三温模型——基于表面温度测算蒸散和评价环境 质量的方法Ⅳ. 植被蒸腾扩散系数

邱国玉¹ 吴 晓¹ 王 帅¹ 宋献方²

(1 北京师范大学资源学院土地资源研究所 北京 100875)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要 作为蒸散量的测算和环境评价的一种方法,通过近年来对三温模型的研究,该文详细探讨了植被蒸腾扩散系数(h_{at}),并通过实验验证了它在不同环境条件下的特性和应用前景。在该模型中, h_{at} 的表示式为 $h_{at} = (T_c - T_a) / (T_p - T_a)$,式中 T_c 、 T_p 和 T_a 分别为冠层温度、没有蒸腾(蒸腾量为零)的冠层温度和气温。理论上,植被蒸腾扩散系数的取值范围为 $h_{at} \leq 1$, h_{at} 的取值范围可以决定植被蒸腾量的大小,该系数越小,蒸腾量越大。为了证明 h_{at} 的这些特性,在1994~1999年的5年间,用3种作物(高粱(*Sorghum bicolor*),番茄(*Lycopersicon esculentum*)和甜瓜(*Cucumis melo*))进行了5次试验。实验结果表明: h_{at} 值与感热通量比率(H/H_p)的值近似相等,二者之间回归线的斜率接近为1,截距接近0,回归系数为 $r^2 = 0.70$ 。此外, h_{at} 值不仅能较好地反映植物根系区的土壤水分状况,也能较好地反应天气状况。在缺水条件下, h_{at} 主要受根部区域的水分状况影响。所以, h_{at} 可作为作物水分亏缺的指标。当植被受到其它环境胁迫(污染、高温等)时, h_{at} 可作为评价环境质量的指标。植被蒸腾扩散系数的主要优点不仅是能很好地反映蒸腾过程和确定蒸腾量,而且容易测得,便于遥感应应用。

关键词 三温模型 表面温度 感热通量 环境评价 蒸腾扩散系数

THREE TEMPERATURE (3T) MODEL—A METHOD TO ESTIMATE EVAPO- TRANSPIRATION AND EVALUATE ENVIRONMENTAL QUALITY BASED ON SURFACE TEMPERATURE. IV. PLANT TRANSPI- RATION TRANSFER COEFFICIENT

QIU Guo-Yu¹ WU Xiao¹ WANG Shuai¹ and SONG Xian-Fang²

(1 College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences & Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract Background and Aims Vegetation transpiration rate sensitively responses to environmental stress introduced by air pollution, environmental degradation (soil and water), and global change. Based on energy balance analysis, by introducing the temperature of a canopy without transpiration, the objectives of this study are to propose a remotely measurable plant transpiration transfer coefficient (h_{at}) and to verify its characteristics under various environmental conditions.

Methods The h_{at} is defined as $(T_c - T_a) / (T_p - T_a)$, where T_c , T_p , and T_a are temperatures of vegetation canopy, a non-transpiring canopy, and air, respectively. Five experiments were carried out to verify the proposed coefficient.

Key Results Theoretical analysis and experimental results show $h_{at} \leq 1$. If $T_c = T_p$, h_{at} has its maximum value ($h_{at} = 1$) and transpiration rate has its minimum value (zero). This boundary is determined by lack of water for transpiration. On the other hand, when h_{at} has a minimum value, transpiration can reach its maximum value (potential transpiration rate). This boundary is determined by the availability of energy for transpiration.

Conclusions Therefore, h_{at} can determine transpiration rate from its minimum value to its maximum value. A lower value of h_{at} corresponds to a higher transpiration rate.

Key words Environmental quality, Plant transpiration transfer coefficient, Remote sensing, Three temperatures model, Transpiration

三温模型是邱国玉等近年提出的测算蒸散量和评价环境质量的一种方法(Qiu, 1996; Qiu *et al.*, 1996a, 1996b, 1998, 1999a, 1999b, 2000, 2002, 2003, 2006) 因其模型的核心是表面温度、参考表面温度和气温, 故被称为“三温模型”。该模型包括 5 个基本模型, 即土壤蒸发模型、土壤蒸发扩散系数(评价土壤水分状况和土壤环境质量) 植被蒸腾模型、植被蒸发扩散系数(评价植被水分状况和植被环境质量) 和作物水分亏缺系数。

