无法用于实时预报。文章分析了作物需水量与气象条件和非气象条件(主要是植物条件以及土壤条件)之间的关系, 提出了根据天气类型、作物绿叶覆盖率和土壤有效含水率3项因素进行作物需水量实时预报的方法与模型, 介绍了具体的预报步骤与计算框图, 改进了常规的预报方法, 主要是用预报的天气类型(晴、曇、阴、雨)代替修正彭曼法中所需的气温、空气湿度、日照时数与风速4项气象因素, 用绿叶覆盖率代替叶面积指数, 并提出了新的计算土壤水分修正系数的数学模型。

[关键词] 灌溉; 实时预报; 作物需水量; 灌溉制度

[中图分类号] S274.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)05-0000-00

1 引言

高水平的灌溉用水管理是节约用水, 提高灌区农业产量, 充分发挥灌溉工程效益的重要环节。灌溉用水管理的核心是实行计划用水, 而指导计划用水的依据是用水计划。我国制定的常规用水计划属于“静态”用水计划, 它是根据历史资料, 选定几种典型水文年, 针对典型年的气象、水文情况, 制定出当年的用水计划; 在执行过程中, 再依据当时的气象、水文等情况进行调整。由于这种计划是依据历史资料制定的, 若当年实际的气象、水文情况与典型年差异较大, 则难于有效地指导用水。国内外近年来的实践表明, 采用先进的“动态”用水计划, 可以避免此弊端。用动态用水计划指导灌溉用水, 可达到节水、高产、高效益的目的。动态用水计划是以实时灌溉预报为依据的动态取水、配水与灌水计划, 它是在充分利用实时信息基础上确定的短期计划, 因而比较符合实际, 实用价值较高。

实时灌溉预报是编制与执行灌区动态用水计划

的必要条件, 只有做出实时灌溉预报, 才可能制定出动态用水计划; 实时灌溉预报可靠、准确, 动态用水计划才可能符合实际, 才能发挥指导用水以取得节水、高产、高效益的效果。

实时灌溉预报是以“实时”资料为基础, 即以各种最新的实测资料和最近的预测成果为依据, 通过计算机模拟分析, 逐次预测作物所需的灌水日期及灌水定额。今后灌溉预报的发展趋势是开展实时灌溉预报, 因此研究与应用实时灌溉预报有着重要的理论意义与实用价值。

实时灌溉预报的基础是作物需水量 ET 的实时预报, 提出较可靠、准确、又便于应用的 ET 实时预报方法, 是实时灌溉预报的重点与难点内容。在水资源能够满足作物正常灌溉要求的条件下, 获得 ET 实时预报资料后, 根据降水、地下水补给量等因素的实时预报数据, 通过农田水量平衡分析, 即可进行灌水时间与定额的实时预报。当水资源不能满足正常灌溉条件时, 需根据水源情况以及不同程度缺水对产量的影响, 进行大量的优化分析, 确定

作物优化灌溉制度, 情况比较复杂, 不单单是预报问题。本文仅论述水资源能够满足作物正常灌溉条件下的实时灌溉预报。

2 作物需水量 ET 实时预报

2.1 预报作物需水量 ET 的基本数学模型

在我国, 一般把作物蒸腾量与裸间蒸发量之和(即蒸发蒸腾量)称为作物需水量, 它等于土壤—植物—大气连续体系中水分传输的速率。能影响该体系中水分传输与水气扩散的任何一个过程的任何一种因素, 均能影响 ET 。气象因素, 包括太阳辐射、日照时数、气温、空气湿度与风速等, 是影响 ET 的主要因素。对于一定的作物, 作物因素, 包括品种、生育阶段、生长发育情况等, 由于其影响作物的根系吸水、体内输水和叶气孔水气扩散, 因对 ET 产生影响。土壤含水率影响土壤水向根系传输以及直接向地表传输的速率, 故土壤含水率也是影响 ET 的主要土壤因素。 ET 与这些影响因素的关系可表示为

$$ET = F(S, P, A), \quad (1)$$

式中, ET 为作物需水量; S 为土壤因素; P 为植物因素; A 为气象因素。

根据国内外 ET 试验资料的分析, 上述各因素对 ET 的综合影响, 可以用土壤、植物与气象因素单独对 ET 影响结果之乘积表示^[1]。因此, ET 可表示为

$$ET = F_1(S) \cdot F_2(P) \cdot F_3(A). \quad (2)$$

$F_3(A)$ 为气象因素的影响。根据对中国大多数省分灌溉试验站实测 ET 资料的分析可以证实, 用修正彭曼公式或彭曼—蒙特斯公式计算出的参照作物需水量 ET_0 是表示气象因素影响的最适合参数^[2,3], 因此

$$F_3(A) = ET_0.$$

$F_2(P)$ 为作物因素的影响。国内外大量预测资料表明, 叶面积指数 (LAI) 是影响 ET 的主要植物因素^[4,5]。但是, LAI 难以迅速在大面积上准确地测定, 而实时预报则要求及时地提供此数据, 因而在实时预报中难于直接应用 LAI 求出 $F_2(P)$ 。笔者的观测、研究表明, 作物叶面积指数与绿叶覆盖百分率(覆盖率) LCP 密切相关, 两者相关系数达 0.96 以上^[5,6], 而 LCP 可以在大面积上快速测定, 因此, 可采用 LCP 来计算 $F_2(P)$, 即

$$k_c = F_2(P) = F_2(LCP),$$

k_c 是作物系数。

$F_1(S)$ 为土壤因素的影响。根据土壤水分运移原理, 在实际土壤含水率 (ω) 小于临界土壤含水率 (ω_j) 的条件下, 有效土壤含水率即实际土壤含水率 (ω) 与凋萎系数 (ω_p) 之差是影响 ET 的主要土壤因素, 即

