

作物蒸发蒸腾量的计算方法研究

康绍忠

邵明安

(西北农业大学) (中国科学院水利部西北水土保持研究所)

摘 要

本文用山西、陕西、内蒙、甘肃四省、区辐射台的数据对目前普遍采用的彭曼(Penman)公式中的某些系数进行修正;分析了作物系数的变化规律;提出了土壤水分修正系数的表达式;以水量平衡方程为基础建立了非充分灌溉条件下作物蒸发蒸腾量的计算模型。

关键词: 蒸发蒸腾量 作物系数 土壤水分修正系数

STUDY ON THE METHODS OF CALCULATING CROP EVAPOTRANSPIRATION

Kang Shaozhong Shao Mingan

Abstract

Two coefficients in the widely-used Penman Formula were modified in this paper, based on the data collected from the radiation stations in Shanxi, Shaanxi, Inner Mongolia and Gansu. The changes of crop coefficient with time and station location were analysed. The equation of soil moisture modification coefficient was also presented in this paper. With soil water balance equation and considering over the weather conditions, soil moisture statues and crop properties, we developed the model for computing evapotranspiration when irrigation water is limited

key words: evapotranspiration crop coefficient soil moisture
modification coefficient

0 引 言

作物蒸发蒸腾量是SPAC中水分运移的重要环节,同时也是水循环与水平衡研究中的一个重要内容。作物蒸发蒸腾量是水资源评价和区域水资源供需平衡计算所不可缺少的基础资料。

计算总蒸发蒸腾量的方法有两大类:其一:是直接计算蒸发蒸腾量的方法;其二:是用参考作物蒸发蒸腾量计算作物蒸发蒸腾量的方法。第一类方法以经验公式较多。目前宜采用第二类方法。第二类方法在充分供水条件下表示为:

$$ET_{c,i} = K_{c,i} \cdot ET_o \quad (1)$$

式中: $ET_{p,i}$ 是充分供水条件下作物潜在蒸发蒸腾量; $ET_{o,i}$ 是参考作物蒸发蒸腾量; $K_{o,i}$ 是参考作物系数。

在水分不足条件下, 作物产生水分胁迫, 其实际蒸发蒸腾量将小于充分供水条件下的潜在蒸发蒸腾量, 此时应考虑土壤水分的修正系数 K_o 即:

$$ET_{a,i} = K_{o,i} \cdot ET_{p,i} = K_{o,i} ET_{o,i} \quad (2)$$

式中 $ET_{a,i}$ 是水分不足条件下的作物实际蒸发蒸腾量; $K_{o,i}$ 是土壤水分修正系数。

因此, 作物蒸发蒸腾量的计算问题其实质是要确定参考作物蒸发蒸腾量 $ET_{o,i}$, 作物系数 $K_{o,i}$ 及土壤水分修正系数 $K_{o,i}$ 。

1 参考作物蒸发蒸腾量 $ET_{o,i}$ 的计算

参考作物蒸发蒸腾量 $ET_{o,i}$ 系指从高度一致, 生长旺盛, 完全遮盖地面而不缺水的 8~15cm 高的绿色草地上所蒸发蒸腾的速率。

目前, 计算参考作物蒸发蒸腾量的方法很多, 除了纯经验公式法外, 有理论基础的公式可以归诸于三大类: 一是以水汽(乱流)扩散理论为基础的公式; 二是以热量平衡理论为基础的公式; 三是既以热量平衡理论又以水汽扩散理论为基础的综合法公式。种种方法各有所长, 亦各有所短, 现有的方法中或者过于繁杂而难于推广采用, 或者虽然简单而结果过于粗略。综合法中的彭曼(Penman)公式是一种可行的方法, 即使利用普通的气象资料, 仍可能计算出参考作物蒸发蒸腾量。彭曼公式的框架不是经验的而是理论的, 他从热量平衡原理出发, 利用鲍纹比(Bowen 1926), 引用干燥力(Drying Power)的概念, 经过简捷的推导, 得到了一个用普通气象资料就可以计算参考作物蒸发蒸腾量的公式。彭曼公式的形式是:

$$ET_o = \frac{\Delta \cdot R_n + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

