

## 几种实际蒸散计算方法在土壤水分模拟中的应用

吕厚荃<sup>1</sup>, 于贵瑞<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**在田间试验的基础上,将较为常用的 Penman 和 Priestley-Taylor 参考蒸散模式的修正模型、实际蒸散模式中常用的密集植被状况下的 Penmar-Menteith 模式和稀疏植被状况下的 Shuttleworth-Wallace 模式计算的玉米蒸散结果进行比较,并利用不同气候年型的土壤水分观测资料对土壤水分变化进行模拟,发现干燥年型几种蒸散模型的模拟效果均好于湿润年型,尤其是动力模型。在湿润年份 Penman 修正模型的模拟效果好于 Priestley-Taylor 修正模型;在干燥年份玉米旺盛生长季 Shuttleworth-Wallace 模式的拟合效果好于 Penmar-Menteith 模式;但在湿润年份 Penmar-Menteith 模式在叶面积较大时模拟效果较好。相对而言,参考蒸散修正模型中含有土壤水分参数,对土壤水分变化的模拟较为稳定,动力模型中含有参数较多,并非全部实测,因而在玉米生长量较小、表面干湿状况变化较大时模拟的稳定性较差。模拟结果表明,使用环境要素模拟土壤水分变化在一定时间长度内效果较好,时间过长可造成较大的累积误差。

**关键词:**实际蒸散;土壤水分;蒸散模式;气候年型

中图分类号:S152.7<sup>+</sup>3 文献标识码:B 文章编号:1007-7588(2001)06-0085-06

### APPLICATION OF SOME ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION MODELS IN SIMULATION OF SOIL MOISTURE

LU Hou-quan<sup>1</sup> YU Gui-rui<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081, China;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101, China)

**Abstract:**Based on experiments in the field, a comparison of modified referenced evapotranspiration model such as Penman model and Priestley-Taylor model, actual evapotranspiration model such as Penmar-Menteithin model for closed canopy and Shuttleworth-Wallace model for sparse canopy is made. Observed data of soil moisture in two years of different climatic patterns is used to simulate the variation of soil moisture. The results show that in dry years the fitness of four models is better than that in rainy years, especially for dynamical models. In rainy years, when maize plants fully grow, the fitness of Shuttleworth-Wallace model is better than that of Penmar-Menteith model, but in dry years when leaf area is bigger, the fitness of Penmar model is better. Comparatively, fitness of modified referenced evapotranspiration models is stable owing to those models including parameters of soil moisture. There are many parameters in dynamical models among which some parameters are not observed. Therefore, when maize plant is small and the moisture content in surfaces of both leaves and soil varied frequently, the fitness of dynamical models is unstable. The results also show that the fitness of variation of soil moisture content simulated by using environmental factors is reasonable in a certain time scale and a big accumulated error will appear on a long time scale over one month.

**Key words:**Actual evapotranspiration; Soil moisture content; Evapotranspiration model; Climatic pattern of year

收稿日期:2001-06-30;修订日期:2001-08-23

基金项目:中国科学院“百人计划”生态系统管理的基础生态学过程研究项目和中国气象科学研究院博士启动基金项目资助。

作者简介:吕厚荃(1957~),女,江苏南京市人,博士,高级工程师,主要从事农业气象情报预报服务、农田蒸散和土壤水分方面研究。

## 1 引言

水循环是生态系统中物质传输及环境调节的重要环节,水分通过蒸散过程从土壤和作物体输送到大气中,在大气中凝结,再以降水的形式返回土壤中。模拟蒸散的物理过程,计算农田蒸散量是进行生态系统水资源评价和管理的重要手段。常用的实际蒸散模型分为两类,一类是实际蒸散模型,另一类是参考蒸散的修正模型。参考蒸散修正模型是以潜在蒸散模型作为水分充足条件下大气环境对蒸散影响的参照标准,在此基础上采用经验模型修正到实际水分状况下的蒸散,而实际蒸散模型则从蒸散的机理出发建立在蒸散的物理过程基础之上。相对而言,实际蒸散模型理论推导严密,但因涉及的参数繁多,在实际观测中难于应用;参考蒸散修正模型仅涉及常规气象要素便于应用。参考蒸散模型中较为常用的是 Penman 模式和 Priestley-Taylor 模式;实际蒸散模式中常用的是密集植被状况下的 Penmar-Menteith 模型和稀疏植被状况下的 Shuttleworth-Wallace 模式。不少学者对上述蒸散模式进行了对比研究,如 Stanard<sup>[1]</sup>在半干旱牧场的自然植被状态下对 Penmar-Menteith 模式、Shuttleworth-Wallace 模式和 Priestley-Taylor 修正模式进行了对比,结果表明:在稀疏植被状况下 Priestley-Taylor 修正模式与 Shuttleworth-Wallace 模式的结果相近,优于 Penmar-Menteith 模式;Kustas 等人<sup>[2]</sup>在试验中对 Penmar-Menteith 方程和 Priestley-Taylor 式的参数进行了对比,发现在一些地区 Priestley-Taylor 方法与实际情况更为接近。