$$k_\omega = F_1(S) = f_1(\omega - \omega_p), (\omega < \omega_j),$$

k_ω 是土壤水分修正系数。临界含水率 ω_j 即“毛管断裂含水率”, 其值取决于土壤质地, 变化于田间持水率的 70% 到 80% 之间^[7]。

当实际土壤含水率不低于临界含水率 ω_j 时, 土壤含水率对 ET 无影响, 即

$$k_\omega = F_1(S) = 1, (\omega \geq \omega_j).$$

综合以上分析, 预报 ET 的基本数学模型为

$$ET = k_c \cdot ET_0, (\omega \geq \omega_j), \quad (3)$$

$$ET = k_\omega \cdot k_c \cdot ET_0, (\omega < \omega_j), \quad (4)$$

$$\text{或 } ET = f_2(LCP) \cdot ET_0, (\omega \geq \omega_j), \quad (5)$$

$$ET = f_1(\omega - \omega_p) \cdot f_2(LCP) \cdot ET_0, (\omega < \omega_j). \quad (6)$$

2.2 参照作物需水量 ET_0 的预报

参照作物需水量 ET_0 简称参照需水量, 是用以反映各种气象条件对作物需水量影响的综合因素。以大量试验研究成果为依据, 目前全世界统一采用“高度一致 (0.12 m), 生长旺盛, 地表完全被绿叶覆盖的开阔 (长、宽均在 400 m 以上) 绿草地”在不缺水条件下的蒸发蒸腾量为参照需水量, 亦即上述条件草地之潜在 (不缺水) 需水量为参照需水量^[8,9]。

根据国际上半个世纪的试验研究, 联合国粮农组织 (FAO) 1979 年推荐用修正的彭曼公式计算 ET_0 ^[9], 该公式理论较完备, 计算精度较高。1998 年, FAO 又推荐用理论上更为完善的彭曼—蒙特斯公式计算 ET_0 ^[8]。在我国全国协作的“全国及各省 (自治、直辖市) 主要作物需水量等值线图研究”和“全国及各省 (自治区、直辖市) 作物需水量及灌溉制度资料整编”项目中, 许多省 (自治区、直辖市) 的研究组对修正彭曼公式与国内外最常用的其他四五种公式进行了比较, 表明用修正的彭曼公式算出 ET_0 后再算出的 ET 精度最高 (精度高于 90% 的数据占 80% 以上)^[2]。根据中国水利水电科学研究院的研究, 修正的彭曼公式与彭曼—蒙特斯公式计算结果十分接近, 两者有良好的线性

关系, 相关系数大于 0.97^[3]。因此, 从实用出发, 本文仍以修正彭曼公式为基础预报 ET_0 。

修正彭曼公式如下^[9]:

$$ET_0 = \frac{\frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{r} R_n + 0.26(1 + B_u u)(e_a - e_d)}{\frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{r} + 1} \quad (7)$$

式中, P_0 与 P 为海平面与预报地点平均气压 (hPa); Δ 为饱和水气压随温度的变率 (hPa/°C); r 为湿度计常数 (hPa/°C); e_a 为饱和水气压 (hPa); e_d 为实际水气压 (hPa); R_n 为净辐射, 以蒸发能力计 (mm/d), 可以用总辐射、日照时数与 e_d 算出; u 为 2 m 高处日平均风速 (m/s); B_u 为风速修正系数。

在一定的地点 (纬度、海拔高程) 和时间 (月份) 里, 利用式 (7) 计算 ET_0 , 需要温度、湿度 (或水汽压)、风速与日照时数 4 项气象因素的数据。对于常规的需水量预报, 可以从历史上典型年

的气象资料取得这些数据, 故完全可以直接采用此公式。但是, 由于短期气象预报中不进行湿度 (或水汽压) 与日照时数预报, 因此, 实时预报中不可能直接用此公式预报 ET_0 。

笔者根据我国一些地区的长期 (20 年以上) 气象记录, 用式 (7) 计算出逐年、逐月的 ET_0 , 将其分月按晴、县 (少云、多云)、阴、雨 4 种天气类型分类统计, 发现在同一地区和相同月份内, 相同天气类型条件下的 ET_0 数值十分稳定^[1,5,6]。对于一个地区, 可以根据长系列气象记录, 应用式 (7) 算出各月晴、县、阴、雨 4 种类型条件下的多年平均 ET_0 数值, 例如, 河北省 3 个县的不同天气类型的 ET_0 多年平均数值 (表 1)^[6]。各地在实时预报中可以直接用当地的这种多年平均值进行 ET_0 预报。我国地理部门也提出过预报蒸发力的类似方法^[10]。

表 1 河北省望都、藁城、临西四种天气类型下多年平均逐月 ET_0

Table 1 Average long term values of monthly ET_0 under four weather types in Wangdu, Gaocheng and Linxi, Hebei Province

月份	不同地区不同天气类型下多年平均 $ET_0/\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$											
	望都				藁城				临西			
	晴	县	阴	雨	晴	县	阴	雨	晴	县	阴	雨
1	0.53	0.39	0.35	0.31	0.49	0.45	0.36	0.25	0.68	0.64	0.44	0.35
2	0.94	0.83	0.69	0.61	1.06	0.88	0.67	0.42	1.03	0.99	0.79	0.48
3	2.06	1.72	1.41	0.90	2.15	1.77	1.22	0.89	2.77	1.97	1.24	1.01
4	4.21	3.09	1.98	1.41	3.76	2.93	2.44	1.29	4.09	3.57	2.84	1.40
5	5.84	4.99	3.70	2.48	4.75	4.50	3.41	1.60	5.07	4.58	3.57	2.00
6	6.30	5.17	4.09	2.93	5.75	5.07	3.87	2.30	6.41	5.21	4.12	2.98
7	5.05	3.94	3.24	2.66	5.16	4.38	3.41	2.29	5.66	4.43	3.28	2.47
8	4.23	3.28	2.56	2.47	4.07	3.48	2.97	1.87	4.44	3.85	2.70	2.10
9	2.88	2.15	1.67	1.41	2.90	2.46	2.19	1.47	3.12	2.68	1.90	1.57
10	1.78	1.52	1.23	0.92	1.85	1.54	1.33	1.11	2.05	1.77	1.42	1.06
11	0.77	0.73	0.67	0.51	0.70	0.60	0.57	0.50	0.89	0.76	0.68	0.49
12	0.46	0.42	0.40	0.29	0.38	0.30	0.19	0.17	0.57	0.53	0.40	0.35