式中: R_n 是净辐射; E_a 是干燥力(或称之为空气动力项); Δ 是饱和水汽压-温度曲线上的斜率; γ 是湿度计常数。

把 R_n 与 E_a 的具体表达式代入式(3)并考虑气压订正后有:

$ET_o =$

$$\frac{\frac{P_o}{P} \frac{\Delta}{\gamma} \left[0.75 Q_A (a' + b' \frac{n}{N}) - \sigma T_K^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_a}) \cdot (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \right] + 0.26 (e_s - e_a) (1 + cu_2)}{\frac{P_o}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0} \quad (4)$$

式中 P_o 、 P 分别为海平面标准大气压和计算地点的实际水汽压; Q_A 是理论太阳辐射; n 是实际日照时数; N 是最大可能日照时数; σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)常数, 当计算的 ET_o 用 mm/d 表示时, 其值为 2.01×10^{-9} ; T_K 是绝对温度(其值等于 $273 + T_a(^{\circ}\text{C})$); e_a 是空气的实际水汽压; e_s 是饱和水汽压; u_2 是 2 m 高处 的风速, 若用气象站常规观测的高度风速则需乘以 0.75 的系数; c 是风速修正系数, 在日平均气温阶段平均值与日最低气温阶段, 平均值之差 (ΔT) 大于 12°C 时, $c = 0.07 \cdot \Delta T - 0.256$ (ΔT 的单位为 $^{\circ}\text{C}$), 其余条件下 $c = 0.54$; a' , b' 是根据日照时数估算太阳总辐

射的系数,联合国粮农组织针对全世界范围推荐了三组 a' 、 b' 值(表1),实际上 a' 和

表1 联合国粮农组织(FAO)推荐的 a' 、 b' 系数

地 区	a'	b'
寒温气候带	0.18	0.55
干热气候带	0.25	0.45
湿热气候带	0.29	0.42

b' 受云的类型、距海远近,海拔高度、空气混浊度等因素的影响,表现出较复杂的关系,要根据我国不同地区实测太阳辐射资料分析选定适合当地采用的 a' 、 b' 值,这样才能保证其

计算精度。为此,我们通过分析山西、陕西、内蒙、甘肃各省(区)辐射站太阳辐射比 θ/θ_A 与日照比率 n/N 之间的关系,确定了有关地区与实际采用的 a' 、 b' 值(见表2),分析时所采用的 n 、 θ 资料分别引自以上几省(区)气候资料档案室所记载的原始实测资料, θ_A 和 N 采用理论公式计算,然后由 θ/θ_A 和 n/N 数据序列进行线性回归求得。

表2 用日照时数估算太阳辐射的经验系数 a' 、 b'

省(区)名	站名	经验系数		相关系数R	显著水平X
		a'	b'		
山西省	大同	0.1951	0.5120	0.7891	0.01
	太原	0.1675	0.5848	0.8566	0.01
	侯马	0.1668	0.5105	0.8379	0.01
陕西	西安	0.2048	0.4325	0.8094	0.01
甘肃	兰州	0.2097	0.4315	0.7592	0.01
	敦煌	0.2319	0.5130	0.8466	0.01
内蒙古	伊金霍洛	0.010	0.8180	0.8330	0.01
	二连浩特	0.035	0.8150	0.7820	0.01
	海拉尔	0.2048	0.5743	0.6565	0.05

利用根据当地实测资料确定的 a' 、 b' 经验系数代入彭曼公式估算 ET_o ,更切合实际。

2 作物系数 K_{ci} 的确定

作物系数 K_{ci} 的确定; K_c 是作物本身生理学特性的反映,它与作物的种类、品种、生育期,作物群体叶面积指数有关。但在较适宜的土壤水分条件下,作物能达高产潜力时的作物系数主要随生育阶段而变化。 K_c 采用下式推算:

$$K_{ci} = ET_{ci}/ET_o \quad (5)$$

式中: K_{ci} 是作物某阶段的作物系数; ET_{ci} 是作物某阶段的实测蒸发蒸腾量; ET_o 是用气象资料估算的参考作物蒸发蒸腾量。

实测结果表明作物系数 K_c 在作物全生育期内的变化规律是:前期小,生长盛期较大,后期又减小。由于作物实测蒸发蒸腾量与参考作物蒸发蒸腾量两者受气象因素的影响是同步的。因此,同一产量水平下,不同水文年份的作物系数是较稳定的。

