

# 用 Priestley-Taylor 模式计算 棉田实际蒸散量的研究\*

刘绍民

(新疆气象科学研究所, 乌鲁木齐 830002)

## 提 要

在农田蒸散试验资料的基础上, 综合考虑影响棉田实际蒸散的气象条件, 棉花生物学特性和土壤水分等因素, 利用 Priestley-Taylor 模式、棉花叶面积指数和相对有效土壤湿度建立了棉田实际蒸散量的计算模式. 该模式仅需常规气象和农业气象资料, 具有较高的精度, 便于在干旱区推广使用.

**关键词:** Priestley-Taylor 模式 棉田 叶面积指数 土壤湿度 实际蒸散量

## 引 言

农田实际蒸散是土壤-作物-大气连续体中水分循环的一个环节, 它的研究有助于合理和高效地利用农业水资源, 促进节水型农业的发展. 本文从田间试验出发, 综合考虑影响棉田实际蒸散的气象、作物和土壤等因素, 运用 Priestley-Taylor 模式建立棉田实际蒸散量的计算模式.

## 1 试验方法

农田蒸散试验于 1987~1988 年在新疆乌兰乌苏农业气象试验站进行, 该站位于  $85^{\circ}49'E$ 、 $44^{\circ}17'N$ , 海拔高度 468.2 m, 常年降水量 200 mm 左右, 地下水位在 8~20 m 以下, 地下水补给量可忽略不计.

乌兰乌苏站土壤为轻壤土, 肥力中等. 试验作物为棉花, 品种是该地区主栽品种——新陆早一号, 密度为 15 万株/hm<sup>2</sup> 左右. 试验分前期(始花期)干旱、中期(初花—结铃盛期)干旱、后期(结铃盛期—吐絮期)干旱、全生育期干旱和全生育期水分适宜等 5 个处理. 每个处理有 3 个重复. 试验小区面积为 38.4 m<sup>2</sup>. 为防止相互渗漏, 小区与小区之间、小区与保护行之间用塑料布隔开, 深度为 1 m. 试验中, 灌水量用水表控制, 并采用土钻法测定土壤湿度. 从播种至成熟每旬测定一次, 并且在灌水前后, 日降水量 > 5 mm

\* 本文资料取自中国气象局“农田水分规律及节水灌溉方案”课题.  
1996-08-05 收到, 1996-10-30 收到修改稿.

以及棉花主要发育期时加测一次,测量深度达 1 m. 棉田实际蒸散量由农田水量平衡方程确定. 在全生育期内还进行气象要素和棉花生长状况观测.

本文对资料进行了平滑处理,取旬平均值.

## 2 棉田实际蒸散量的计算模式

Slatyer 和 Mcilroy(1961)<sup>[1]</sup>提出了平衡蒸发的概念(当下垫面上空的空气趋于饱和或当下垫面的湿度与空气湿度相等时的蒸发),它表示湿润地表蒸发量的下限,可表示为:

$$EE = \frac{\Delta/\gamma}{1 + \Delta/\gamma}(R_n - G) \quad (1)$$

式中  $EE$  为平衡蒸发量;  $\Delta$  为饱和水汽压-温度的曲线斜率;  $\gamma$  为干湿表常数;  $R_n$  为净辐射量;  $G$  为土壤热通量.

Priestley-Taylor(1972)<sup>[2]</sup>以平衡蒸发为基础,引进常数  $\alpha$ , 导出了估算无平流条件下蒸发力的模式,即 Priestley-Taylor 模式:

$$EP = \alpha \cdot \frac{\Delta/\gamma}{1 + \Delta/\gamma}(R_n - G) \quad (2)$$

式中  $EP$  为蒸发力;  $\Delta$ 、 $\gamma$ 、 $R_n$ 、 $G$  意义同上. Priestley 和 Taylor 认为式(2)中的  $\alpha$  为常数,他们利用海面 and 湿润陆面的资料得出  $\alpha=1.26$ . 后来,许多学者分析各自的资料得到了不同的  $\alpha$  值,并且发现  $\alpha$  有日变化和季节变化<sup>[3,4,5]</sup>. 这些都表明  $\alpha$  不是一个常数,它实际上反映了平流的变化情况,在不同平流条件下  $\alpha$  可以有不同的值,因此若将  $\alpha$  当作变量,则 Priestley-Taylor 模式也可用于估算平流条件下的蒸发力. 张志明(1984)<sup>[6]</sup>认为  $\alpha$  与温度、海拔高度和相对湿度有关,可由下式估算:

$$\alpha = (1 + \frac{1}{\Delta/\gamma}) - 0.5(\frac{1}{\Delta/\gamma})(1 + f^6) \quad (3)$$

式中  $f$  为相对湿度;  $\Delta$ 、 $\gamma$  意义同上.