由于天气类型是任何气象站 (点) 短期天气预报中的基本项目, 可以根据预报的天气类型, 用以上方法十分简便、迅速地预报 ET_0 。

2.3 作物系数 k_c 值的确定

我国各省、自治区、直辖市已根据试验资料得

到当地主要作物生育期内各月的 k_c 数值^[2,11], 但对于 ET 的实时预报, 其精度偏低。国内外的研究表明, 用叶面积指数 LAI 按式 (8) 计算 k_c (A 与 B 为随作物而异的常数与系数) 可提高精度^[4,6]。但由于难于在大面积上迅速测定 LAI , 致

使在 ET 实时预报中难于采用式

$$k_c = A + B(LAI)。 \quad (8)$$

笔者的试验研究，探明了作物绿叶覆盖率 LCP 与 LAI 关系密切^[5,6]，其关系为

$$LAI = m(LCP)^n \quad (9)$$

式中 m 与 n 为随作物而变的系数与指数。

例如，对于夏玉米，其关系为 $LAI = 1.48 \times 10^{-4} (LCP)^{2.26}$ (见图 1)。根据式 (8) 与式 (9)，计算 k_c 的模型为

$$k_c = Q + R \cdot (LCP)^n。 \quad (10)$$

式中，Q 与 R 为随作物而变的常数与系数。

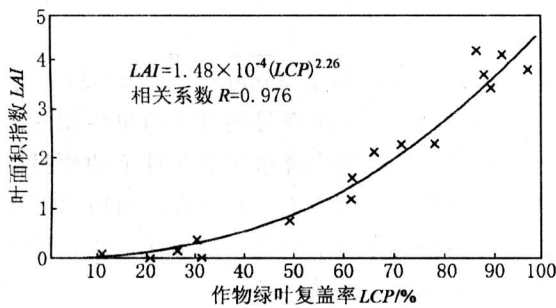


图 1 夏玉米叶面积指数与绿叶覆盖率关系 (河北望都, 1991)

Fig.1 Relationship between leaf area indices and coverage-percentage of leaves for summer maize (Wangdu, Hebei Province, 1991)

根据笔者在湖北、广西等地的试验研究，几种作物的 Q, R 与 n 值如表 2^[5]。

表 2 利用叶覆盖率计算 k_c 的参数数值

Table 2 Values of parameters for calculating k_c by using coverage percentage of leaves

作物	Q	R	n
水稻、小麦	0.85	6.25×10^{-6}	2.25
夏玉米	0.325	2.78×10^{-5}	2.25

用摄影法或光度计法进行 LCP 观测，可迅速取得当时多点（大面积上）的 LCP 数值，该数据完全能够及时地供给实时预报中采用。

2.4 土壤水分修正系数 k_ω 的确定

土壤中，凋萎点（凋萎含水率） ω_p 到田间持水率 ω_c 之间的水分是可以保持在根层内并能被植物吸收利用之有效水分。土壤含水率 ω 在临界含水率（毛管断裂含水率，一般为 ω_c 的 70% ~

80%，随土质而变） ω_j 与 ω_c 之间时，土壤水分可藉毛管作用充分供给蒸发、蒸腾之需要，土壤含水率之高低不影响蒸发蒸腾，即 $k_\omega = 1$ 。土壤含水率小于临界含水率时，由于土壤水分运移阻力的作用，土壤水分运移的实际速率小于充分满足蒸发蒸腾所需的速率，致使蒸发蒸腾量随着土壤含水率之降低而降低， $k_\omega < 1$ 。

针对土壤含水率低于临界含水率的范围，国内外许多学者推荐计算 k_ω 的模型为 $k_\omega = (\omega - \omega_p) / (\omega_j - \omega_p)$ ，此模型表示在 $\omega = \omega_p$ 时 $k_\omega = 0$ ，但实际上此时存在土壤蒸发，故此式不很合理。笔者通过在河北、广西等省（自治区）的试验研究，对此式进行了改正，提出 k_ω 与土壤含水率的关系为^[6]

$$k_\omega = a + b \left(\frac{\omega - \omega_p}{\omega_j - \omega_p} \right) \quad \omega_p \leq \omega < \omega_j, \quad (11)$$

式中， ω , ω_p 与 ω_j 分别为实际土壤含水率、凋萎含水率与临界含水率（单位均为占干土重的百分比），a 与 b 分别为常数与系数， $a = 0.03 \sim 0.07$ ， $b = 0.86 \sim 1.00$ ，随土质而变，可通过分析已有的土壤水分与需水量观测资料而确定，例如根据 1986 年河北省几个灌溉试验站的观测资料分析^[6]，望都站 $a = 0.038$ ， $b = 0.987$ ；藁城站 $a = 0.065$ ， $b = 0.887$ ；临西站 $a = 0.068$ ， $b = 0.89$ 。

2.5 作物需水量实时预报的计算

2.5.1 预报时期内无降水无地下水补给的情况

某一时段内的作物需水量 ET 等于该时段内根系吸水层中土壤储水量的减少值，即

$$ET = -10rH \frac{d\omega}{dt}, \quad (12)$$

式中，r 为土壤容重 (t/m^3)，H 为根系吸水层深度 (m)， ω 为 H 深度内的平均土壤含水率（占干土重 %），t 为时间 (d)，ET 的单位为 mm。