对于同一品种作物的 K_c 在全生育期内的变化主要取决于其作物的生态特性,这种

特性最能用作物覆盖表面百分率反映。根据大量试验结果分析, K_c 与叶面积指数 LAI 呈较密切的线性关系, 即:

$$K_{ci} = aLAI_i + b \quad (6)$$

式中: a 、 b 是由实测资料确定的经验系数, 随作物品种和种类而变化。经过我们在西北农业大学灌溉试验站的实测资料以及在甘肃武威灌溉试验站与河南新乡中国农科院农田灌溉研究所调查收集的资料, 分析得出了下3表中的作物系数 K_c 与叶面积指数 LAI 之间的变化关系。

表3 几站的冬小麦作物系数 K_c 和叶面积指数 LAI 之关系

站名	K_c 与 LAI 的关系	相关系数 R	样本数 n	临界相关系数 R_i	显著水平 X	资料年份
西安	$K_c = 0.18 + 0.22LAI$; ($LAI < 4.20$)	0.9129	37	0.408	0.01	1983~1984
武威	$K_c = 0.14 + 0.19LAI$; ($LAI < 5.10$)	0.9421	10	0.708	0.01	1983
新乡	$K_c = 0.24 + 0.15LAI$; ($LAI < 5.70$)	0.9553	11	0.684	0.01	1982~1983

从表3中结果可知: 当 LAI 大于某一临界值时, K_c 不再随叶面积指数增加而增加, 而在1.10左右摆动。另根据文献报道冬小麦生长盛期蒸发蒸腾量可达E601型水面蒸发皿蒸发量的1.10倍, 所以当叶面积指数 LAI 超过临界值时取 $K_c = 1.10$ 。

我们分析了陕西省几站各月 K_c 的变化, 结果表明全省各站各月的变化稍大, 但同一区域内相同月份的 K_c 接近。今以玉米为例将各站历年平均各月的 K_c 列于表4。

表4 陕西省玉米历年平均各月作物系数 K_c 值

玉米	地区	站名	历 年 平 均 各 月 K_{ci}							全生育期
			4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
春玉米	陕北	延安		0.754	0.794	1.644	1.684	1.250		1.072
	陕南	汉中	0.550	0.790	0.784	1.180	0.954	1.094		0.897
夏玉米		交口			0.545	1.057	1.163	1.559		0.957
	关中东	泾惠渠			0.507	0.955	1.384	1.865		1.023
		周陵			0.487	0.909	1.047	1.229		0.945
		全区平均			0.513	0.974	1.198	1.648		0.975
	关中西	武功			0.511	1.051	1.434	1.280		1.070
		扶风			1.108	1.256	1.459	1.487		1.189
		全区平均			0.810	1.154	1.447	1.384		1.130
	陕南	商洛			0.535	0.669	0.943	0.998	1.498	0.845

许多研究表明, 用彭曼公式确定 ET 。乘以相应的作物系数 K_c 计算作物蒸发蒸腾量有较好的代表性。我们用该法计算了全省十个站(点)多年的冬小麦、玉米、棉花、水稻蒸发蒸腾量, 其结果表明计算值与实测值相对误差在 $\pm 20\%$ 以内的月份占80%以上。因此, 用参考作物蒸发蒸腾量 ET 。乘以作物系数 K_c 确定作物蒸发蒸腾量具有较高的精度。

