

作物需水量预报的优化模型

胡彦华 熊运章

(西北农业大学水利与建筑工程系, 陕西杨陵·712100)

S274.1

A

摘 要 作物需水量预报是灌区土壤墒情预报和灌溉预报的基础。通过对关中泾惠、洛惠和交口抽渭灌区气象资料的分析,用彭曼法计算了历史潜在蒸散量 ET_0 ,利用因子分析法建立了灌区作物需水量随气温、天气而变化的 ET 预报模型,对建立的每月六种模型作进一步的相关分析、符合性、显著性检验,进而由综合评判优选出了适合于灌区 ET 预报的数学模型,开发了作物需水量预报模型建立与优化的通用计算机软件。

关键词 作物需水量, 预报模型, 多元回归, 计算机应用

中图分类号 S274.1

作物需水量预报
计算机

作物需水量预报是灌区土壤墒情预报和灌溉预报的首要条件,也是灌区进行灌溉用水管理的基础。

作物需水量 ET 的计算通常是在计算潜在蒸散量 ET_0 后乘以作物系数 K_c 得到,则确定作物需水量的关键是求得潜在蒸散量。为了建立灌区作物需水量预报的数学模型,可在分析研究灌区历史气象资料的基础上,应用彭曼公式,计算出逐年各月的历史 ET_0 值,选择较易得到的气象数据作为预报因子,求得潜在蒸散量预报模型,进而便可得到作物不同生育阶段的作物需水量预报值。

1 潜在蒸散量的计算

潜在蒸散量 ET_0 的推求,利用联合国粮农组织推荐的改进彭曼公式^[1]:

$$ET_0 = C \cdot [W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (E_a - E_d)] \quad (1)$$

式中: W ——与温度有关的权重系数;

C ——补偿白天与夜晚天气条件所起作用的修正系数;

R_n ——按等效蒸发量计算的净辐射量(mm/d);

$f(u)$ ——与风速有关的风函数;

$(E_a - E_d)$ ——在平均气温中,空气的饱和水汽压与实际平均水汽压之差(mb)。

这些参数除 E_d 值可直接采用该区气象资料外,其他参数均须根据灌区自然、地理条件及气象资料查表^[1],或由灌区基本气象资料(如温度、相对湿度、日照时数、风速、空气水汽压等)进行计算。

为了便于计算机处理,首先对文^[1]给出的计算图表应用“实验数据处理系统”进行公式化处理,其结果如下:

(1)不同高程 FG 的风速修正系数 F 的计算公式:

收稿日期:1993-03-22
水利部资助课题

10/57

$$F = 1.15845FG^{-0.19541} \quad (2)$$

相关系数: $R=0.9975$; 标准误差: $Se=0.02$.

(2)按平均气温 T 和海拔高程 H 计算的权重函数 W 公式:

$$W = 0.39137 + 0.01785T - 0.00016T^2 + 0.00003H \quad (3)$$

相关系数: $R=0.9998$; 标准误差: $Se=0.0001$.

(3)按平均气温 T 计算的饱和水汽压 Ea 公式:

$$Ea = 178.753 / [1 + \exp(3.34428 - 0.07309T)] \quad (4)$$

相关系数: $R=0.9996$; 标准误差: $Se=0.03$.

(4)按不同月份 Y 计算的最大可能日照时数 N_2 公式:

$$N_2 = 8.4097 + 1.7099Y - 0.1359Y^2 \quad (5)$$

相关系数: $R=0.9455$; 标准误差: $Se=0.053$.

(5)按纬度 L 和月份 Y 计算的大气顶辐射量 R_a :

$$R_a = 6.0694 - 0.0019L^2 + 3.9852Y - 0.3175Y^2 \quad (6)$$

相关系数: $R=0.9625$; 标准误差: $Se=0.01$.

(6)温度 T 对长波辐射影响 F_t 的计算公式:

$$F_t = 83.97 / (1 + \exp(1.88876 - 0.0166T)) \quad (7)$$

相关系数: $R=0.9999$; 标准误差: $Se=0.017$.