将式 (4) 代入式 (12)，可得

$$k_\omega \cdot k_c \cdot ET_0 = -10rH \frac{d\omega}{dt}。 \quad (13)$$

1) 时段初土壤含水率 ω_0 和时段末含水率 ω 均不小于 ω_j 时， $k_\omega = 1$ ，代入式 (13) 后积分可得

$$\sum_0^t ET = 10rH(\omega_0 - \omega) = k_c \cdot \int_0^t ET_0 dt, \quad (14)$$

逐日、逐旬预报的条件下，可用 $\sum_0^t ET_0$ 代替

$\int_0^t ET_0 dt$ ，则预报需水量的模型为

$$\sum_0^t ET = k_c \cdot \sum_0^t ET_0, \quad (15)$$

k_c 由式 (10) 确定 (下同)。

2) ω_0 小于 ω_j 时, 预报 ET 的模型为

$$\sum_0^t ET = 10rH(\omega_0 - \omega), \quad (16)$$

其中, ω 用以下方法确定:

将式 (11) 代入式 (13) 推导得

$$\omega = (\omega_0 - \omega_p) e^{\frac{bk_c \sum_0^t ET_0}{10rH(\omega_j - \omega_p)}} - \frac{a \cdot k_c \sum_0^t ET_0}{10rH} + \omega_p. \quad (17)$$

3) $\omega_0 \geq \omega_j$, $\omega < \omega_j$ 时, 先计算出土壤初始含水率 ω_0 到 ω_j 达所需时间 t'

$$t' = \frac{10rH(\omega_0 - \omega_j)}{(k_c \cdot \sum_0^t ET_0)/t}, \quad (18)$$

若 $t \leq t'$, 用式 (15) 计算 $\sum_0^t ET$; 若 $t > t'$, 对于 $0 \sim t'$ 时段, 按式 (15) 模型计算此时段内的 $\sum_0^{t'} ET$; 对于 $t' \sim t$ 时段, 按式 (16) 和式 (17) 模型计算此时段内 $\sum_{t'}^t ET$, 全部预报时期内需水量为

$$\sum_0^t ET = \sum_0^{t'} ET + \sum_{t'}^t ET. \quad (19)$$

2.5.2 预报时期内有降水无地下水补给的情况

设在第 n 天降水, 有效降水量为 p_0 (mm), 将 $0 \sim t$ 划分为 $0 \sim n$ 、 $n \sim t$ 两个时段。

1) $\omega_0 < \omega_j$ 时, 对于 $0 \sim n$ 时段, 按式 (16)

和式 (17) 模型计算 $\sum_0^n ET$; 对于 $n \sim t$ 时段, 先计算雨后土壤含水率 ω'_0 (干土重百分比),

$$\omega'_0 = \omega + p_0/10rH, \quad (20)$$

其中, ω 按式 (17) 算出, 但需以 $\sum_0^n ET_0$ 代替该

式中的 $\sum_0^t ET_0$ 。若 $\omega'_0 \leq \omega_j$, 按式 (16)、式 (17) 模式计算 $\sum_n^t ET$; 若 $\omega'_0 > \omega_j$, 则以 ω'_0 为新的时段起点, 按 2.5.1 3) 的方法及其模型计算 $\sum_n^t ET$, 对全部预报时段 t 则

$$\sum_0^t ET = \sum_0^n ET + \sum_n^t ET. \quad (21)$$

2) $\omega_0 \geq \omega_j$ 时, 对于 $0 \sim n$ 时段, 按 2.5.1

3) 的方法及模型计算 $\sum_0^n ET$; 对于 $n \sim t$ 时段, 先用式 (20) 计算 ω'_0 , 再根据 $\omega'_0 < \omega_j$ 或 $\omega'_0 \geq \omega_j$ 的条件, 分别用式 (16) 和式 (17) 或用 2.5.1

3) 中的方法与模型计算 $\sum_n^t ET$, 最后用式 (21) 计算 t 时期内的需水量。

若降水后土壤含水率 ω'_0 超过田间持水率 ω_c , 除按上述方法与模型计算预报时期内需水量

$\sum_0^t ET$ 外, 还需算出深层渗漏量, 以供灌溉预报中采用。深层渗漏量用以下模型计算,

$$F = 10rH(\omega'_0 - \omega_c), \quad (22)$$

式中, F 为深层渗漏量 (mm), ω_c 为田间持水率 (占干土重的%), 其余符号的意义与单位如前。

以上是在 t 时期内降水 1 次条件下的预报需水量的方法与模型。实际上, 有时在 t 时段内降水多次, 则可根据实际降水情况, 将多次的小量降水进行概化, 归并为 1 次或数次, 以各次降水日期为时段划分点, 按以上方法计算各时段需水量, 最后将其累积, 得到预报时期需水量。

2.5.3 预报时期内有地下水补给的情况 设 $0 \sim t$ 时段内地下水补给量为 $G = k \cdot ET$, 其中 k 是地下水补给系数 (%), 为地下水补给量占蒸发蒸腾量的百分数, 取决于地下水埋深、土质、作物及其生育期, 由试验站提供。

式 (12) 变为

$$ET \left(1 - \frac{k}{100}\right) = -10rH \frac{d\omega}{dt}. \quad (23)$$

令 $\beta = 1 - \frac{k}{100}$ 并将式 (4) 代入式 (23) 得

$$\beta \cdot k_\omega \cdot k_c \cdot ET_0 = -10rH \frac{d\omega}{dt}, \quad (24)$$