植被表面温度对水分状况和环境质量的反应很敏感。王丽明(2005) 等的实验结果证明, 在土壤含水量、叶水势、气孔导度、光合速度、蒸腾速度等众多的参数中, 植物表面温度对土壤水分状况和环境的变化最敏感。20 世纪中后期的大量研究表明, 土壤湿度状况、植物温度和植被蒸腾率之间相互联系密切。Monteith 和 Szeicz(1962) 以及 Monteith(1965) 从理论上探讨了表面温度和气孔阻力的关系, 提出了冠层-大气温差和净辐射、风速、水汽压梯度、空气动力学阻力以及冠层阻力等参数之间的定量关系。Carlson 等(1972) 指出, 当植物含水量和水汽压差减少时, 植物的冠层温度会升高。后来, Ehrler(1973) 直接用冠层-气温差来指导灌溉, 该研究的一个重要结论是验证了冠层-气温差和水汽压差之间的线形关系。在这些研究的基础上, 逐步形成了计算植物蒸腾的温度差方法(Hatfield, 1985; Idso *et al.*, 1977; Jackson *et al.*, 1977; Monteith, 1981; Stone & Horton, 1974; Tanner & Fuchs, 1968)。然而到目前为止, 温度差方法的应用主要限于用一个已知的蒸腾量来计算冠层阻力, 而很少直接用于计算蒸腾量。

近年来, 随着遥感技术的进步, 植物冠层温度在遥感领域得到应用。Moran 等(1994) 提出用植被表面温度、气温和植被指数来计算作物水分亏缺。该研究的最有意义之处是探讨了不完全覆盖植被区的水分亏缺问题。后来, 冠层-气温差被广泛应用于计算蒸散量(Ben-Asher *et al.*, 1992; Gardner *et al.*, 1981; Hatfield, 1983; Heilman *et al.*, 1976; Jackson *et al.*, 1983; Qiu *et al.*, 1996a, 1998, 2000, 2002; Stone & Horton, 1974) 和光合作用(Weyers & Lawson, 1997) 并被进一步应用于计算作物水分亏缺(Idso, 1982; O Toole *et al.*, 1984; Qiu *et al.*, 1996b; Tanner, 1963)。在这些研究的基础上, 表面温度已经变成一个获取生物环境信息的可靠技术, 并广泛应用于 CO_2 通量监测、污染监测和农业领域(Jones, 1999)。

然而, 要利用上述方法测算蒸腾量, 除了需要表面温度外, 还需要一些实地测量的参数, 比如风速、水汽压等, 因此它们在遥感方面的应用受到一定限制。而三温模型由于参数少、计算简单、容易遥感观测等优点, 简便适用, 被称为“应用遥感技术观测实际水文过程非常有价值, 非常有意义的一步”。因此, 本研究的目的是详细讨论能表示植被水分状况和评价环境质量的植被蒸腾扩散系数的性质, 并在理论分析的基础上用多种环境条件下的实验结果来证明这些特性。

1 植被蒸腾扩散系数

1.1 定义和性质

在三温模型中, 植被蒸腾速度可以用下式计算:

$$T = R_n - R_{np} \frac{T_c - T_a}{T_p - T_a} \quad (1)$$

式中: T 是蒸腾速率($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), R_n 和 R_{np} 是冠层和没有蒸腾的参考冠层的净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T_c 是冠层温度, T_p 是没有蒸腾的参考冠层温度, T_a 是气温(温度单位是 $^{\circ}\text{C}$)。方程(1) 右边表示温度的项是计算蒸腾的关键部分。所以, 我们把它定义为植被蒸腾扩散系数(h_{at}):

$$h_{at} = \frac{T_c - T_a}{T_p - T_a} \quad (2)$$

通过对该方程的理论分析, 可以得出植被蒸腾扩散系数的取值范围为 $h_{at} \leq 1$ 。

1.2 h_{at} 的取值和蒸腾速度边界之间的关系

1.2.1 蒸腾速度上限

当土壤有充足水分或没有环境胁迫时, T_c 取最小值(此时 T_c 低于 T_a), 对应的 h_{at} 也取最小值。在此条件下, 植被蒸腾速度最大(蒸腾速度等于潜在蒸腾速度)。 h_{at} 的最小值取决于可获得的用于蒸腾的能量(太阳辐射等) 和水汽传输速度(水汽压梯度等) 即取决于大气条件。为了验证这个结论的正确性, 我们将三温模型计算的结果和 Penman-Monteith 公式计算的结果进行比较。