玉米为农业生态系统的主要作物之一,具有高秆稀植的特点,农田蒸散过程较为复杂。文中利用不同气候年型条件下玉米田间试验资料,对以 Penman、Priestley-Taylor 模式为基础的实际蒸散模型和 Penmar-Menteith 和 Shuttleworth-Wallace 蒸散模型进行对比,比较干燥年型和湿润年型不同蒸散模型对模拟土壤水分变化的灵敏度,为生态系统的水分资源管理提供科学依据和定量预测水分状况的方法。

## 2 试验方法

试验在日本千叶大学园艺学部的试验农场进行(35°47'N,139°54'E)。试验小区面积约 600m<sup>2</sup>(20m×30m),为火山灰土。试验期间 1994 年 6 月 30 日至 8 月 10 日,1995 年 6 月 10 日至 8 月 14 日。种植作物为玉米(*Zea mays* L.),种植密度为 35 700 株·hm<sup>-2</sup>(行距为 70 cm,株距为 40 cm)。1994 年玉米播期为 5 月 21 日,1995 年为 5 月 17 日。

1994 年观测开始时植株高度为 55 cm,叶面积指数为 0.8,覆盖率为 20%;1995 年分别为 20 cm,0.1 和 10%;1994 年为少雨年份,1995 年为多雨年。

观测项目主要有辐射和气象要素。全天辐射和反射率由辐射计(EKO,MR-21)测定,净辐射由辐射仪(EKO,CN-11)测定,测器均被安装在离地面 2 m 的高度。地中热流量采用两个热流板测定,分别放置在玉米的植株和行间 5cm 深的土壤中。通风热电耦分别被安装在 0.5m 和 2m 的高度,用以测定 0.5m 和 2m 高度的干、湿球温度。地面温度和叶面温度分别由放置在地面和玉米叶面的热电耦测定。2m 风速采用风杯式风速计测定。1994 年和 1995 年观测分别在裸地和玉米地上进行。测器通过数字转换器与计算机连接,每分钟读数一次,记录在软盘上。在后面的分析和计算中,各要素分别采用日平均值和累加值。土壤水分每天上午 9 时采用张力计测定,当土壤十分干燥时,采用土钻取土测定(3 点重复)。1994 年的测定深度为 0~50cm,1995 年的测定深度为 0~100cm,间隔为 10cm。

玉米植株高度、叶面积指数等植物生长状况调查采用田间取样法每周进行一次。叶面积指数采用比叶面积法,用植物病理调查钳进行采样。计算中的每日植株高度采用生长曲线模拟,叶面系数采用 2 次曲线模拟。叶片的气孔阻力在玉米旺盛发育阶段采用扩散阻力仪(LI-1600)测定,从 6 时至 18 时每小时观测一次。

## 3 实际蒸散计算方法

### 3.1 以 Penman 式为基础的实际蒸散计算方法

Penman 在试验的基础上建立了潜在蒸散方程<sup>[3]</sup>:

$$E_i = \frac{R_n + E_0}{+} \quad (1)$$

式中, $E_i$  为潜在蒸散(mm); $R_n$  为净辐射(mm·d<sup>-1</sup>); $\gamma$  为干湿表常数(hPa/°C); $\Delta$  为饱和水汽压-温度曲线斜率(hPa·K<sup>-1</sup>); $E_0$  为空气干燥力(mm),是风速和水气压的函数:

$$E_0 = 0.35(1 + 0.54 u_2)(e_s - e_a) \quad (2)$$

其中, $u_2$  为 2m 高处风速(m·s<sup>-1</sup>), $e_s$  和  $e_a$  分别为 2m 高处的饱和水汽压和实际水汽压(hPa)。