3 土壤水分修正系数 K_θ 的确定

作物蒸发蒸腾量不仅受外界蒸发条件和作物本身的生理特性的影响,同时还受土壤水分状况的限制。在干旱缺水地区,水资源不能满足充分供水要求时,土壤含水量较低,产生土壤水分亏缺,土壤中毛管传导度减小,根系的吸水速率降低,引起作物叶片含水量减小,保卫细胞失水收缩,气孔开度减小,阻力增大,从而导制作物蒸发蒸腾量的强度低于无水分亏缺时的蒸发蒸腾量强度,土壤水分越严重,这种降低越明显。因此,缺水时土壤水分状况对作物蒸发蒸腾量的影响处于很重要的地位,应考虑土壤水分修正系数 K_θ 。

K_θ 主要与土壤水分状况有关,研究表明作物蒸发蒸腾量只与土壤有效水分有关,而各种土壤的有效含水量差别较大,所以, K_θ 表示为相对有效含水量 $\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}}$ 的函数较合适,即:

$$K_\theta = f\left(\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}}\right) \quad (7)$$

式中: $\bar{\theta}_a$ 是计算时段内的平均土壤含水量; θ_{wp} 是凋萎含水量; θ_i 是临界土壤含水量,当实际土壤含水量小于 θ_i 时,蒸发蒸腾量明显受土壤水分的影响,否则,蒸发蒸腾受土壤水分的影响不显著; θ_i 由实测资料分析确定,既根据充分供水和水分不足时的蒸发蒸腾量与土壤含水量,建立缺水时的蒸发蒸腾量与充分供水时的蒸发蒸腾量比值与土壤含水量之间的函数关系,找 ET_a/ET_{e0} 开始小于1.0时的土壤含水量即为 θ_i , K_θ 由 ET_a/ET_{e0} 确定,把算得的 K_θ 与相应阶段的 $\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}}$ 值联系在一起进行回归分析,其结果表明 K_θ 是土壤相对含水量的幂函数,即

$$K_\theta = \begin{cases} C \left(\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}} \right)^d & (\bar{\theta}_a < \theta_i) \\ 1.0 & (\bar{\theta}_a \geq \theta_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中 c 、 d 为实测资料确定的经验系数,它们随作物生育阶段和土壤条件而变化。如我们把冬小麦全生育阶段和土壤含水量分为出苗—越冬前,越冬前一返青,返青后—抽穗开花,灌浆—成熟四个阶段,把春小麦全生育期划分为出苗—分蘖,分蘖后—拔节孕穗,抽穗开花—灌浆、乳熟—成熟四个阶段。然后分阶段求出了四站的 c 、 d 值(见表5),从理论上说:当 $\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}} = 1.0$ 时 $K_\theta = 1.0$,亦即系数 C 应等于1.0。从表5中可以看出:由实测资料回归计算得到的不同阶段 C 值变化范围在0.936~1.082之内,都接近于1.0,为计算方便起见把 C 都近似取为1.0。 d 值在作物不同生育阶段变化较大,但基本规律是越冬期 $d > 1.0$,其它阶段 $d < 1.0$ 。冬小麦各阶段蒸发蒸腾量随土壤水分的变化规律较为一致,都是当土壤中有效水降低到一定值 $\left(\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}} \approx 0.5\right)$ 后,土壤水分已成限制因子,此时,蒸发蒸腾对于土壤水的敏感性迅速增加,即当土壤有效水降低至50%的总有效水时,土壤水分对蒸发蒸腾的限制作用占很重要的比重。

表5 冬小麦生育阶段土壤水分修正系数表达式中参数c与d

作物	站名	参数 c与d	生 育 阶 段			
			I	II	III	IV
冬小麦	西北农大	c	1.003	0.951	0.966	0.978
		d	0.781	1.513	0.351	0.958
	山西临汾	c	0.957	0.936	0.977	0.990
		d	0.669	1.161	0.892	0.696
春小麦	甘肃武威	c	1.008	1.082	0.986	0.974
		d	0.695	0.642	0.789	0.682
	陕西榆林	c	0.992	0.986	1.028	0.964
		d	0.741	0.707	0.736	0.663