(7)按白天风速 U_1 与夜晚风速比 U 、最大相对湿度 $Rh\%$ 和太阳辐射量 R_s 计算的修正系数 C 公式:

$$\begin{aligned} C = & 0.63684 + 0.00554Rh - 0.00003Rh^2 \\ & + 0.00036Rh \cdot U_1 - 0.08968U_1 - 0.00046U_1^2 \\ & + 0.0033U_1 \cdot R_s + 0.02219R_s - 0.00049R_s^2 \\ & + 0.00027Rh \cdot U + 0.00901U \cdot U_1 \end{aligned} \quad (8)$$

相关系数: $R=0.9916$; 标准误差: $Se=0.03$.

其他参数可由文^[4]所提供的相应公式进行计算:

(8)水汽压 Ed 对长波辐射影响 Fe 的计算公式:

$$Fe = 0.34 - 0.044 \sqrt{Ed} \quad (9)$$

(9)平均日照时数与最大日照时数百分比(N_1/N_2)对长波辐射影响 Fh 的计算公式:

$$Fh = 0.1 + 0.9(N_1/N_2) \quad (10)$$

(10)按平均气温计算的实际水汽压:

$$Ed = Ea \cdot Rh \quad (11)$$

(11)在反射率 $\alpha=0.25$ 和不同实际的与最大的日照小时数比值(N_1/N_2)情况下,大气顶太阳辐射量 R_a 换算为净辐射量 R_{ns} 的计算公式:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)[0.25 + 0.5 \times (N_1/N_2)]R_a \quad (12)$$

(12)长波辐射量的计算公式:

$$R_{nl} = F_t \cdot Fe \cdot Fh \quad (13)$$

(13)按等效蒸发量计算的净辐射量:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (14)$$

(14) 风函数计算公式:

$$f(u) = 0.27 \left(1 + \frac{F \cdot V}{100} \right) \quad (15)$$

利用以上各式,根据灌区历史气象资料,即可求得逐年逐月的历史 ET_0 值。

2 潜在蒸散量预报模型的建立

在求得某灌区逐年各月的历史 ET_0 值后,选择较易得到的气温、天气指数作为预报因子,建立作物在不同月份的潜在蒸散量预报模型,即:

$$ET_0 = f(T, C_L) \quad (16)$$

式中: T ——月平均温度($^{\circ}\text{C}$); C_L ——以月平均云量为标志的天气指数。

天气(阴晴)指数 C_L 以云量为标志:

$C_L=1$	晴天	$C_L=2$	晴转少云
$C_L=3$	晴天薄云	$C_L=4$	晴天间多云
$C_L=5$	多云	$C_L=6$	多云间阴
$C_L=7$	阴天	$C_L=8$	阴雨

以月(旬)平均云量为标志的天气指数 C_L 与日照的百分比 N_1/N_2 有密切的关系。其关系式为:

$$C_L = 8.915671 - 5.3798(N_1/N_2) - 3.19421(N_1/N_2)^2 \quad (17)$$

依此对历史资料中的各月平均云量进行计算,求得各月平均云量 C_L 值。

再以温度 T 和阴晴指标 C_L 为自变量,以 ET_0 为因变量,进行回归计算,即可得到历史各月的二元线性回归方程,二次多项式回归方程和连乘式回归方程。进而分别进行逐步回归计算,又可得到三种逐步回归方程。即每月可得到六个预报模型。通过对陕西省交口抽渭灌区、泾惠渠灌区、洛惠渠灌区的 20 年气象资料的分析,分别求得各月潜在蒸散量预报的数学模型,见表 1(仅列出其中五、六月份数据)。