可见, 只要在式 (15)、式 (17) 与式 (18) 的 k_c 前乘以 β , 就可用无地下水补给情况下的计算公式

求得此条件下需水量 $\sum_0^t ET'$, 则该时段内的实际需水量为

$$\sum_0^t ET = \sum_0^t \left(\frac{ET'}{\beta}\right), \quad (25)$$

式中, ET' 为无地下水补给条件下需水量 (mm)。

2.6 作物需水量实时预报步骤

2.6.1 旱作物需水量实时预报步骤 应用以上计算方法, 预报步骤如下:

1) 针对预报地区的土壤、作物与生育阶段,

搜集以下资料: $r, H, \omega_p, \omega_j, \beta$;

2) 根据当地或条件类似地区灌溉试验资料, 分析确定当地不同月份与不同天气类型条件下 ET_0 数值以及式 (10) 中 Q, R 与 n 数值与式 (11) 中 a, b 数值;

3) 预报时段初, 在典型农田上观测 LCP 及土壤含水率 ω_0 , 上一时段末的 ω 为下一时段的 ω_0 ;

4) 根据气象预测中所预报的天气类型 (晴、曇、阴、雨), 用 2.2 节所介绍的方法, 在预报时期内, 逐日计算 ET_0 ;

5) 根据预报时段内的 LCP , 用 2.3 节所介绍方法计算 k_c ;

6) 若预报时期内无降水, ω_0 与 ω 均不小于 ω_j , 用式 (15) 计算需水量进行预报;

7) 若预报时期内无降水, $\omega_0 < \omega_j$, 用式 (16) 计算需水量进行预报, 该式中的 ω 用式 (17) 算出;

8) 若预报时期内无降水, $\omega_0 \geq \omega_j, \omega < \omega_j$, 按式 (18) 计算 t' , 将 $0 \sim t$ 划分为 $0 \sim t'$ 与 $t' \sim t$ 两个时段, 用本文中 2.5.13) 中的方法算出各个阶段需水量, 将各阶段需水量之和进行预报;

9) 若预报期内有降水, 则按照 ω_0 的不同范围, 根据预报的降水日期及降水量资料, 用 2.5.2 中模型及方法进行预报;

10) 有地下水补入根层的条件下, 仍按以上步骤进行计算与预报, 只是需要在计算与预报过程中, 用无地下水补给条件下的 ET 与 β 的乘积或者 ET 与地下水补给量之差代替无地下水条件下的

ET ; $\beta = 1 - \frac{k}{100}$, k 为地下水补给量占需水量的百分比, 我国有大量的地下水补给量试验研究成果, 可按地下水埋深、土质、作物种类与 H 资料, 根据这些试验成果确定 k 的数值。

2.6.2 水稻需水量预报步骤 水稻广泛采用浅水淹灌或其他节水高产的灌溉方式。在这些灌溉方式下, 水稻全生育期内除晒田末期以及黄熟期的少数天数外, 其余时期内稻田土壤含水率不低于临界含水率; 而晒田末期及黄熟期又是不需灌溉也就是不必预报 ET 的阶段。故对于需要预报 ET 的阶段, 水稻的需水量基本上不受土壤含水率的影响, 即 $k_\omega = 1$ 。因此, 对于水稻 ET 的预报, 取得 LCP 资料后, 只需采用旱作物需水量预报中的第 2)、第 4)、第 5) 和第 6) 步骤。

2.7 作物需水量实时预报的计算机框图及说明

计算框图见图 2。其中 K 为时段序号, N 为时段个数, T 为月份, TD 为时段内的总天数, PD 为时段内降水前的天数, $TI = t'$, TI 为降水后的天数, $IO = 10rH$, $x = \left[\frac{\omega - \omega_p}{\omega_j - \omega_p} \right]$, EO, OE 和 EI 分别表示不同时段 ET_0 , 可根据月份 T 和晴、曇、阴、雨的代号 (分别用 1、2、3、4 表示) 由计算机自行查表计算, 表中其余符号的意义与正文中的相同。

在 TI 时段内, $\omega_0 > \omega_j$, 蒸发蒸腾量仅受气象条件的影响和作物特性的制约, 与土壤含水率无关, 由 k_c 乘以 TI 时段内的 ET_0 求得。若 TI 时段内有降水, 降水前的蒸发蒸腾量已计算在 $k_c \cdot ET_0$ 中, 此处无需计算, 故为 EO 赋零。若 TI 大于时段总天数 TD , 则降水后的蒸发蒸腾量也不需计算, 已由 $k_c \cdot ET_0$ 计入。另外, 超过田间持水量的降水量作为渗漏量, 并输出。

受计算模型复杂性的限制, 划分时段时, 使一个时段内只包括一次降水, 预报中, 可把多次小雨雨量相加, 概化为一次降水。

3 作物灌水日期与灌水定额实时预报

3.1 旱作物灌水日期与灌水定额预报

对于旱作物, 无灌溉条件下, 若无地下水补给量, 田间水量平衡方程如式 (26), 水量平衡因素如图 3。

$$10rH\omega_t = 10rH\omega_0 + \sum_0^t P_0 - \sum_0^t ET, \quad (26)$$

式中, ω_t 为第 t 日作物根系吸水层 (深度为 H) 中平均土壤含水率 (占干土重%, 下同); ω_0 为预报时段初土壤含水率; P_0 为有效降水量 (mm); 其余符号的意义与单位如前相同。