裴步祥<sup>[4]</sup>在大量试验的基础上,建立了计算实际蒸散的公式:

$$E_a = \begin{cases} E_i \cdot j & W_k \geq W_j \\ (W_k - W_p) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_i \cdot j}{W_j - W_p}\right) \right] & W_k < W_j \end{cases} \quad (3)$$

式中, $E_a$  为实际蒸散(mm), $E_i$  为潜在蒸散, $j$  为作物系数; $W_k$  为土壤湿度, $W_j$  为土壤临界含水量; $W_p$  为凋萎湿度。

### 3.2 以 Priestley-Taylor 式为基础的实际蒸散方程

Priestley-Taylor 式<sup>[5]</sup>采用包括水体和水分充足的作物

面在内的不同下垫面条件平均潜热交换系数( ),为适用于大尺度湿润表面的潜在蒸散模型:

$$E = \frac{R_n - G}{\rho c_p} \quad (4)$$

式中,  $E$  为蒸发潜热 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $\rho$  为常数 ( $= 1.26$ )。

Davies(1973)<sup>[6]</sup>利用土壤表面相对湿度与 Priestley-Taylor 潜在蒸散建立非湿润表面状态下的实际蒸散方程:

$$E_a = E_i \left[ 1 - \exp \left[ - 10.65 \frac{W}{W_k} \right] \right] \quad (5)$$

式中,  $E_i$  为 Priestley-Taylor 潜在蒸散 (mm),  $W$  为 5cm 土壤体积含水量,  $W_k$  为 5cm 达到田间持水量时的体积含水量。

中山敬一等人<sup>[7]</sup>将 Davies 的研究进一步深化,用作物浅根层土壤水分进行实际蒸散计算,将(5)式改写为:

$$E_a = E_0 \left\{ 1 - \exp \left[ - 10.65 \left( \frac{W}{W_k} \right)^x \right] \right\} \quad (6)$$

式中,  $W$  和  $W_k$  分别为 30cm 土层的土壤体积含水量和达到田间持水量时的土壤体积含水量,指数  $x$  为参数,随对象土层深度而变。Lu 等人<sup>[8]</sup>在玉米田的土壤水分模拟,发现用土壤水分状态采用水势使得方程参数 ( $x$ ) 更为稳定。

### 3.3 Penman-Monteith 蒸散方程

Monteith 在 Penman 潜在蒸发模型的基础上,把植被看成一个整体,假定作物冠层为一片大叶,潜热交换发生在叶面上,得出计算植被状况下实际蒸散的组合方程:

$$E = \frac{(R_n - G) + C_p(e_s - e_a)/r_a}{1 + r_s/r_a} \quad (7)$$

式中,  $E$  为蒸发潜热 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $R_n$  为净辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $r_s$  为冠层阻力 ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $r_a$  为空气动力阻力 ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $C_p$  为空气定压比热 ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $e_s$  为参照高度的饱和水汽压 (hPa);  $e_a$  为蒸发表面的实际水汽压 (hPa)。

$$r_a = \frac{[\ln\{(Z - d)/Z_0\}]^2}{k^2} \cdot \frac{1}{u} \quad (8)$$

$Z$  为参照高度 ( $= 2 \text{ m}$ );  $d$  为零平面位移 (m);  $Z_0$  为粗糙长度 (m);  $k$  为 Karman 常数 ( $= 0.41$ );  $u$  为 2m 高度的风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

$d$  和  $Z_0$  由下式计算:

$$d = 0.63 h \quad (9)$$

$$Z_0 = 0.13 h \quad (10)$$

$h$  为植株高度 (m)。

$r_s$  由下式计算:

$$r_s = G^{-1}/L \quad (11)$$

$G$  为玉米叶片平均气孔传力 ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $L$  为叶面积指数。

玉米叶片平均气孔传力根据于贵瑞<sup>[9]</sup>等人的试验结果计算:

在干旱的环境条件下:

$$G = (97.44 + 8.20 Q_p)/(1392 + Q_p) \quad (12)$$

在多雨的环境条件下:

$$G = 0.73 + 3.01 \times 10^{-3} Q_p \quad (13)$$

式中,  $Q_p$  为光子通量 ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ):

$$Q_p = 747 S \quad (14)$$

$S$  为太阳辐射 ( $\text{kw} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

### 3.4 Shuttleworth-Wallace 蒸散方程

Shuttleworth 和 Wallace<sup>[10]</sup>对稀疏覆盖表面的蒸散进行研究,建立了由作物冠层和冠层下地表两部分组成的双源蒸散模型:

$$E = C_c PM_c + C_s PM_s \quad (15)$$

$$PM_c = \frac{A + (C_p D - r_a^c A_s)/(r_a^c + r_a^s)}{1 + r_s^c/(r_a^c + r_a^s)} \quad (16)$$

$$PM_s = \frac{A + [C_p D - r_a^s (A - A_s)]/(r_a^c + r_a^s)}{1 + r_s^s/(r_a^c + r_a^s)} \quad (17)$$

$$C_c = [1 + R_c R_a / R_s (R_c + R_a)]^{-1} \quad (18)$$

$$C_s = [1 + R_s R_a / R_s (R_s + R_a)]^{-1} \quad (19)$$

$$R_a = ( + ) r_a^a \quad (20)$$

$$R_s = ( + ) r_s^s + r_s^c \quad (21)$$

$$R_c = ( + ) r_a^c + r_s^c \quad (22)$$

式中,  $A$  和  $A_s$  分别为冠层上部和地面净辐射通量 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $D$  为参照高度水汽压差 (hb);  $r_a^a$  为作物冠层高度与参照高度间的空气动力阻力 ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $r_a^s$  为地面与冠层间的空气动力阻力;  $r_s^s$  为表面阻力;  $r_a^c$  为作物群体边界层阻力;  $r_s^c$  作物群体冠层阻力,与式(7)中的  $r_s$  相同。上述各阻力的单位均为  $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

$$\text{方程中的各项: } A = R_n - G \quad (23)$$

$$A_s = R_n^s - G \quad (24)$$

$R_n$  和  $R_n^s$  分别为冠层和地面的净辐射通量 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $G$  为土壤热通量 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

$$R_n^s = R_n \exp(-CL) \quad (25)$$

$C$  为净辐射在作物群体中的衰减系数 ( $= 0.7^{[11]}$ )  $L$  为叶面积指数。

$$= \{e_w(T_x) - e_w(T_0)\}/(T_x - T_0) \quad (27)$$

$e_w(T_x)$  和  $e_w(T_0)$  分别为气温为  $T_x$  和  $T_0$  时的饱和水汽压 ( $\text{hPa} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T_x$  和  $T_0$  为参照高度和作物冠层高度的气

温 (K)。

$$r_a^c = r_b/2L \tag{28}$$

其中：

$$r_b = (100/n) (w/uh)^{1/2} [1 - \exp(-n/2)]^{-1} \tag{29}$$

式中,  $r_b$  为平均边界层阻力;  $w$  为平均叶片宽度 (m),  $n$  为群体内涡度扩散衰减常数 ( $= 2.5$ , 无量纲),  $u_h$  为冠层顶部的风速 ( $m \cdot s^{-1}$ ), 用对数风速廓线求得。

对于稀疏冠层, 即  $0 < L < 4$  时:

$$r_a^a = \frac{1}{4} L r_a^a(\infty) + \frac{1}{4} (4 - L) r_a^a(0) \tag{30}$$

$$r_a^s = \frac{1}{4} L r_a^s(\infty) + \frac{1}{4} (4 - L) r_a^s(0) \tag{31}$$

式中,  $r_a^a(\infty)$ 、 $r_a^a(0)$  分别为紧密冠层 ( $L=4$ ) 和裸露地面条件下的冠层高度与参照高度间的空气动力阻力,  $r_a^s(\infty)$  和  $r_a^s(0)$  分别为紧密冠层 ( $L=4$ ) 和裸露地面条件下冠层与地面间的空气动力阻力 ( $s \cdot m^{-1}$ ), 分别由下式计算:

$$r_a^a(\infty) = \frac{h \exp(-n)}{n K_h} [\exp(-z_0/h) - \exp\{-n(Z_0 + d)/h\}] \tag{32}$$