不少学者提出用 Priestley-Taylor 模式来计算陆面的实际蒸散量. 他们将 Priestley-Taylor 模式中的  $\alpha$  当作土壤含水量的函数,估算了无平流条件下农田与草地的实际蒸散量<sup>[7,8,9]</sup>.

棉田实际蒸散量不仅受气象条件的影响,同时还受棉花的生物学特性以及土壤水分状况的影响. 当土壤水分供应充足时,棉田实际蒸散量只取决于气象条件和棉花生物学特性;当土壤水分不充足时,棉田实际蒸散量受上述 3 个因素的制约. 本文在前人研究的基础上,用 Priestley-Taylor 模式计算的农田蒸发力来表示气象条件对棉田实际蒸散的影响(其中  $\alpha$  当作变量),用棉花的叶面积指数来反映棉花生物学特性对棉田实际蒸散的影响,用相对有效土壤湿度来体现土壤水分状况的影响. 因此棉田实际蒸散量的计算模式可表示为:

$$AE = \begin{cases} 0 & W \leq W_f \\ EP \cdot f(LAI) \cdot f(\frac{W - W_f}{W_k - W_f}) & W_f < W < W_k \\ EP \cdot f(LAI) & W \geq W_k \end{cases} \quad (4)$$

式中  $f(LAI)$  为棉花生物学特性函数;  $LAI$  是棉花叶面积指数;  $f(\frac{W-W_f}{W_k-W_f})$  为农田土壤水分有效性函数;  $W$  为土壤湿度(mm);  $W_f$  为凋萎系数(mm);  $W_k$  为临界土壤湿度(mm)即蒸散开始受土壤水分影响时的土壤湿度,按田间持水量的  $2/3$  计算<sup>[10]</sup>;  $AE$ 、 $EP$  意义同上。

估算棉田实际蒸散量的计算模式中,农田蒸发力  $EP$  由 Priestley-Taylor 模式计算(式(2)),其中  $\alpha$  由式(3)估算。净辐射量  $R_n$  可写成:

$$R_n = Q(1 - A) - R_L \quad (5)$$

式中  $Q$  为太阳短波辐射,由下式计算:

$$Q = Q_A(a + b \cdot S) \quad (6)$$

式中  $Q_A$  为天文辐射;  $S$  为日照百分率;  $a$ 、 $b$  是经验系数,根据乌鲁木齐站(1985~1990年)的旬日射资料按月确定(表1)。

表1 经验系数  $a$ 、 $b$  值

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
$a$	0.1725	0.1468	0.0948	0.1027	0.1118	0.1310	0.1574	0.0393	0.1534	0.0378	0.1268	0.1380
$b$	0.4774	0.5703	0.6499	0.6660	0.6542	0.6263	0.5774	0.7279	0.5790	0.7485	0.6266	0.5903

为检验表1中经验系数是否适用于乌兰乌苏,本文对乌鲁木齐与乌兰乌苏两地的日照百分率进行了  $U$  检验:

$$U = |S_1 - S_2| / \sqrt{\frac{D_1^2}{n_1} - \frac{D_2^2}{n_2}} \quad (7)$$

式中  $S_1$ 、 $S_2$  为两地的平均日照百分率;  $D_1$ 、 $D_2$  是标准差;  $n_1$ 、 $n_2$  为样本数。

经计算得:  $U=1.5074$ ,  $U_{0.05}=1.960$ ,  $U < U_{0.05}$ 。所以可以确定两地的日照无显著差异,表1中的经验系数适用于乌兰乌苏。

式(5)中的  $A$  为表面反射率。根据文献[11],大多数作物的反射率在  $0.15 \sim 0.25$  左右,这里  $A$  取平均值  $0.20$ ;  $R_L$  为净长波辐射,在新疆估算净长波辐射以孙治安-翁笃鸣式<sup>[12]</sup>精度较高,本文采用该式来计算:

$$R_L = 0.95 \cdot \delta [T_0^4 - T_a^4 (1.035 - 0.295 e^{-0.166\omega})] (1 - 0.54 e^{0.02Z^2} \cdot N) \cdot 0.965 e^{0.18Z} \quad (8)$$

式中  $\delta$  为斯蒂芬-波耳兹曼常数 ( $2.01 \times 10^{-9} \text{mm/d} \cdot \text{K}^4$ );  $T_0$  是下垫面温度(K),本文取棉田  $0 \text{cm}$  地温;  $T_a$  为气温(K);  $\omega$  为大气含水量 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\omega = (0.1045 + 0.1513 e_d) e^{0.06Z}$ ,  $e_d$  为实际水汽压(hPa);  $Z$  为海拔高度(km);  $N$  为总云量。