为了满足农作物正常生长发育的需要, 任一时段内作物根系吸水层内的储水量必须经常保持在一定的适宜范围以内, 即通常要求土壤湿润层平均土壤含水率不小于作物允许的最低含水率 (ω_{\min}) 和不大于作物允许的最高含水率 (ω_{\max})。预报灌水时, r, H, ω_0 及土壤适宜含水率上限 ω_{\max} 与下限 ω_{\min} 均已知, 根据天气预报, 按 2.5 节方法, 可从第 1 日起, 逐日求出累积的 P_0 与 ET , 即

$$\sum_0^t P_0 \text{ 与 } \sum_0^t ET, \text{ 运用式(26), 逐日求 } \omega_t.$$

ω_t 降到 ω_{\min} 的日期即为适宜的灌水日期。

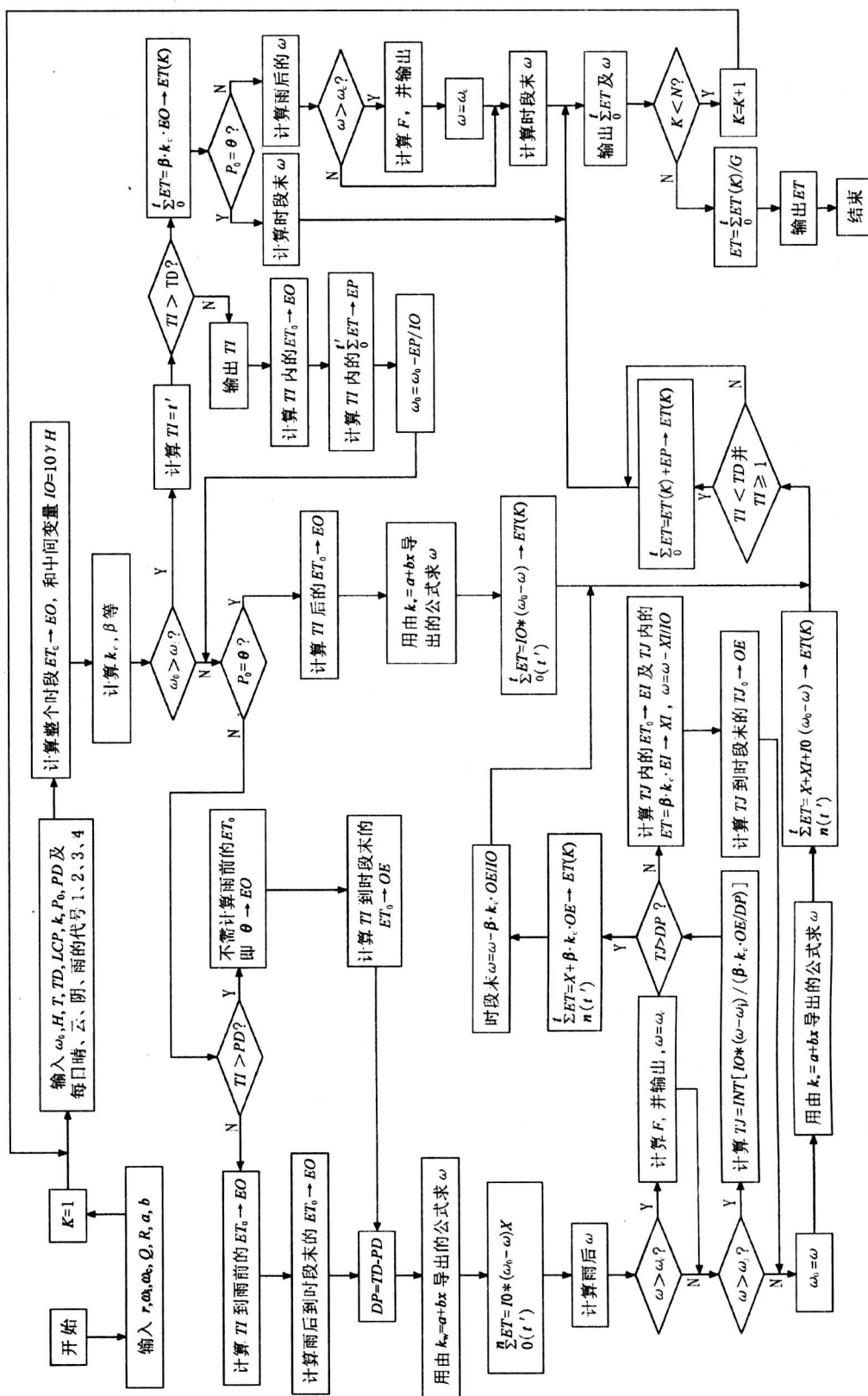


图 2 需水量实时预报计算机框图

Fig. 2 Computer frame diagram of real-time forecast of evapotranspiration

灌水定额为

$$m = 10rH(\omega_{\max} - \omega_{\min})(\text{mm}), \quad (27)$$

一般, ω_{\max} 取为田间持水率。

若当地有地下水补给量, 补给系数为 k , 或每日补给量为 g (mm), 只要将前述旱作条件下各种计算中的 $\sum_0^t ET$ 换成 $\sum_0^t (\beta ET)$ 或 $\sum_0^t (ET - g)$, 即可完全按以上方法预报灌水日期与灌水定额, 其中 $\beta = 1 - \frac{k}{100}$ 。

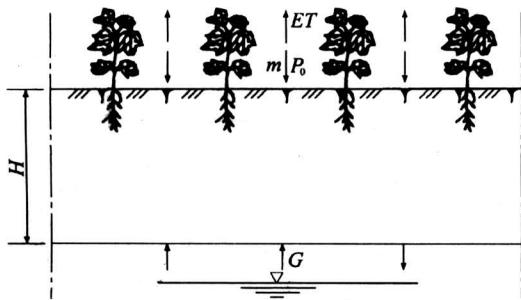


图 3 旱田土壤湿润层水量平衡参数示意图
Fig.3 Diagrammatic sketch of the factors of water balance in root zone of dry foot crops