$$r_a^s(\infty) = \frac{1}{ku} \ln \left[ \frac{z_r - d_p}{h - d_p} \right] + \frac{h}{n K_h} [\exp\{n[1 - (Z_0 + d)/h]\} - 1] \tag{33}$$

$$r_a^s(0) = \ln(z_r/z_0) \ln\{(d_p + z_0)/z_0\} / k^2 u \tag{34}$$

$$r_a^a(0) = \ln^2(z_r/z_0) / k^2 u r_a^s(0) \tag{35}$$

式中,  $d_p$  为零平面位移 (m),  $h$  为作物高度 (m),  $z_0$  为地面粗糙长度 (假定  $= 0.01m$ ),  $c_d$  为植株体平均阻力系数, 假定  $= 0.07^{[10]}$ ,  $n$  为涡度扩散衰减系数 ( $= 2.5$ , 无量纲),  $(Z_0 + d)$  为紧密冠层源或汇的高度 (m),  $z_r$  为参照高度 ( $= 2m$ ),  $Z_0$  和  $d$  分别为 Penman-Monteith 方程的粗糙长度和零平面位移。

在本试验中叶面积系数始终小于 3, 因此采用 Shuttleworth 和 Gurney<sup>[10]</sup> 稀疏冠层状态下的零平面位移和粗糙度长, 即:

$$d_p = 1.1 h \ln(1 + X^{1/4}) \tag{36}$$

$$z_0 = z_0 + 0.3 h X^{1/2} \quad 0 < X < 0.2 \tag{37}$$

$$X = c_d L \tag{38}$$

其它参数:

$$K_h = ku \cdot (h - d) \tag{39}$$

$$u_* = ku / \ln\{(z_r - d)/z_0\} \tag{40}$$

$K_h$  为涡度扩散系数 ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ),  $u_*$  为摩擦速度 ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $u$  为 2m 高处风速 ( $m \cdot s^{-1}$ )。

Camillo<sup>[11]</sup> 的研究结果表明地表阻力与土壤表层体积含水量呈线性关系: 考虑到 10 cm 土层的土壤干燥程

度较地表有一定的滞后性, 我们假定当 10 cm 土层水分达到田间持水量时 ( $pF = 1.8$ ),  $r_s^s = 0.02m \cdot s^{-1}$ ; 当土壤水分超过田间持水量时,  $r_s^s = 0$ ; 当出现水分胁迫时 ( $pF = 3.8$ ),  $r_s^s = 2000m \cdot s^{-1}$ , 即:

$$r_s^s = \begin{cases} 0 & > p \\ 0.02 & = p \\ 63.9597 - 1.4073 & < p \end{cases} \tag{41}$$

$r_s^s$  为土壤表面阻力 ( $cm \cdot s^{-1}$ ),  $\theta$  为 10cm 土层土壤含水量 (mm)。

### 4 蒸散计算与土壤水分模拟

#### 4.1 潜在蒸散的计算

Penman 和 Priestley-Taylor 模式的潜在蒸散计算结果如图 1 所示, 图中  $E_p$  为潜在蒸散, 括弧中 P-T 代表 Priestley-Taylor 模式, P 代表 Penman 模式。由图可看出 Priestley-Taylor 模式的计算结果在干旱和湿润年份均小于 Penman 模式, 在干燥的 1994 年比 Penman 模式小 10% 左右, 在湿润的年份偏小 20% 左右。表明 Penman 式中风速和