在地面被完全覆盖的冠层下, 土壤热通量可忽略不计。当土壤水分充足, h_{at} 取最小值时, 植被不受任何水分限制, 气孔阻力近似为零。此时的植被蒸腾量可表述为(Tanner & Fuchs, 1968):

$$T = R_n - \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a} \quad (3)$$

式中: ρC_p 是大气体积热容量($0.001\ 2\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$), r_a 是空气动力学阻力($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)。用

Penman-Monteith 公式,我们还可以给出 T 与水汽压之间的关系如下 (Monteith & Unsworth, 1990):

$$T = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (e_s - e_a) \gamma r_a}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

式中: Δ 是在平均温度下饱和水汽压-温度曲线的斜率, e_s 是大气温度下的饱和水汽压 (mb), e_a 是水汽压 (mb), γ 是湿度常量 ($0.66 \text{ mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。

联合方程 (3) 和方程 (4), 得到用常规方法表示冠层温差和水气压差关系的方程式:

$$T_c - T_a = \left[\frac{r_a}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right] R_n - \frac{1}{\Delta + \gamma} (e_s - e_a) \quad (5)$$

为了便于讨论, 在这里我们用实测值和常量替代变量, 使方程 (5) 进一步简化。为此, 利用 1994 年 7 月 5 日所测的实验数据 (实验 1, 在高粱 (*Sorghum bicolor*) 地进行, 实验过程将在后面给出) 计算出 $r_a = 258.91 \times 10^{-6} \text{ d} \cdot \text{m}^{-1}$; $\Delta = 2.51 \text{ m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。当天的天气很好, 根部供水充分。所以, 方程 (5) 简化为如下:

$$T_c - T_a = 44\,921 \times 10^{-6} R_n - 315\,457 \times 10^{-6} (e_s - e_a) \quad (6)$$

方程 (6) 显示, 冠层-气温差随着蒸腾所获能量 (R_n) 的增加而增加, 随着水汽压差的增加而减少。同样, 三温模型也可将冠层-气温差与水汽压差联系起来, 表达式为:

$$T_c - T_a = \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{T_p - T_a}{R_{np}} \right] R_n - \frac{1}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{\rho C_p (T_p - T_a)}{r_a R_{np}} (e_s - e_a) \quad (7)$$

将 1995 年 7 月 5 日得到的实测值或计算值代入方程 (7) ($T_p = 34.91 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_a = 31.18 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_{np} = 17.78 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, 其它变量和常量同方程 (6)), 方程 (7) 可简化如下:

$$T_c - T_a = 44\,942 \times 10^{-6} R_n - 315\,601 \times 10^{-6} (e_s - e_a) \quad (8)$$

通过比较, 我们发现方程 (6) 与方程 (8) 非常近似。此结果表明, 在不缺水的情况下, h_{at} 给出的蒸腾量上限与 Penman-Monteith 公式吻合。此结果也进一步证实 h_{at} 的最小值由 $T_c - T_a$ 来决定。也就是说, h_{at} 的最小值或蒸腾速度的最大值主要受获得的能量和水汽压差的影响。

1.2.2 $T_c = T_a$ 时的蒸腾速度

当所有的辐射能量都用于蒸腾时, 感热为零。此时 $T_c = T_a$ 。如果在植被完全覆盖的条件下忽略土壤热通量, 用 Bowen 比法, 我们可以得出 $T = R_n$ ($T_c = T_a$ 时, Bowen 比等于 0)。同样, 用三温模型

(方程 (1)) 也可以得到 $T = R_n$ 。这说明当 $T_c = T_a$ 时, 三温模型和 Bowen 比法吻合, 此时 $h_{at} = 0$, 蒸腾速度由净辐射决定。

1.2.3 蒸腾速度的下限

当土壤水分减少至凋萎系数, 没有水分可以供给植被蒸腾时或植被处于严重环境胁迫时, T_c 有最大值 ($T_c = T_p$), 相应的 h_{at} 也有最大值 ($h_{at} = 1$), 植被蒸腾速度有最小值。在此情况下, 根据三温模型, 有 $h_{at} = 1$, $R_n = R_{np}$, $T = 0$ 。 h_{at} 的最大值由土壤水分状况决定。