3.2 水稻灌水日期与灌水定额预报

对于水稻田, 无灌溉时, 可列出以下稻田水量平衡方程式:

$$h_t = h_0 + \sum_0^t P_0 - \sum_0^t ET - \sum_0^t f. \quad (28)$$

式中, h_t 为第 t 日田面水层深度 (mm); h_0 为预报时段初田面水层深度 (mm); $\sum_0^t P_0$ 、 $\sum_0^t ET$ 与 $\sum_0^t f$ 分别代表 t 时段内的有效降水量、需水量与渗漏量 (mm)。

在进行灌水预报时, 根据各监测稻田 (代表性稻田) 的水层深度资料确定 h_0 , 根据天气预报确定预报期内每日的 P_0 , 根据灌溉试验成果确定每日的 f 以及阶段适宜水层深度上限 h_{\max} (mm) 与下限 h_{\min} (mm), 按 2.5 节方法计算每日的 ET , 逐日累积 P_0 , ET 与 f , 用式 (27) 计算逐日的 h_t 。当 h_t 下降到 h_{\min} 时的日期即为适宜灌水日期。

水稻灌水定额为

$$m = h_{\max} - h_{\min}. \quad (29)$$

3.3 预报的精度与效果

从 3.1 和 3.2 节内容可知, 预报的作物需水量

是预报灌水日期与灌水定额所依据的基本数据, 作物需水量预报的精度直接影响到灌水日期、灌水次数、灌溉定额的预报精度。作者用本文介绍的预报需水量方法计算了河北省望都、藁城与临西三个灌溉试验站 1985—1993 年冬小麦、夏玉米各阶段的需水量^[5,6], 共 129 组数据, 与实测值进行比较, 88% 的计算成果精度在 80% 以上。此外, 还计算了河北唐海水稻试验站 1991 年 7 月份连续 22 天的逐日需水量, 与实测值相比, 全部成果的精度在 85% 以上, 90% 的成果精度在 89% 以上, 80% 的成果精度在 99% 以上。以上对需水量的计算, 依据的是实际的天气类型, 不是预报结果。当前, 在 1~3 天的短期气象预报中, 对天气类型预报的可靠性已达 90%, 考虑到天气类型预报可靠性 (90%) 的影响, 用上述方法预报需水量, 对于旱作物, 80% 的预报精度在 80% 以上; 对于水稻, 90% 的预报精度在 85% 以上, 81% 的预报精度在 89% 以上, 72% 的预报精度在 99% 以上。

以上结果表明, 水稻需水量预报的精度高于旱作物。无论水稻还是旱作物的需水量, 由于受到气象、作物本身生育性状及土壤水分条件的影响, 很难预报得十分准确, 上述预报精度已可以满足灌溉日期、定额预报的要求。

对于灌水日期、定额预报的精度与预报效果, 仍以河北省望都、藁城、临西三个试验站 1985—1993 年的冬小麦资料说明^[6]。用本文介绍的预报方法确定灌水日期、灌水定额, 在中等年、中湿年与湿润年, 预报的灌水日期和定额与实际情况吻合; 在中早年、干旱年, 预报的灌水定额吻合, 预报的灌水日期后移, 结果是全生育内预报的灌水次数比实际 (3~5 次) 少 1 次, 灌溉定额减少 20%~25%。因此, 当地认为, 按此法进行的实时灌溉预报指导冬小麦灌水, 可起到节水、增产作用。从 20 世纪 90 年代中期起, 石家庄市、保定市按此法在每次灌水前通过报纸、广播与电视发布冬小麦分次灌水预报, 并大量地培训推广、应用此预报技术的人才来开展预报工作。据该两市不完全统计, 由于推广此预报技术, 1993 年至 1999 年, 已促进节水 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、增产粮食 $8.9 \times 10^4 \text{ t}$ 。湖北省漳河灌区 (水稻田面积 $14.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$) 在 1999 年、2000 年用以上方法进行水稻实时灌溉预报, 每 10 天之初预报未来 10 天的灌水日期及灌水定额, 并依据此预报成果制定动态用水计划, 确定未来 10

年里各主要渠道的操作计划,以此指导渠系用水。据该工程管理局调查、统计,采用动态用水计划后的1999年、2000年与采用前的1996年、1997年(气象、水文条件与1999年、2000年相似)相比,平均每年节水 $5.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、增产粮食 $1.5 \times 10^4 \text{ t}$ ^[12~14]。两省的实践表明,实时灌溉预报对促进节水、高产有显著效果。

4 结语

1) 作物灌溉实时预报是编制动态用水计划的基础,在高水平的用水管理中需要这种预报。随着对灌区节水、高产、高效益和改善水、土环境要求的不断提高,要求用水管理的科技水平不断提高,并逐步实现用水管理现代化,也随着先进管理设施(如通信设施、有关参数观测设施、电脑等)的不断完善与充实,更需要也更有条件开展这种预报。当前,我国已有少数灌区开展实时灌溉预报,并取得显著的节水、增产效果,今后在我国将会有越来越多的灌区开展这种预报。

2) 作物需水量实时预报是作物灌溉实时预报的基础,国内外已有的预报作物需水量方法与模型是建立在采用历史(典型年或多年平均)资料基础上的,无法用于实时预报。因为有的方法与模型考虑因素不全面或过于简单,预报精度低;若采用因素较全面的方法与模型,有些因素无法取得实时的数值,如预报时期内的空气湿度、日照时数等,有些因素难于在预报前通过迅速测定而及时取得大面积上的数值,如叶面积指数。本文根据作物需水量与天气类型、土壤含水率、作物绿叶覆盖率的密切关系,提出了依据此三种因素进行作物需水量实时预报的方法与模型。在这种方法与模型中,考虑的因素较全面,所需因素与参数易于取得实时数值,运用比较简便,如以天气类型代替改进彭曼公式中的4种气象因素,以绿叶覆盖代替叶面积指数,改进了用土壤含水率计算土壤水分修正系数的模型等。通过实际应用与检验,预报的可靠性与精度较高。