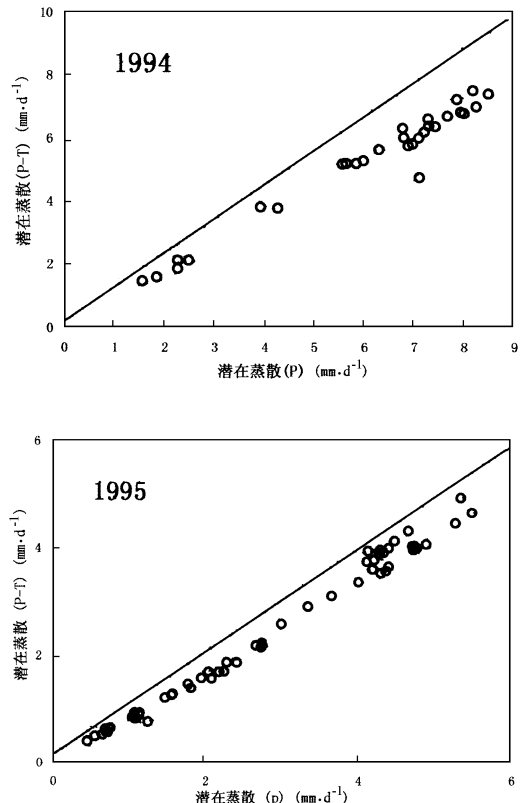


图 1 不同年份下 Penman 模式和 Priestley-Taylor 模式潜在蒸散的对比

Fig. 1 Comparison of potential evapotranspiration calculated by Penman model and Priestley-Taylor model in different years

饱和差的函数空气动力项的影响大于仅含有辐射项 Priestley-Taylor 模式中表达的湿润表面的平均蒸散系数的影响。图 1 还显示出两模式计算出的潜在蒸散均为 1994 年大于 1995 年,对于以辐射项为主的 Priestley-Taylor 模式,干燥少雨的年份(1994)玉米生长季的太阳辐射量比多雨年份(1995)大,因而潜在蒸散也大;对 Penman 模式而言,干燥年份辐射量大,湍流交换较强,1994 年的空气干燥力较湿润 1995 年大 10~20 倍的左右。

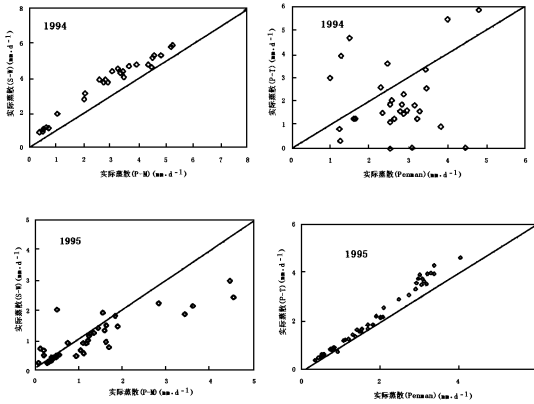


图 2 不同计算方法实际蒸散计算结果的对比  
Fig. 2 Comparison of actual evapotranspiration calculated by different models

### 4.2 实际蒸散的计算

图 2 显示了不同蒸散模型的实际蒸散量的计算结果,图中  $E_a$  为实际蒸散,括弧中 P-M 代表 Penman-Monteith 模式,S-W 代表 Shuttleworth-Wallace 模式。在计算过程中 Priestley-Taylor 修正模型(式 6)中系数“ $x$ ”取值为 5;Penman 修正模型(式 3)中作物系数  $f_c$  取值为 0.6。由图可看出在干燥的 1994 年参考蒸散修正模型的计算结果差异很大,与潜在蒸散反映出的规律完全不同,而在湿润的 1995 年二者呈现出较为一致的变化规律,表明土壤水分胁迫对土壤水分计算的影响较大。

在计算动力模型的过程中,模型参数体现出了 2a 作物生长状况和气候年型的差异。Penman-Monteith 模式中的主要阻力参数为冠层阻力和空气动力阻力,由于 1995 年试验期早于 1994 年,并且生长季积温偏少,玉米叶面积小,冠层阻力大于 1994 年;空气动力阻力也较 1994 年大 1 倍左右。Shuttleworth-Wallace 模式中 1995 年的群体边界层阻力、冠层上、下的空气动力阻力均比 1994 年大,特别是空气动力阻力比 1994 年大 10 倍左右;由于干旱,1994 年大部分时段的地表阻力偏大,比 1995 年大 1 倍左右。图 2 显示出干燥年份(1994)由 Shuttleworth-Wallace 模式计算的实际蒸散大于 Penman-Monteith 模式的计算结果,湿润年份(1995)大部分时间 Penman-Monteith 模式的