从以上讨论可得知, h_{at} 的取值范围决定了植被蒸腾速度的范围, h_{at} 的值越小, 相应的蒸腾速度越高。

2 方法和材料

2.1 实验方法和材料

为了验证 h_{at} 的性质, 我们在 1994 ~ 1999 年间进行了 5 次实验。其中, 实验 1 在日本鸟取大学干燥地研究中心 ($35^\circ 32' \text{ N}$, $134^\circ 13' \text{ E}$) 进行, 其它 4 个实验在日本国立农业工程研究所进行。实验期间, 把与植物叶片颜色相同的绿色纸裁剪成叶片形状, 做成一个没有蒸腾的参考叶片, 并将参考叶片固定于冠层上部, 以避免被其它叶片遮阴。参考叶片安装的倾斜角度、方位等尽量和同时观测的植物叶片保持一致。在这 5 个不同生长环境, 不同尺度上的实验中, 实验 1 用来计算和验证 h_{at} , 其它 4 个则是通过设置可控环境条件下的对比实验来验证 h_{at} 的特性。

实验 1 (大田高粱作物, 1994 年 7 ~ 8 月)

该实验在 1 hm^2 的平坦沙地上进行。试验地中心安装了 1 台称重式蒸渗仪, 供试作物为高粱。蒸渗仪周围和里面的植被密度均为每平方米 8 株。用蒸渗仪测量实际蒸散量, 用微型蒸渗仪测量土壤蒸发。用热电偶测量高粱叶片温度, 参考叶片温度和气温 (每 10 min 记录 1 次)。太阳辐射, 大气压和其它气象参数从鸟取大学干燥地研究中心的气象站取得。

实验 2 (生长室, 溶液培养的番茄 (*Lycopersicon esculentum*), 1997 年 5 月)

生长室的房屋面积为 7.3 m^2 , 配备有照明和空气调节装置。气温设置为 $31 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度定为 60%。光照时间为 5:00 ~ 17:00, 光强为 $157 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在一个尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 的水槽中用标准营养液 (Otsuka Chemistry, Osaka, Japan) 培

养 5 株番茄。实验期间,用电子天平(SG32000 , Mettler Toledo Inc. , Freifensee , Switzerland)测量蒸腾,观测间隔为 10 min。用热电偶测量番茄叶片温度、参考叶片温度和气温(测量间隔为 5 s ,每 10 min 记录 1 次)。

实验 3(生长室,盆栽番茄,1997 年 5 月)

此实验在和实验 2 的同一生长室进行。实验植物是一株盆栽番茄,盆高 0.3 m,直径为 0.26 m,里面装满土。气温设置为 35 ℃。其它条件和方法跟实验 2 中的一样。

实验 4(大型温室,甜瓜(*Cucumis melo*),1998 年 6~7 月)

此实验在一个长 60.4 m、宽 14.4 m、高 3.9 m 的玻璃温室内进行。土壤为壤土。栽培时,在土壤表面覆盖一层塑料膜阻止蒸发。甜瓜栽培株距为 0.80 m,行距为 1.5 m。在薄膜下用滴灌方式供水。实验安排两个灌溉处理,一个区域充分灌溉(区域 A),另外一个不灌溉(区域 B)。太阳辐射用 EKO-MS42 辐射计(EKO Co. Ltd. , Tokyo , Japan)测量。气温和参考叶片温度的测量同实验 2。冠层温度用红外放射温度计测量(THI-500 , Tasco Co. Ltd.),土壤含水量用时域反射仪测量(TDR :1502B Tester , SDMX50 Multiplexer , 21X Datalogger , Campbell Scientific Inc.)。

实验 5(温室,盆栽番茄,1999 年 5 月)

此实验在和实验 4 在相同的温室内进行,用 1 株盆栽番茄。盆的尺寸和土壤均和实验 3 中的一样。大气湿度用 TDK CHS-PR 湿度传感器测量(TDK Ltd. , Tokyo)。蒸腾用电子天平(同实验 2)进行测量。其它参数和和测量方法与实验 4 中的一样。