综上所述, 作物蒸发蒸腾量随其影响因素的变化关系可表达为:

$$ET_{ai} = \begin{cases} (a \cdot LAI_i + b) \cdot KT_{oi} & (\bar{\theta}_a \geq \theta_i) \\ (a \cdot LAI_i + b) \cdot \left(\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}} \right)^d \cdot ET_{oi} & (\bar{\theta}_a < \theta_i) \end{cases} \quad (9)$$

4 非充分灌水条件下作物蒸发蒸腾量的计算模式

要直接用式(9)确定非充分灌溉条件下未来某时段的作物蒸发蒸腾量是很困难的, 因为 $\bar{\theta}_a$ 是时段内的平均土壤含水量, 它是由时段初和时段末的土壤含水量所决定的, 因而还需另找途径。

在广大干旱缺水实施非充分灌溉地区, 当地下水埋深大于3 m时, 在无降水(灌溉)的时段, 其农田土壤水分平衡方程(考虑单位时间的速率)可以写为:

$$KT_a \approx -d\bar{\theta}_a/dt \quad (10)$$

考虑计算时段较短, 把式(9)代入式(10)得:

$$\frac{d\bar{\theta}_a}{dt} = - (a \cdot LAI + b) \cdot \left(\frac{\bar{\theta}_a - \theta_{wp}}{\theta_i - \theta_{wp}} \right)^d \cdot ET_o \quad (11)$$

初始条件为 $t = 0$, $\theta_a = \theta_o$ ($\theta_o < \theta_i$) 经过 $dt = t$ 时间后的状态为 $\bar{\theta}_a = \theta_a t$, 由式(11)积分:

$$- \int_{\theta_o}^{\bar{\theta}_a t} \frac{d\bar{\theta}_a}{(\bar{\theta}_a - \theta_{wp})^d} = \int_0^t \frac{(a \cdot LAI + d) ET_o}{(\theta_i - \theta_{wp})^d} \cdot dt \quad (12)$$

于是得:

$$\bar{\theta}_a t = \theta_{wp} + \sqrt[1-d]{(\theta_o - \theta_{wp})^{1-d} - \frac{(1-d) \cdot (a \cdot LAI + d) \cdot ET_o \cdot t}{(\theta_i - \theta_{wp})^d}} \quad (13)$$

由此, 可得缺水条件下确定作物蒸发蒸腾量的数学模型:

$$ET_a = (\theta_o - \theta_{wp}) - \sqrt[1-d]{(\theta_o - \theta_{wp})^{1-d} - \frac{(1-d) \cdot (a \cdot LAI + d) \cdot ET_o \cdot t}{(\theta_i - \theta_{wp})^d}} \quad (14)$$

式中 θ_0 、 θ_w 、 θ_i 均指100cm土层内的储水毫米数， ET_0 是计算时段内的日平均参考作物蒸发蒸腾量毫米数， ET_i 是计算时段内作物蒸发蒸腾量毫米数。

同理，可推得有降水或灌溉时的作物蒸发蒸腾量计算模式。

若已知计算时段初的土壤含水量 θ_0 ，时段内的日平均参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 和叶面积指数LAI，即可估算出时段内的作物蒸发蒸腾量。该公式可用查算图或表格方式表达，供使用时直接查算。今以西北农业大学冬小麦返青后一抽穗开花阶段为例绘制了非充分灌溉条件下，冬小麦蒸发蒸腾量查算图（见图1）。该图中土壤初始含水量 θ_0 系指100cm土层内的储水深度毫米数。对于其余阶段或不同站亦可根据式（14）作出相应的查算图，为实际采用提供方便。图1亦反映了冬小麦蒸发蒸腾量对同一影响因素的敏感性在不同阶段（如不同LAI时）是不同的，在同一阶段也视其当时的天气条件，土壤水分状况和作物生长状况不同而不同。 ET_i 对某一因子的敏感性大小都受其余两个因子所