3) 实时作物灌溉预报的可靠性与精度,除与气象预报的可靠性与精度密切有关外,还受到土壤水分基本参数(如凋萎含水率、临界含水率、田间持水率等)、实时观测的参数(如初始土壤含水率、作物绿叶覆盖率等)和模型中的常数、系数与指数

的可靠性与精确度的影响,这些参数、常数、系数与指数,系由灌溉试验站(点)的观测试验而取得,因此,要有效地开展实时灌溉预报,必须有灌溉试验站(点)为其开展观测、试验工作和提供所需的数据。在我国,为了有效地开展实时灌溉预报和提高用水管理水平,迫切需要做好全国灌溉试验站网规划和调整、恢复、巩固、改进、提高我国灌溉试验站(点)的工作。

参考文献

- [1] Mao Zhi, Forecast of crop evapotranspiration[J]. ICID Bulletin, 1994, 43(1):23~36
- [2] 茆智,李远华.作物需水量等值线图的原理、绘制与应用[J].水利学报,1988,(1):1~12
- [3] 刘钰,蔡林根,Pereira L S, et al.参照腾发量的新定义及计算方法对比[J].水利学报,1997,(6):27~33
- [4] 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其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.129~131.38~63
- [5] 茆智,李远华,李会昌.逐日作物需水量预测数学模型研究[J].武汉水利电力大学学报,1995,(3):总253~259
- [6] 李会昌.节水条件下旱作物灌溉预报原理与应用研究[D].武汉:武汉水利电力大学,1994.38~63
- [7] 斐步祥.蒸发和蒸散的测定与计算[M].北京:气象出版社,1989.103~104
- [8] Allen R G, Pereira L S, Rase D, et al. Crop evapotranspiration[D]. FAO irrigation and drainage paper. No. 56, 1998.23~28
- [9] Frere M, Popov G F. Agrometeorological crop monitoring and forecast[D]. FAO plant production and protection paper,1979
- [10] 吴厚水.根据潜在需水量进行灌溉用水预报[J].水利学报,1982,(1):1~9
- [11] 中国主要农作物需水量等值线图协作组.中国主要农作物需水量等值线图研究[M].北京:中国农业出版社,1993.3~18
- [12] 茆智,崔远来,董斌,等.水稻高效节水与持续高产的灌排技术[R].武汉:武汉大学,2001.57~86
- [13] 李远华,崔远来,杨常武,等.漳河灌区实时灌溉预报研究[J].水科学进展,1997,(1):71~77
- [14] 李远华.实时灌溉预报及应用[J].水利学报,1994,(2):46~51

Real-time Forecast of Irrigation

Mao Zhi¹, Li Yuanhua², Li Huichang³

(1. *Water Resources College, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

2. *National Center of Irrigation and Drainage Development, PRC, Beijing 100053, China;*

3. *Irrigation Experiment Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050061, China)*

[Abstract] The real-time forecast of irrigation is one of the essential part of the work for compiling a dynamic plan of irrigation water use. It plays an important role in saving water, increasing crop yields and economic benefits in an irrigation area. The real-time forecast of water requirements of crops is the essential and difficult part in the real-time forecast of irrigation. The methods and models for the conventional forecast of crop water requirement, applied both in China and the world, are based on the application of the historic data from typical hydrologic years. They can not used for the real-time forecast. In this paper, on the basis of the analyses of the relationship between the crop water requirements and the meteorological factors and non-meteorological factors such as the factors of plant and soil, the method and models for the real-time forecast of crop water requirements based on the factors of weather types, leaves cover percentage and effective soil moisture are presented and recommended. The concrete steps and computer block diagram are introduced. The main improvements are that the weather type is used instead of such four meteorological factors in Modified Peman's Equation as air temperature, humidity, sunshine hour and wind speed, the leaves cover percentage is used instead of the leaves area index, and an improved equation for calculating soil moisture correction coefficient is proposed. Based on the results of the real-time forecast of crop water requirement and precipitation, the real-time measurement of soil moisture (for dry food crops fields) or depth of water layer (for paddy fields) and the maximum and minimum values of soil moisture content or water depth for getting high yields and saving water, and the calculation of field water balance, the method and models of real-time irrigation forecast including the real-time forecast of the date and quota of irrigation for both dry food crops fields and paddy fields are presented. In this paper, the precision of the real-time forecast and its effects on increasing yield and saving water are also introduced and discussed.

[Key words] irrigation; real-time forecast; evapotranspiration; irrigation schedule

《中国工程科学》2002 年第 4 卷第 6 期要目预告

- | | | | |
|----------------------------------|------|---------------------------------|------|
| 材料的成形加工与凝固技术 | 介万奇 | 连续粘变条件下的速度场分析 | 曲庆文等 |
| 单自由度平面闭链机构构型方法的研究 | 张美麟等 | 中国干旱地区未来大气降水变化趋势分析 | 高庆先等 |
| 中国的小岩体岩浆矿床 | 汤中立 | 用于微电子机械系统封装的体硅键合技术和薄膜密封技术 | 王渭源等 |
| 平顶激光脉冲在非均匀介质中的传输分析 | 张少军等 | 并联构型装备的研究进展及若干关键技术 | 汪劲松等 |
| 超导磁储能系统在舰船电力系统中的应用前景及其关键课题 | 戴陶珍等 | 易凝高粘原油管输技术及其发展 | 张劲军 |
| 大跨经悬索桥地基基础安全监控模型的研究思路及技术路线 | 陈志坚等 | 复杂耦合系统的统计能量分析及其应用 | 盛美萍 |
| PCI 总线在数控激光加工系统中的应用 | 张国顺等 | 变形速率比值判据与猫山隧道工程验证 | 李世辉等 |
| 现代建模与优化技术研究 | 付 强 | | |