Priestley-Taylor 模式中的土壤热通量  $G$  由下式计算<sup>[13]</sup>:

$$G = 0.4 e^{(-0.5LAI)} \cdot R_n \quad (9)$$

式中  $LAI$ 、 $R_n$  意义同上。

$\Delta/\gamma$  为 Priestley-Taylor 模式的权重系数,与气温、海拔高度有关,可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\Delta/\gamma = \frac{33.8639[0.05904(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.0000342]}{[0.242(1013 - 105.5Z)]/[0.622(595 - 0.51T)]}$$

$$(T \geq -23 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (10)$$

式中  $T$  为气温( $^\circ\text{C}$ );  $Z$  意义同上。

估算棉田实际蒸散量计算模式中的棉花生物学特性函数  $f(LAI)$ , 由土壤水分充足时( $W \geq W_k$ )的实际蒸散量  $AE$  与相应阶段的农田蒸发力  $EP$  之比值同相应阶段内的叶面积指数  $LAI$  进行多种曲线回归分析, 并且以相关系数、 $F$  值、相对误差和最大绝对误差的大小为主要指标, 确定出  $f(LAI)$  的函数表达式:

$$f(LAI) = 0.9910 + 0.4391 LAI \quad (11)$$

$$(N = 26, r = 0.5413), F = 9.9440, F_{0.01} = 7.82, F > F_{0.01})$$

式中  $LAI$  意义同上。

模式中的农田土壤有效性函数  $f(\frac{W-W_f}{W_k-W_f})$  主要与土壤水分状况有关, 将土壤水分不充足( $W < W_k$ )时的相对蒸散量( $AE/EP$ )与棉花生物学特性函数  $f(LAI)$  之比值和相应阶段的相对有效土壤湿度( $\frac{W-W_f}{W_k-W_f}$ )放在一起进行曲线回归, 选择出的土壤有效性函数

$f(\frac{W-W_f}{W_k-W_f})$  的最佳拟合式为:

$$f(\frac{W-W_f}{W_k-W_f}) = 1 / [-0.6288681 + 3.289979 e^{(-\frac{W-W_f}{W_k-W_f})}] \quad (12)$$

$$(N = 45, r = 0.7300, F = 49.0481, F_{0.01} = 7.26, F > F_{0.01})$$

式中  $W, W_f$  意义同上。

综上所述, 棉田实际蒸散量的计算模式为:

$$AE = \begin{cases} 0 & W \leq W_f \\ \frac{EP \cdot (0.9910 + 0.4391 LAI)}{-0.6288681 + 3.289979 e^{(-\frac{W-W_f}{W_k-W_f})}} & W_f < W < W_k \\ EP \cdot (0.9910 + 0.4391 LAI) & W \geq W_k \end{cases} \quad (13)$$

### 3 棉田实际蒸散量计算模式的验证

为检验棉田实际蒸散量计算模式的精度, 本文利用该模式估算了乌兰乌苏农业气象试验站 1987~1988 年棉花生长期多种处理的旬实际蒸散量。其中农田蒸发力  $EP$  由 Priestley-Taylor 模式( $\alpha$  当作变量)估算, 叶面积指数  $LAI$  采用实测值, 凋萎系数  $W_f$  为 102.59 mm, 临界土壤湿度  $W_k$  为 225.58 mm, 土壤湿度  $W$  采用实测值, 将  $EP, LAI, W_f, W_k, W$  代入式(13), 计算出 1987~1988 年棉花生长期共 44 旬的实际蒸散量。把每旬的计算值与相应旬的实测值(用农田水分平衡方程推算出)进行比较, 其中相对误差( $\frac{AE_{\text{计}} - AE_{\text{实}}}{AE_{\text{实}}} \times 100\%$ )在  $\pm 10\%$  之内的占 24 旬, 在  $\pm 15\%$  之内的占 20 旬, 平均相对误

差小于  $\pm 15\%$ 。模式的平均绝对误差( $\frac{\sum_{i=1}^n |AE_{\text{计}} - AE_{\text{实}}|}{n}$ )为 0.6132 mm/d。本文把棉田实际蒸散量的计算值与实测值放在一起进行回归分析, 建立的关系式为:

$$AE_{\text{计}} = -0.2374 + 1.0758 AE_{\text{实}} \quad (14)$$

( $N = 44$ ,  $r = 0.9577$ ,  $S = 0.7321$ ,  $F = 464.8554$ ,  $F_{0.01} = 7.27$ ,  $F > F_{0.01}$ )

各旬棉田实际蒸散量的计算值与实测值的比较情况见图 1.