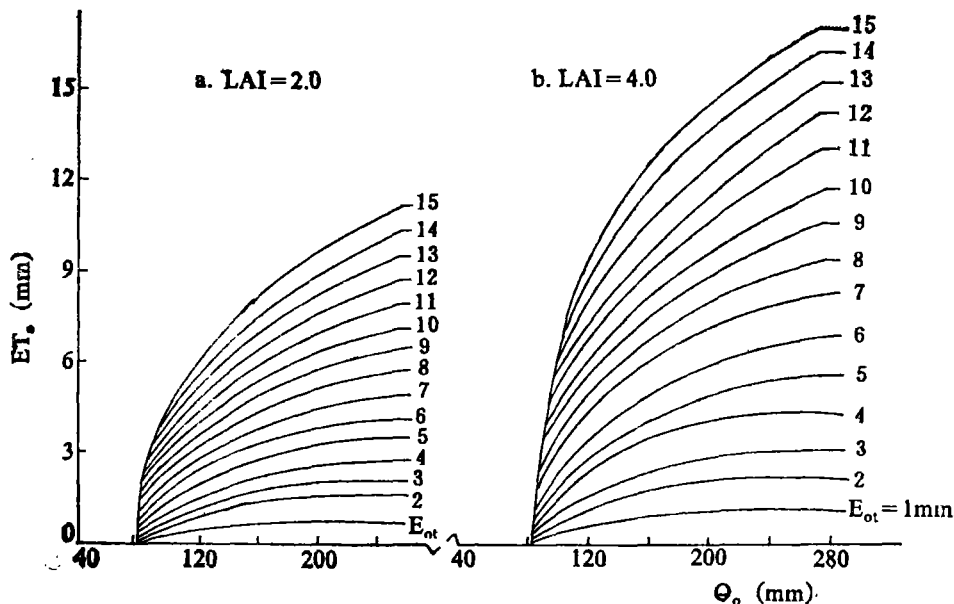


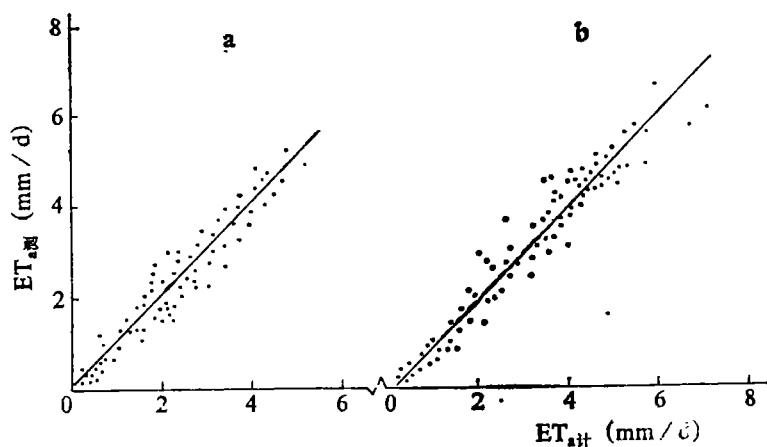
图1 西北农大灌溉试验站冬麦地返青—抽穗开花期蒸散量查算图

制约，同时也与它本身所处的状态有关，它们相互影响，表现出较复杂的关系。

为了检验本方法的适用性，我们估算了西北农业大学灌溉试验站1983~1985年的冬小麦蒸发蒸腾量，其中 ET_0 用式（4）估算，并采用了表2中西安站的经验系数，即 $a' = 0.2048$ ， $b' = 0.4325$ ，叶面积指数LAI采用实测值，临界土壤含水量 θ_i 在冬小麦出苗—越冬前，越冬—返青，返青—抽穗开花，灌浆—成熟四个阶段分别为22.22%、22.06%、18.49%和20.69%（占干土重的%），即相当于100cm土层内的临界储水深度分别为299.97mm、297.81mm、249.62mm和279.32mm，凋萎含水量 $\theta_w = 6.851\%$ ，即相当于100cm土层内的储水深度为92.49mm，计算时段为旬，1983年冬小麦生育期内计算了23旬，1985年冬小麦生育期内计算了22旬，1985年冬小麦生育期内计算了24旬，