2.2 计算方法

植被冠层的感热通量(H)和没有蒸腾的参考叶片的感热通量(H_p)可表述如下：

$$H = \frac{\rho C_p (T_c - T_a)}{r_a} \tag{9a}$$

$$H_p = \frac{\rho C_p (T_p - T_a)}{r_{ap}} \tag{9b}$$

这里 r_{ap} 是没有蒸腾的参考叶片的空气动力学阻力($s \cdot m^{-1}$)。Qiu 等(1996a)指出, r_{ap}/r_a 的斜率接近 1,它的轴截距接近 0,因此我们得到如下方程：

$$h_{at} = \frac{T_c - T_a}{T_p - T_a} \approx \frac{H}{H_p} \tag{10}$$

3 结果和讨论

3.1 h_{at} 和感热通量的关系

方程(10)给出了的 h_{at} 和感热通量的关系,为证明其正确性,用实验 1 测得的数据做一个线性回归进行验证。此期间土壤完全被群落覆盖,根据三温模型,有 $H/H_p = (R_n - T)/R_{np}$,式中 T 为蒸渗仪所测蒸腾速度, R_n 和 R_{np} 用测量的太阳辐射和表面温度计算,结果显示在图 1 中。仔细分析图 1 发现, h_{at} 和 H/H_p 的取值的范围均在 -0.3 和 +0.5 之间。回归线的斜率近似为 1,截距近似为 0,回归系数为 $r^2 = 0.70$ 。实验结果表明可以用 h_{at} 替代 H/H_p 。实验 1 的面积范围为 1 hm^2 ,接近中等尺度,表明其用来遥感测量的可能,虽然该尺度不是很大,但也具有一定代表性,从而可以进行更大尺度上 h_{at} 的推广应用尝试。

图 1 高粱植被蒸腾扩散系数和感热通量比率之间的关系(实验 1)

Fig.1 Relationship between plant transpiration transfer coefficient (h_{at}) and the ratio of sensible heat fluxes (H/H_p) of sorghum plants in an open field(Experiment 1)

3.2 在不同环境条件下 h_{at} 的特性

3.2.1 生长室营养液栽培番茄的 h_{at}

图 2 表示灌水后 3 d(5 月 7~9 日)生长室营养液栽培番茄的 h_{at} 的变化情况。在 5 月 7 日的清晨往水槽里添加营养液。在这 3 d 里,因蒸腾失水而导致水槽里水位下降,由此导致番茄的水分胁迫。其它环境变量均不变。第一天,1400 h 之前的蒸腾速度大于 $250 g \cdot h^{-1}$,然后逐渐减小至 1600 h 的 $200 g \cdot h^{-1}$ 。第二天,1200 h 之前蒸腾速度接近 $160 g \cdot h^{-1}$,然后逐渐减小至 1600 h 的 $100 g \cdot h^{-1}$ 。第三天的蒸腾速度接近 $50 g \cdot h^{-1}$ (图 2a)。在这 3 d 里,作物水分亏缺系数($CWSI = 1 - T/T_p$, T 为蒸腾率, T_p 为最大蒸腾率)的平均值分别为 0.06、0.44、0.78。

图2 灌水后3 d(1997年5月7~9日)营养液栽培番茄植株的蒸腾速率(a)、参考叶片、冠层和大气的温度(b)、植被蒸腾扩散系数(c)
Fig.2 Transpiration rate (a), temperature of non-transpiring leaf, canopy and air (b), and plant transpiration transfer coefficient (h_{at}) (c) in hydroponically grown tomato plants during the 3-day drying period (May 7-9, 1997)

T_c:冠层温度 Temperature of canopy T_p:没有蒸腾的冠层温度 Temperature of non-transpiring canopy T_a:气温 Air temperature

图2b显示3 d里3种温度的变化。因为设定了稳定的环境,T_c的变化幅度很大、T_p和T_a相对稳定。第一天1 000~1 400 h,T_c约为29℃,然后增加到1 600 h的33℃。到第三天,T_c达到35℃。随着水位下降,番茄受到的水分胁迫增大,3 d里T_c增加

了6℃。

图2c显示了3 d里h_{at}相应的变化。第一天h_{at}的平均值为-0.4,第二天h_{at}的平均值上升到0.2,第三天h_{at}的值接近0.6。该实验的结果表明:当作物水分亏缺加大时,h_{at}的值也增大。在这3 d,CWSI平均值分别为0.06、0.44、0.78,相应的h_{at}为-0.4、0.2、0.6。