3 潜在蒸散量预报模型的综合评判

由表 1 可见,对于不同灌区、不同月份有不同的预报模型,即使在同一个月也有 4~6 种模型可选。为了从众多的 ET_0 预报模型中选出最佳方程,在 ET_0 预报模型建立程序中计算了各式的相关系数 R 、 F -检验、标准误差 S_e 、拟合优度(拟合性)检验 χ^2 及信息判据 AIC ,以便综合评判,择优选择其最佳 ET_0 预报模型。

从评判指标可以看出:

1) 除个别月份的几个回归方程的相关系数稍微偏低以外,绝大部分的相关系数都大于 0.9,说明回归方程与样本拟合密切,回归方程具有较高的使用价值。

2) 通过对三个灌区 216 个回归方程的 F 检验计算,仅有一个方程的 $\alpha=0.05$,呈较显著水平,其余 215 个回归方程均呈极显著水平($\alpha=0.01$),说明回归方程具有相当高的可靠性。

表1 关中三灌区潜在蒸散量预报模型比较

灌月 年份	预 报 模 型		相 关	F 检	标 准	符 合 性	显 著 性
区 份	模型类型	经验公式	系 数	验 值	误 差	检 验	检 验
交口抽渭灌区	线性回归	$ET_0 = 2.6678 + 0.1198T - 0.3638C$	0.9578	94.27	0.1178	0.0741	-24.88
	线性逐步回归	$ET_0 = 2.6678 + 0.1198T - 0.3638C$	0.9578	94.27	0.1178	0.0741	-24.88
	五 多项式回归	$ET_0 = -6.8725 + 1.0749T - 0.0236T^2 - 0.2904C + 0.0031C^2 - 0.0055T \cdot C$	0.9596	32.54	0.1137	0.0686	-26.31
	月 多项式逐步回归	$ET_0 = 2.6678 + 0.1198T - 0.3638C$	0.9578	94.27	0.1161	0.0716	-25.45
	连乘式回归	$ET_0 = 0.6521T^{0.523} \cdot C^{-0.54}$	0.9499	79.43	0.1266	0.0860	-22.00
	连乘式逐步回归	$ET_0 = 0.6521T^{0.523} \cdot C^{-0.54}$	0.9499	79.43	0.1266	0.0860	-22.00
	线性回归	$ET_0 = 0.7401 + 0.211T - 0.4076C$	0.9871	322.88	0.0925	0.0332	-34.56
	线性逐步回归	$ET_0 = 0.7401 + 0.211T - 0.4076C$	0.9871	322.88	0.0925	0.0332	-34.56
	六 多项式回归	$ET_0 = 39.3915 - 2.7823T + 0.0564T^2 - 0.817C - 0.0357C^2 + 0.031T \cdot C$	0.9918	169.03	0.0762	0.0220	-42.32
	月 多项式逐步回归	$ET_0 = 25.346 - 1.825T + 0.04T^2 - 0.039C^2$	0.9915	309.69	0.0770	0.0225	-41.88
	连乘式回归	$ET_0 = 0.2241T^{1.191} \cdot C^{-0.484}$	0.9795	217.37	0.1169	0.0534	-25.18
	连乘式逐步回归	$ET_0 = 0.2241T^{1.191} \cdot C^{-0.484}$	0.9795	217.37	0.1169	0.0534	-25.18
洛惠渠灌区	线性回归	$ET_0 = 2.9667 + 0.1153T - 0.3893C$	0.9499	78.52	0.1278	0.0887	-21.67
	线性逐步回归	$ET_0 = 2.9667 + 0.1153T - 0.3893C$	0.9499	78.52	0.1278	0.0887	-21.67
	五 多项式回归	$ET_0 = 13.3537 - 0.6262T + 0.0102T^2 - 1.5014C - 0.0129C^2 + 0.0628T \cdot C$	0.9564	80.00	0.1206	0.0771	-23.95
	月 多项式逐步回归	$ET_0 = 5.2317 - 0.8191C + 0.022TC$	0.9534	84.91	0.1234	0.0822	-23.03