计算结果大于 Shuttleworth-Wallace 模式计算的实际蒸散,可能是由于干燥少雨气候条件下(1994 年)空气动力阻力较小,湍流交换强,地表和冠层的实际蒸散之和较大;多雨气候条件下(1995 年),作物生长初期,地面覆盖量小,来自地表和冠层的双源实际蒸散大于单一的冠层蒸散,当叶面和地面都较湿润时,冠层阻力和地面阻力均较小,两种动力模型的计算结果相近;在试验后期由于地面阻力较大,双源实际蒸散模型的计算结果小于单源模型。

### 4.3 土壤水分模拟

土壤水分变化根据土壤水分平衡方程:

$$M_{n+1} = M_n + P_n - [E_m + (D_{2,n} - D_{1,n}) + (F_{2,n} - F_{1,n})] \quad (42)$$

式中, $M_n$  和  $M_{n+1}$  分别为  $n$  日和  $n+1$  日的土壤含水量(mm); $P_n$  为  $n$  日的降水量(mm); $E_m$  为当日的实际蒸散量(mm); $D_{2,n}$  和  $D_{1,n}$  分别为地表径流的支出和收入(mm); $F_{1,n}$  和  $F_{2,n}$  土层底部的毛管上升水和向下渗漏的水(mm)。在此对象土层取 30cm。

假定雨量与土壤水分含量超过田间持水量( $M_c$ ),即  $M_n + P_n > M_c$  时,产生径流或渗漏,土壤含水量等于田间持水量,即  $M_{n+1} = M_c$ 。

按照达西定律,毛管水( $F_{1,n}$ )由下式计算:

$$F_{1,n} = K(\theta) (d / dz) \quad (43)$$

式中, $K(\theta)$  为非饱和水力传导系数, $d / dz$  为土壤水势梯度。

假定土壤水势  $pF$  为 3.0,出现严重的水分胁迫时, $K(\theta) = 0$ ;当土壤水势  $pF$  为 1.8,达到田间持水量时, $K(\theta) = 1.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;同时假定深层(100 cm 左右)土壤水势可达到田间持水量。根据土壤水分特征曲线土壤湿度与水势的关系按照幂函数来计算。

$$\theta = a \cdot \psi^{-b} \quad (44)$$

式中, $\theta$  为土壤水分含量(mm); $a$  和  $b$  为经验常数;为土壤水势。

在各种资料连续的情况下,以第一天为初始值代入(42)式对土壤水分进行模拟计算,结果如图 3 所示。图 3 显示出 1994 年试验前期几种蒸散模型的模拟效果均较好,其中以 Shuttleworth-Wallace 模式的模拟效果最佳;相对而言,参考蒸散修正模型的拟合效果好于动力模型。在 1995 年多雨的气候条件下,参考蒸散修正模型的拟合效果总体上好于动力模型,Penman 修正模型的模拟效果好于 Priestley-Taylor 修正模型;但在中后期由于累积误差较大,大部分模型的拟合效果均不佳。前期受玉米生长状况影响,叶面积和植株高度较小,动力模型产生的误差较大,但 Penman-Monteith 模式在 7 月 11 日至 19 日模拟效

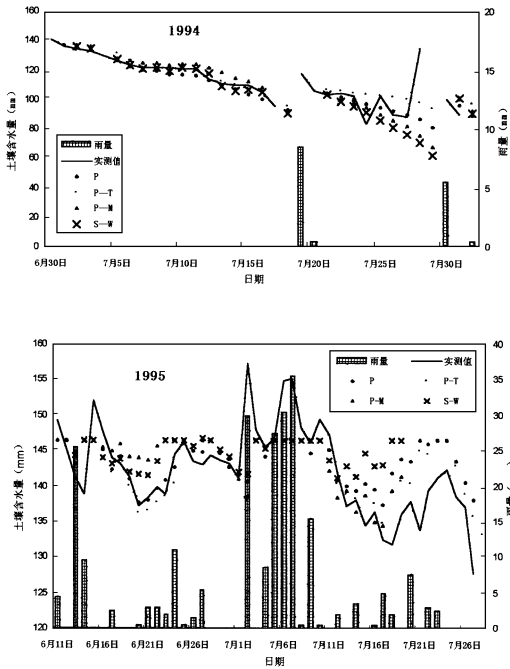


图 3 不同蒸散模型对土壤水分变化的模拟

Fig. 3 Simulation for variation of soil moisture using different evapotranspiration models