3.2.2 生长室土壤栽培番茄的 h_{at}

图3表示的是灌水后3 d内(5月24~26日)生长室土壤栽培番茄的h_{at}的变化。在5月23日晚上进行灌溉。在此实验中,唯一变化的环境因素为土壤含水量,它因为蒸腾而变小,从而导致栽培番茄受到水分胁迫,其它的环境变量不变。可以看出,3 d里蒸腾速度分别为120~140、80~120、30~70 g·h⁻¹(图3a)相应的CWSI的平均值分别为0.08、0.22、0.54。在此期间,T_p为44℃,T_a为35℃。T_c值随水分亏缺而上升。第一天T_c约为33℃,比T_a低2℃。在第二天的1 700 h,T_c上升到38℃,比T_a高出3℃。第三天,T_c不断增加直到约43℃(图3b)。这3 d里相应的h_{at}由-0.2上升到0.8。这些结果也明确表明h_{at}的值随水分亏缺而增加。

3.2.3 温室甜瓜的 h_{at}

此实验在1998年6~7月进行,期间灌溉分别于6月21日晚和7月3日晚进行。图4表示的是实验期间的太阳辐射(图4a)、土壤体积含水量(图4b)、温度(图4c)、h_{at}(图4d),均为白天的平均值。如图4b所示,灌水区A的土壤含水量高于灌水区B,相应的h_{at}值则B区大于A区(图4d)。这些结果又一次证明h_{at}值随土壤含水量减少而增加。

图4还表明,在整个实验期内,尽管随着蒸腾土壤含水量变小,但土壤含水量仍然相对较高(θ≥0.25 m³·m⁻³)。因此,甜瓜植株没有经历或很少经历水分亏缺。在A区土壤含水量为0.30~0.40 m³·m⁻³,B区为0.25~0.30 m³·m⁻³,因此相应的h_{at}的值较低,在-4~-1之间变动。

3.2.4 温室土壤番茄的 h_{at}

图5表示了温室土壤番茄灌水后4 d内(5月21~23日)h_{at}及其它参数的变化,数据为小时平均值。与实验4相比,此实验中土壤含水量较低,为0.1~0.3 m³·m⁻³,多数时间土壤含水量<0.15 m³·m⁻³(图5c)。所以,多数时候番茄植株经历水分亏缺。在此期间,天气也大幅变化。从5月21~23日,天气晴好。太阳辐射通常大于300 W·m⁻²(图5a),相对湿度通常小于30%(图5b)。然而,5月24日天气

图3 灌水后3 d(1997年5月24~26日)盆栽番茄植株的蒸腾速率(a)、参考叶片、冠层和大气的温度(b)、植被蒸腾扩散系数(c)
Fig.3 Transpiration rate (a), temperature of non-transpiring leaf, canopy and air (b), and plant transpiration transfer coefficient (h_{at}) (c) in potted (soil cultivated) tomato plants during the 3-day drying period (May 24 - 26, 1997)

T_a 、 T_p 、 T_c 同图2 See Fig. 2

转阴,下午开始下雨。太阳辐射 $< 150 W \cdot m^{-2}$,相对湿度 $> 50\%$ 。相应的蒸腾速度也由第一天的 $150 g \cdot h^{-1}$ 逐渐减小到第四天 1 600 h 的 $1 g \cdot h^{-1}$ (表5d)。在此期间, T_p 和 T_a 的变化受天气的影响,而 T_c 的变化受天气条件和土壤水分的双重影响(图5e)。

图4 1998年6~7月温室甜瓜植株的太阳辐射(a)、土壤体积分含水量(θ)(b)、参考叶片、冠层和大气的温度(c)、植被蒸腾扩散系数(d)
Fig.4 Solar radiation (a), volumetric soil water content (θ) (b), temperature of non-transpiring leaf, canopy and air (c), and plant transpiration transfer coefficient (h_{at}) (d) in melon plants grown in a glasshouse in June-July 1998

T_a 、 T_p 、 T_c 同图2 See Fig. 2

图5 灌水后4 d(1999年5月21~23日)土壤盆栽番茄植株的太阳辐射(a)相对湿度(b)土壤体积含水量(θ_v)(c)蒸腾速率(d)参考叶片、冠层和大气的温度(e)和温室土壤番茄灌水后4 d内的植被蒸腾扩散系数(f)