	连乘式回归	$ET_0 = 0.6912T^{0.84} \cdot C^{-0.593}$	0.9327	56.55	0.1484	0.1207	-15.64
	连乘式逐步回归	$ET_0 = 0.6912T^{0.84} \cdot C^{-0.593}$	0.9327	56.55	0.1484	0.1207	-15.64
	线性回归	$ET_0 = 0.56 + 0.2244T - 0.4184C$	0.9875	333.09	0.0995	0.0429	-31.64
	线性逐步回归	$ET_0 = 0.56 + 0.2244T - 0.4184C$	0.9875	333.09	0.0995	0.0429	-31.64
	六 多项式回归	$ET_0 = 26.9968 - 1.7543T + 0.0371T^2 - 1.0343C - 0.0082C^2 + 0.0212T \cdot C$	0.9889	124.54	0.1002	0.0439	-31.35
	月 多项式逐步回归	$ET_0 = 3.381 + 0.0045T^2 - 0.4183C$	0.9897	344.52	0.1030	0.0455	-30.27
	连乘式回归	$ET_0 = 0.1915T^{1.131} \cdot C^{-0.574}$	0.9830	218.48	0.1166	0.0600	-25.30
	连乘式逐步回归	$ET_0 = 0.1915T^{1.131} \cdot C^{-0.574}$	0.9830	218.48	0.1166	0.0600	-25.30
洛惠渠灌区	线性回归	$ET_0 = 2.4983 + 0.2005T - 0.5984C$	0.9523	82.80	0.1216	0.0834	-21.35
	线性逐步回归	$ET_0 = 2.4983 + 0.2005T - 0.5984C$	0.9523	82.80	0.1216	0.0834	-21.35
	五 多项式回归	$ET_0 = 1.8943 + 0.1907T - 0.0484C^2$	0.9582	95.41	0.1183	0.0752	-24.83
	月 多项式逐步回归	$ET_0 = 1.8943 + 0.1907T - 0.0484C^2$	0.9582	95.41	0.1183	0.0752	-24.83
	连乘式回归	$ET_0 = 0.4905T^{0.923} \cdot C^{-0.526}$	0.9351	59.22	0.1462	0.1187	-16.02
	连乘式逐步回归	$ET_0 = 0.4905T^{0.923} \cdot C^{-0.526}$	0.9351	59.22	0.1462	0.1187	-16.02
	线性回归	$ET_0 = 2.6684 + 0.2035T - 0.474C$	0.9758	169.37	0.1174	0.0740	-24.91
	线性逐步回归	$ET_0 = 2.6684 + 0.2035T - 0.474C$	0.9758	169.37	0.1174	0.0740	-24.91
	六 多项式回归	$ET_0 = 55.3364 - 3.5071T + 0.0638T^2 - 3.7414C + 0.0152C^2 + 0.0212T \cdot C$	0.9859	96.91	0.1091	0.0478	-29.85
	月 多项式逐步回归	$ET_0 = 59.1233 - 3.7381T + 0.0674T^2 - 4.1958C + 0.1482T \cdot C$	0.9858	129.50	0.1092	0.0479	-29.54
	连乘式回归	$ET_0 = 0.6097T^{0.433} \cdot C^{-0.303}$	0.9635	110.15	0.1187	0.0773	-23.67
	连乘式逐步回归	$ET_0 = 0.6097T^{0.433} \cdot C^{-0.303}$	0.9635	110.15	0.1187	0.0773	-23.67

3)信息判别结果表明,AIC 在-68.32~11.53 之间,且绝大多数为负值,也说明了回归方程具有较高的使用价值和相当高的可靠性。

4)由符合性检验来看,所有预报模型均与历史实测数据相符合(χ^2 值在 0.03~0.96 之间);标准误差也是很小的(Se 值在 0.04~0.3 之间),说明利用回归方法建立的预报模型具有较高的预报精度。