3年共计算了69旬, 我们把每旬的蒸发蒸腾量计算值 $ET_{a计}$ 与相应旬的实测值 $ET_{a测}$ 进行了比较, 计算值的相对误差等于 $(ET_{a计} - ET_{a测}) / ET_{a测} \times 100\%$ 在 $\pm 20\%$ 范围内的占58旬。计算全生育期总蒸发蒸腾量的相对误差3年均均在 $\pm 10\%$ 的范围之内, 各旬的计算值与实测值的比较情况见图2a。

此外, 我们还用该方法计算了甘肃武威站1978—1983年春小麦的各旬蒸发蒸腾量, 其中参考作物蒸发蒸腾量仍用彭曼公式估算, 其经验系数 a' 、 b' 采用表2中兰州站的值, LAI 亦采用实测值; 土壤临界含水量(以100cm土层内的储水深度毫米数表示)在春小麦出苗—分蘖, 分蘖—拔节孕穗, 抽穗开花—灌浆, 乳熟—黄熟四个阶段分别为272.80mm、262.51mm、237.60mm和285.20mm, 凋萎含水量 $\theta_w = 6.221\%$, 即100cm土层内的储水深度为86.47mm, θ_0 为时段初的实测值。计算时段仍以旬为单位, 6年共计算了春小麦生育期内的蒸发蒸腾量82旬, 其中与实测值比较的相对误差在 $\pm 20\%$ 范围内的有66旬, 计算全生育期总蒸发蒸腾量的相对误差6年全在 $\pm 15\%$ 的范围之内, 其中4年在 $\pm 10\%$ 的范围之内。各旬的计算值与实测值比较情况如图。



a 西北农大, 冬小麦 (1983~1985)

$$ET_{a测} = 0.05 + 1.08 ET_{a计}$$

$$\text{相关系数 } R = 0.8940$$

b 武威, 春小麦 (1978~1983)

$$ET_{a测} = -0.38 + 1.087 ET_{a计}$$

$$\text{相关系数 } R = 0.9022$$

图2 麦田蒸散量的计算值与实测值之比较

从图2可看出: 用该方法计算的冬小麦蒸发蒸腾量与实测值之间密切相关。用式(14)确定干旱缺水地区实施非充分灌溉条件下的作物蒸发蒸腾量具有较高的计算精度, 且所需基本资料易于取得。为非充分灌溉条件下作物蒸发蒸腾量的计算提供了一条有效途径。

5 结 语

5.1 彭曼公式是目前世界上采用最广泛的公式之一,虽然它的框架是理论的,但公式中的某些系数是经验的,有地区局限性,应根据具体条件分析选用。

5.2 作物系数 K_c 是作物本身生理特性的反映,对于同一地区在同一产量水平时不同水文年份的 K_c 较稳定。

5.3 作物蒸发蒸腾主要受天气条件、作物的生物学特性和土壤条件的综合影响。在非充分灌溉条件下,特别是当土壤中有效水量降低到最大有效水量的50%时,土壤水分对作物蒸发蒸腾的影响起主导作用。

5.4 对于有地下水补给的地区,该模型不能直接应用还应在模式中考虑地下水补给量问题。

参 考 文 献

- [1] 康绍忠,熊运章,刘晓明.用彭曼—蒙特斯模式估算田间作物水分散失量的研究,《西北农业大学学报》,1991年1期。
- [2] 康绍忠.干旱半干旱地区蒸发力的计算方法研究,《干旱区资源与环境》,1987年1期。
- [3] 康绍忠,贺正中,张小林等.陕西省玉米需水量等值线图及分区灌溉评价的研究,《西北水资源与水工程》,1990年3期。
- [4] 邓根云.水面蒸发量的一种气候学计算方法,《气象学报》1979年3期。
- [5] 吴原水.利用蒸发力进行农田灌溉预报的方法,《水利学报》,1981年1期。
- [6] J.B., Stewart, A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating crop evaporation, *Agricultural Meteorology*, VOL.30, 1983, P.111~127.