Fig.5 Comparisons of solar radiation (a), relative humidity (b), volumetric soil water content (θ_v) (c), transpiration rate (d), temperature of non-transpiring leaf, canopy and air (e), and plant transpiration transfer coefficient (h_{at}) (f) in potted (soil cultivated) tomato plants during the 4-day drying period (May 21–23, 1999)

T_a 、 T_p 、 T_c : 同图2 See Fig. 2

但是,当土壤含水量较低时, T_c 主要受土壤水分的影响。如图5f所示,第一天, T_c 比 T_a 小,此后,它增加并超过 T_a ,同期相应的 h_{at} 值也逐渐从下限-0.1增加到上限0.8。

4 结 论

作为衡量植被蒸散量和评价植被水分状况的一种模型方法,蒸腾扩散系数 h_{at} 的表示式为 $h_{at} = (T_c - T_a) / (T_p - T_a)$,模型中 T_c 、 T_p 和 T_a 分别为冠

层温度、没有蒸腾(蒸腾量为零)的冠层温度和气温。蒸腾扩散系数的取值范围为 $h_{at} \leq 1$,该范围把蒸腾速度明确地界定在最低蒸腾速度(0)到最大蒸腾速度(潜在蒸腾速度)之间。当 $T_c = T_p$ 时, h_{at} 取最大值($h_{at} = 1$),对应的植被蒸腾量有最小值(蒸腾量=0),该极限值受土壤和植物水分供给的限制;相反,当 h_{at} 取最小值时,相应的植被蒸腾量有最大值(潜在蒸腾量),该极限值受蒸腾耗能的供给状况(大气条件)的限制。当植被无水分亏缺或不受环境胁迫

时,蒸腾扩散系数有最小值。当植被受到最大水分亏缺或环境胁迫时,蒸腾扩散系数有最大值。

蒸腾扩散系数的主要优点是易于测量并且适用于不同的环境条件。此外, h_{at} 极大程度地考虑了大气-冠层之间温度的关系。1994~1999年进行的5个验证实验的结果表明,实验结果表明 h_{at} 值与感热通量比率(H/H_p)的值近似相等,二者之间回归线的斜率接近为1,截距接近0,回归系数为 $r^2=0.70$ 。蒸腾扩散系数不仅能较好地反映植物根系区的土壤水分状况,也能较好地反应天气状况。在该研究中,露天栽培高粱作物的 h_{at} 变动从-0.5到+0.5,番茄的 h_{at} 变动从-0.4到+0.8,甜瓜的 h_{at} 变动从-4到-1。尽管我们还没对其它的植株种类进行研究,但从理论上分析,此方法也适用于其它植物。在这5个不同生长环境,不同尺度上的实验中,实验1用来计算和验证 h_{at} ,而其它4个则是用可控环境条件下的对比实验来验证 h_{at} 的特性。实验1的面积范围为1 hm²,接近中等尺度,表明其用来遥感测量的可能,虽然该尺度不是很大,但也具有一定代表性,从而可以进行更大尺度上 h_{at} 的推广应用尝试。此外,缺水条件下, h_{at} 主要受根部区域的水分状况影响。所以, h_{at} 可作为作物水分亏缺的指标。当植被受到其它环境胁迫(污染、高温等胁迫因子)时, h_{at} 还可以作为环境评价的指标。