由于 F 检验值、符合性检验 χ^2 、信息判据 AIC 均可说明模型与模型之间的可靠程度之差别; Se 可描述其模型的精度。因此,选用标准误差 Se 与符合性检验值 χ^2 之和作为综合评判指标较为理想。这是因为 F 检验之正值较大,信息判据 AIC 之负值较大,无论取 F 值还是 AIC 值都可能淹没其 Se 的影响。故模型的择优综合评判指标 η 取:

$$\eta = Se + \chi^2 \quad (18)$$

为了选择最优预报模型,取综合指标 η 值作为判别依据,即 η 值小的模型为最优模型。这是因为 Se 越小,表明预报精度越高, χ^2 愈小,表明模型愈符合实际情况,则 η 值也越小。故用 η 对样本的每一个月进行排序,然后对 12 个月综合排序,即对一个月来讲,按 η 排序,最小者最好,排在第一名,最大者最差,排在第六名。对每一个模型来讲,12 个月的名次序号之和最小者最优,最大者最差,其结果见表 2。

表 2 关中三灌区 ET_0 预报模型综合评判表

灌区模型		月 份												和	位次
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
交口抽渭	I	2	2	4	3	3	3	2	1	3	3	5	3	34	3
	II	4	2	4	3	3	3	2	1	3	4	6	5	40	4
	III	5	3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	19	1
	IV	6	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	26	2
	V	3	4	3	4	4	4	3	3	4	5	3	4	44	5
	VI	1	4	3	4	4	4	3	3	4	6	4	4	44	5
泾惠	I	3	3	3	3	3	1	3	3	3	2	5	2	34	3
	II	4	3	3	3	3	1	3	3	3	3	4	2	35	4
	III	5	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	17	1
	IV	4	2	2	4	2	3	2	2	2	3	4	2	32	2
	V	1	4	4	2	4	4	4	4	4	5	2	3	41	5
	VI	2	4	4	2	4	4	4	4	4	4	3	3	42	6
洛惠	I	3	3	3	4	2	3	3	4	3	3	2	2	35	3
	II	4	3	3	4	2	3	3	4	3	4	6	3	42	4
	III	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12	1
	IV	2	2	2	2	1	2	2	3	2	2	4	3	27	2
	V	5	4	4	3	3	4	4	2	4	5	3	4	45	5
	VI	6	4	4	3	3	4	4	2	4	6	5	5	50	6

根据以上三灌区 ET_0 预报模型的综合评判结果可见,在陕西关中渭北灌区,利用模型 II 多项式回归方程作为 ET_0 预报模型不仅精度较高,而且具有较高的可靠性,预报模型为:

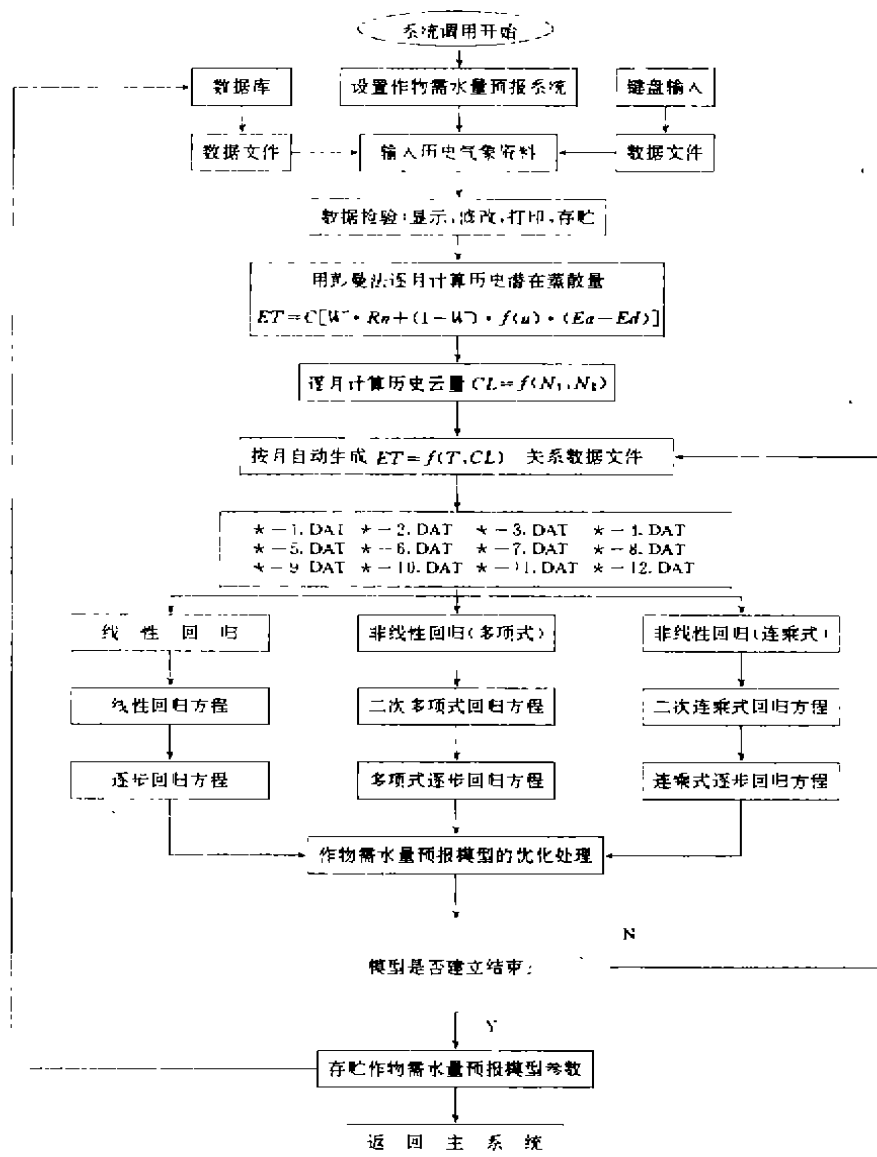
$$ET_0 = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3C + a_4C^2 + a_5T \cdot C \quad (19)$$

式中: T ——月平均温度($^{\circ}\text{C}$); C ——天气指数(月平均云量); $a_0, a_1, \dots, a_5$ ——回归系数。

4 建立作物需水量最优预报模型的计算机通用软件

建立作物需水量最优预报模型的计算机通用软件程序框图如附图所示。对于不同灌

区只要调用数据库文件或输入历史气象资料和灌区特征参数,该软件系统将自动建立并优选出适合于该灌区最佳的作物需水量预报模型,实现其灌区的土壤墒情预报和灌溉预报,它对于提高灌溉效益,缓解水资源日益紧张的状况具有十分重要的意义。



附图 作物需水量预报模型与优化的程序框图

参 考 文 献

- 1 J. 德伦博斯等. 作物需水量. 联合国粮农组织, 1977
- 2 熊运章, 孙明勤, 胡彦华等. EDPS 实验数据处理系统. 西北农业大学学报, 1989, 17(3): 55~62
- 3 熊运章, 胡彦华等. 微机在灌区用水管理中的应用技术研究. 电子技术与计算机在农业工程的应用第三届全国学术年会论文集, 1991

Optimal Models for Prediction of Crop Water Requirements

Hu Yanhua Xiong Yunzhang

(Department of Hydraulic Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, China, 712100)

Abstract The prediction of crop water requirements is the base of the prediction of soil moisture and irrigation conditions in the irrigation system. Based on the analysis of meteorological data from the Jinghui and Lohui Irrigation System as well as Jia-kou Irrigation System by diverting the waters from the Weihe River, ET_0 prediction models for crop water requirements with the changes in air temperature and weather states were established using the factor analysis method. Also, the correlative analysis, consistency and significant test of the six kinds of established models per month were carried out thereby to select mathematical models for ET_0 prediction suitable to the irrigation systems through the comprehensive evolution. Accordingly, the models for the prediction of crop water requirements and their optimal universal computer softwaters were developed.

Key words crop water requirement, prediction model, multiple regression, computer application