果最好, Shuttleworth-Wallace 模式后期模拟值明显偏大, 也许是由于土壤表面阻力过大, 蒸散量过小而造成的。

### 5 结果与讨论

从蒸散计算和土壤水分模拟结果可看出以气象要素和土壤水分为主的参考蒸散修正模型具有一定的稳定性, 动力模型在后期产生的误差较大。干燥年型几种蒸散模型的模拟效果均好于湿润年型, 尤其是动力模型。多雨年份参考蒸散修正模型的模拟效果好于动力模型, 也许是由于土壤表面和叶面湿润状况在动力模型的阻力项中未进行精确计算的缘故, 特别是本研究中 Shuttleworth-Wallace 模式的地表阻力采用 10cm 土壤水分的线性方程来拟合, 在试验后期阻力明显偏大, 达  $300\text{mm s}^{-1} \sim 800\text{mm s}^{-1}$ , 从而使得蒸散偏小, 土壤水分模拟值偏大; 而 Penman-Monteith 模式在叶面积小于 1.0 时, 由于冠层阻力较小, 与 Shuttleworth-Wallace 模型相比模拟效果较差。但在湿润年份, Penman-Monteith 模式在叶面积较大时模拟效果较好。相对而言, 参考蒸散修正模型中含有土壤水分参数, 对土壤水分变化的模拟较为稳定, 动力模型中含有参数较多, 并非全部实测, 因而在玉米生长量较小、表面干湿状况变化较大时模拟的稳定性较差。模拟结果表明, 使用环境要素模拟土壤水分变化在一定时间长度内效果较好, 时间过长可造成较大的累积误差。

### 参考文献 (References) :

[ 1 ] Stannard. D I. Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland[J]. *Water Resour. Res.*, 1993, 29(5) :1379 ~ 1392.

[ 2 ] Kustas W. P. , Stannard D. I. and Allwine K. J : Variability in surface energy flux partitioning during Washita 's 92 : Resulting effects on Penman-Monteith and Priestley-Taylor parameters[J]. *Agr. Forest Meteor.* , 1996, 82:171 ~ 193.

[ 3 ] Penman H.L. . Natural evaporation from open water , bare soil and grass[J]. *Proc. Roy. Soc.* 1948 ,193:120 ~ 145.

[ 4 ] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算[M]. 北京:气象出版社, 1989. Pei B. X. ,Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration [M]. Beijing: Meteorology Press , 1989.

[ 5 ] Priestley C. H. B. and Taylor R. J. . On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, 1972, 100:81 ~ 92.

[ 6 ] Davies J. A. and Allen C. D. . Equilibrium, potential and actual evaporation from cropped surfaces in southern Ontario[J]. *Appl. Meteor.* 1973, 12: 649 ~ 657.

[ 7 ] Nakayama K. Kon H. and Matsuoka N. , : Estimation of soil moisture in the shallow root zone region [J]. *Agr. Meteor.* 1993, 48(5) : 851 ~ 854.

[ 8 ] Lu H. Q. , Nakayama K. , Yu G. R. . Application of revised Priestley-Taylor model for soil moisture prediction in a maize field under drought condition [J]. *Agric. Meteor.* , 1997, 52 (5) :473 ~ 476.

[ 9 ] 于贵瑞, 中山敬一, 吕厚荃. 环境变数を用いたトウモロコシ葉の気孔 コンダクタンスのモデリング[J]. 农业气象, 1996, (52)4:321 ~ 330. Yu G. R. , Nakayama K and Lu H. Q. , Modeling stomatal conductance in maize leaves with environmental variables, 1996[J]. *Agric. Meteorol.* 1996, 52(4) 321 ~ 330.

[ 10 ] Shuttleworth, W. J. and Wallace, J. S. Evaporation from sparse crops an energy combination theory [J]. *Q J. Meteor. Soc.* 1985, 111: 839 ~ 855.

[ 11 ] Monteith J. L. . Principles of Environmental Physics[M]. London: Edward Arnold, 1973.

[ 12 ] Shuttleworth, W. J. and Gurney R. J. . The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Q. J. Meteor. Soc.* 1990, 116:497 ~ 519.

[ 13 ] Camillo Peter J. and Gurney Robert J. . A resistance parameter for bare-soil evaporation models[J]. *Soil Sci.* 1986, 141(2) : 95 ~ 105.