参 考 文 献

- Ben-Asher J, Meek DW, Hutmacher RB, Phene CJ (1989). Computational approach to assess actual transpiration from aerodynamic and canopy resistance. *Agronomy Journal*, 81, 776–782.
- Ben-Asher J, Phene CJ, Kinarti A (1992). Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. *Agriculture Water Manage*, 22, 379–390.
- Carlson RE, Yarger DN, Shaw, RH (1972). Environmental influences on the leaf temperatures of two soybean varieties grown under controlled irrigation. *Agronomy Journal*, 64, 224–229.
- Ehrler WL (1973). Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agronomy Journal*, 65, 404–409.
- Gardner BR, Bald BL, Garrity DP, Watts DG (1981). Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrigation Science*, 2, 213–224.
- Hatfield JL (1983). Evapotranspiration obtained from remote sensing methods. *Advance Irrigation*, 2, 395–416.
- Hatfield JL (1985). Wheat canopy resistance determined by energy balance techniques. *Agronomy Journal*, 77, 279–283.
- Heilman JL, Kanemasu ET, Rosenberg NJ, Bald BL (1976). Thermal scanner measurement of canopy temperatures to estimate evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 5, 137–145.
- Idso SB (1982). Non-water stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Journal of Agriculture Meteorology*, 27, 59–70.
- Idso SB, Reginato RJ, Jackson RD (1977). An equation for potential evaporation from soil, water and crop surfaces adaptable to use by remote sensing. *Geophysics Research Letter*, 4, 187–188.
- Jackson RD, Hatfield JL, Reginato RJ, Idso SB, Pinter PJ Jr. (1983). Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agriculture Water Management*, 7, 351–362.
- Jackson RD, Reginato RJ, Idso SB (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Research*, 13, 651–656.
- Jones HG (1999). Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surface. *Plant, Cell and Environment*, 22, 1043–1055.
- Monteith JL (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society Experimental Biology*, 19, 205–234.
- Monteith JL (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107, 1–27.
- Monteith JL, Szeicz G (1962). Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88, 496–507.
- Monteith JL, Unsworth MH (1990). *Principles of Environmental Physics* 2nd edn. Edward Arnold Press, London, 291.
- Moran MS, Clark TR, Inoue Y, Vidal A (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49, 246–263.
- O'Toole JC, Turner NC, Namuco OP, Dingkuhn M, Gomex KA (1984). Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Science*, 24, 1121–1128.
- Qiu GY (1996). *A New Method to Estimate Evapotranspiration*. PhD dissertation, the United Graduate School of Agriculture Science, Tottori University, Japan.
- Qiu GY, Momii K, Yano T (1996a). Estimation of plant transpiration by imitation leaf temperature. I. Theoretical consideration and field verification. *Transaction of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 64, 401–410.
- Qiu GY, Yano T, Momii, K (1996b). Estimation of plant transpiration by imitation leaf temperature. II. Application of imitation leaf temperature for detection of crop water stress. *Transaction of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 64, 767–773.
- Qiu GY, Yano T, Mommi, K (1998). An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface

- temperature with a dry soil. *Journal of Hydrology*, 210, 93 – 105.
- Qiu GY, Ben-Asher J, Yano T, Mommi, K (1999a). Estimation of soil evaporation using the differential temperature method. *Soil Science Society of American Journal*, 63, 1608 – 1614.
- Qiu GY, Mommi, K, Yano T, Lascano RJ (1999b). Experimental verification of a mechanistic model to partition evapotranspiration into soil water and plant evaporation. *Agriculture for Meteorology*, 93, 79 – 93.
- Qiu GY, Miyamoto K, Sase S, Okushima L (2000). Detection of crop transpiration and water stress by temperature-related approach under field and greenhouse conditions. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 34, 29 – 37.
- Qiu GY, Miyamoto K, Sase S, Gao Y, Shi P, Yano T (2002). Comparison of the three-temperature model and conventional models for estimation transpiration. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 36, 73 – 82.
- Qiu GY, Sase S, Shi P, Ding G (2003). Theoretical analysis and experimental verification of a remotely measurable plant transpiration coefficient. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 37, 141 – 149.
- Qiu GY, Shi P, Wang L (2006). Theoretical analysis of a soil evaporation transfer coefficient. *Remote Sensing of Environment*, 101, 390 – 398.
- Stone LR, Horton ML (1974). Estimating evapotranspiration using canopy temperatures: field evaluation. *Agronomy Journal*, 66, 540 – 545.
- Tanner CB (1963). Plant temperatures. *Agronomy Journal*, 55, 210 – 211.
- Tanner CB, Fuchs M (1968). Evaporation from unsaturated surface: a generalized combination method. *Journal of Geophysics Research*, 73, 1299 – 1304.
- Wang LM (王丽明), Qiu GY (邱国玉), Zhang QT (张清涛), Zhang XY (张喜英), Chen SY (陈素英) (2005). Experimental validation of a new method to evaluate crop water stress index. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 26, 229 – 232. (in Chinese with English abstract)
- Weyers JBD, Lawson T (1997). Heterogeneity in stomatal characteristics. *Advance Botany Research*, 26, 317 – 352.

责任编辑:高 琼 责任编辑:姜联合