从图 1 中可看出, 棉田蒸散量的计算值与实测值相关密切, 大部分点都聚集在 1:1 的直线附近, 说明用式(13)估算棉田实际蒸散量的精度较高. 模式中的太阳短波辐射  $Q$ 、净长波辐射量  $R_L$  和土壤热通量  $G$  等均采用经验公式计算, 便于推广使用.

#### 4 结 论

(1) 综合考虑影响棉田实际蒸散的气象条件, 棉花生物学特性和土壤水分等因素,

在修正后的 Priestley-Taylor 模式的基础上建立了棉田实际蒸散量的计算模式. 该模式仅需常规气象和农业气象资料, 计算简便, 适于在干旱区推广使用.

(2) 通过对该模式计算效果的检验可看出, 计算值与实测值相关密切, 平均相对误差小于  $\pm 15\%$ , 平均绝对误差为  $0.6132 \text{ mm/d}$ , 表明模式有较高的精度.

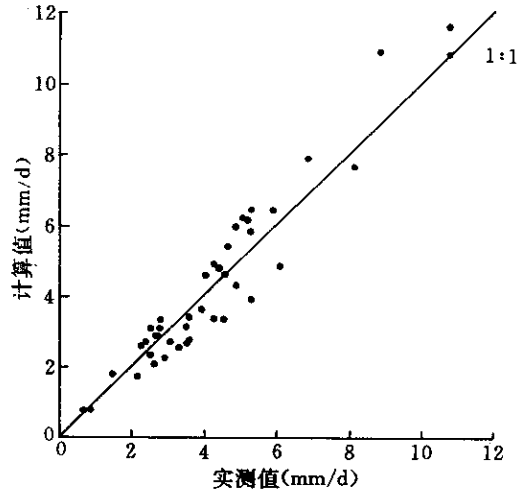


图 1 棉田蒸散量的计算值与实测值之比较

#### 参 考 文 献

- 1 Slatyer R O and McIlroy I C. Practical microclimatology. UNESCO(Paris), 1961.
- 2 Priestley C H B and Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 1972, **100**(2): 81~92.
- 3 Jury W A and Tanner C B. Advection modification of the Priestley and Taylor evapotranspiration formula. *Agron. J.*, 1975, **67**: 840~842.
- 4 Mukammal E I and Neumann H H. Application of the Priestley-Taylor evaporation model to assess the influence of soil moisture on the evaporation from a large weighing lysimeter and class A Pan. *Boundary layer Meteorology*, 1977, **12**: 243~256.
- 5 Debrwin H A R and Keijman J Q. The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, **18**(7): 898~903.
- 6 张志明. 湿润下垫面的近地面层内感热和潜热垂直通量的计算. 成都科技大学学报, 1984, **2**: 89~96.
- 7 Davies J A and Allen C D. Equilibrium. Potential and actual evaporation from cropped surfaces in southern ontario. *Journal of Applied Meteorology*, 1973, **12**(4): 649~657.
- 8 Barton I J. A parameterization of the evaporation from nonsaturated surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, **18**(1): 43~47.
- 9 Mawdsley J A and Ali M F. Estimating nonpotential evapotranspiration by means of the equilibrium evaporation concept. *Water Resources Research*, 1985, **21**(3): 383~391.
- 10 唐登银. 冬小麦土壤水分消耗的综合研究. 见: 赵明茶主编, 能量水分平衡与农业生产潜力网络试验研究. 北京: 气象出版社, 1992. 62~79.

- 11 联合国粮食及农业组织. 作物需水量预测指南. 罗马, 1977.
- 12 刘绍民, 李银芳. 新疆地面有效辐射计算方法探讨. 新疆气象, 1994, 17(2): 27~29.
- 13 Choudhury B J, Idso S B, Reginato R J. 估算麦田蒸发用的土壤热通量经验模式的分析研究. 国外农学——农业气象, 1989, (3): 23~25.
- 14 马文, E 詹森. 耗水量与灌溉需水量(熊运章, 林性粹译). 北京: 农业出版社, 1982.

## CALCULATION OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION FOR COTTON FIELD BY MEANS OF THE PRIESTLEY—TAYLOR MODEL

Liu Shaomin

(*Xinjiang Institute of Meteorological Sciences, Urumqi 830002*)

### Abstract

Based on the experimental data of evapotranspiration in the field, considering the meteorological conditions, cotton biological properties and soil moisture state, a calculation model for actual evapotranspiration of cotton field is developed by means of the Priestley-Taylor model, cotton leaf area index and relative effective soil moisture. The routine meteorological and agrometeorological data would be only needed to calculate the evapotranspiration by using the model, and there is a good precision. It can be used in arid area in China easily.

**Key words:** Priestley-Taylor model Cotton field Actual evapotranspiration Leaf area index Soil moisture