

用彭曼—蒙特斯模式估算作物蒸腾量的研究*

康绍忠 熊运章 刘晓明

(水利与建筑工程系)

摘 要 本文论述了彭曼—蒙特斯(Penman-Monteith)模式的推导过程,分析了产生计算误差的四个原因。对模式中参数的取值进行了讨论,分别比较了考虑和不考虑气压订正与空气层结稳定性订正时计算值的差异,结果表明不考虑气压订正时的计算值比实测值偏小10%~20%,而空气层结稳定性订正对计算结果的影响不如气压订正的显著。

关键词 作物蒸腾量,气孔阻力,能量平衡,边界层阻力,估算

中图分类号 S152.7

作物蒸腾是土壤—植物—大气连续体水分运移的一个重要环节,是农田水分消耗的主要途径。作物水分蒸腾过程是作物本身不同的器官和它所在的环境相互作用、反馈影响的结果。作物蒸腾量资料是制定节水型灌溉制度必不可少的科学依据。彭曼通过对植物水分蒸腾生理机制的研究,首次把生理因素引入蒸腾计算模式。蒙特斯在彭曼等人的工作基础上提出了理论基础较强的适用于作物蒸腾量计算的阻力模式,即彭曼—蒙特斯模式^[1,2],为作物蒸腾量的计算开辟了一条新的理论途径。70年代以后,不同形式的气孔仪问世,使气孔阻力的测定得以实现,该模式得到了广泛应用和发展,成为当前国内外作物叶面蒸腾计算的一个通用模式。鉴于这方面的工作在国内还很少开展,为了促进农田水循环与水热平衡研究工作的深入,作者力图对模式及其参数的确定作全面的分析研究,并在西北农业大学水利系灌溉试验站进行实验验证,以便该模式能更好地用于我国农田水分循环和水热平衡研究工作中。

1 模式推导过程的分析及气压订正

彭曼—蒙特斯模式是以能量平衡和水汽扩散理论为基础的。根据能量平衡原理,作物冠层(蒸腾面)的能量平衡方程为:

$$R'_n = LT + A + M + P \quad (1)$$

式中 LT 是叶面蒸腾所消耗的潜热; A 是冠层与空气的显热交换; M 是冠层系统内部耗能; P 是光合作用耗能; R'_n 是冠层叶片所接受的净辐射。它和冠层总净辐射 R_n 的关系是:

$$R'_n = (1 - e^{-k \cdot LAI}) \cdot R_n \quad (2)$$

式中 LAI 是叶面积指数, k 是叶片消光系数, e 是自然对数的底。

根据研究,式(1)中 M 与 P 通常比测量 R_n 的系统误差还小,因而可忽略不计,

文稿收到日期: 1990-02-22。

* 国家自然科学基金资助项目。

于是有

$$(1 - e^{-k \cdot LAI}) \cdot R_n \approx LT + A \quad (1')$$

式中 L 为水的汽化潜热, T 为作物蒸腾量。

作物的蒸腾过程包括了两个阶段: 液态水在气孔腔内汽化, 汽化了的水分子通过叶气孔向叶周围宁静空气层扩散进入大气 (图 1)。因此, 水汽通过气孔进入叶周围宁静空气层的过程所遇到的阻力包括了气孔阻力 r_{st} 和空气边界层阻力 r_{ah} 两部分。根据 Fick 第一扩散定律可写出显热的

$$\text{的表达式: } A = \rho C_p \frac{T_o - T_z}{r_{ah}} \quad (3)$$

式中 ρ 为干空气密度, C_p 为空气定压比热, T_o 为叶温, T_z 为气温, r_{ah} 为热量扩散阻力。同理, 可写出经气孔和叶周围宁静空气层中的水分扩散通量 (蒸腾速率) 的表达式:

$$LT = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{[e_w(T_o) - e_o]}{r_{st}} \quad (4)$$

$$LT = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{(e_o - e_z)}{r_{ah}} \quad (5)$$

式中 $e_w(T_o)$ 为气孔腔内的水汽压, e_o 为叶面水汽压, e_z 为空气实际水汽压, γ 为湿度计常数, 其余符号意义同前。

假定蒸腾是恒定流, 则通过气孔和叶宁静空气层的总阻力由两部分串联而成, 式 (4) 与式 (5) 相加可得:

$$r_{st} + r_{ah} = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{e_w(T_o) - e_z}{LT} \quad (6)$$

由于式 (6) 中气孔腔内的水汽压 $e_w(T_o)$ 不易确定, 为了消除 T_o , 作如下代换:

$$e_w(T_o) = e_w(T_z) + \Delta(T_o - T_z) \quad (7)$$

式中 $e_w(T_z)$ 为空气中温度为 T_z 时的饱和水汽压, Δ 是饱和水汽压 - 温度曲线的斜率。

把 (3) 式和 (6) 式、(7) 式综合代入 (1') 式解得:

$$LT = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} (1 - e^{-k \cdot LAI}) R_n + \frac{\rho C_p}{\gamma} [e_w(T_z) - e_z] / r_{ah}}{\frac{\Delta}{\gamma} + (r_{st} + r_{ah}) / r_{ah}} \quad (8)$$

r_{ah} 和 r_{st} 很少有重大差异^[3], 即 $r_{ah} \approx r_{st}$, 令 $r_{ah} = r_{st} = r_a$, 因此有

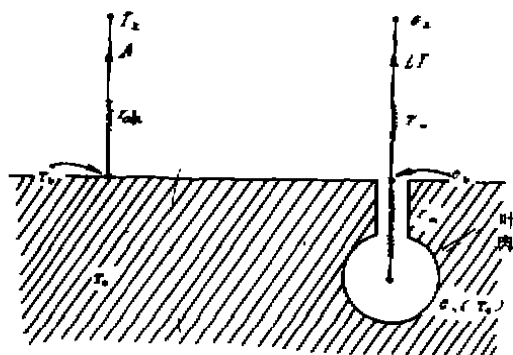


图 1 由叶到大气的阻力分布图

$$LT = \frac{\frac{\Delta}{\gamma}(1 - e^{-k \cdot LAI})R_n + \frac{\rho C_p}{\gamma}[e_w(T_z) - e_z]/r_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + (1 + r_{sh}/r_a)} \quad (9)$$

式(9)就是目前广泛研究的彭曼-蒙特斯模式。从该模式的推导过程分析,用此估算作物蒸腾量会因如下四个方面的近似而产生误差:(1)在冠层能量平衡方程中(式(1'))忽略了冠层内部耗能和光合作用耗能,虽然这两部分在白天与 R_n 相比占很小的比例,但在早晨和傍晚可能与 R_n 同一量级,因此当用该模式确定早晨和傍晚的蒸腾量时会产生一定的误差,式(1')还未考虑热量在冠层上方的平流交换,因此该模式用于计算有“晒衣绳”效应的田间作物蒸腾量亦会产生误差;(2)在模式的推导过程中,用饱和水汽压-温度曲线上 T_o 与 T_z 之间割线的斜率代替了 T_o 处的切线斜率,当 T_o 与 T_z 相差较大时会产生一定的误差;(3)在中性层结条件下 r_{ah} 与 r_{av} 近似相等,但在非中性层结条件下 r_{ah} 与 r_{av} 有一定的差异,由此会带来计算误差;(4)由于认为当地气压与海平面标准大气压近似相等,这在海拔高度大于500m时,会产生一定的差异。

虽然彭曼-蒙特斯模式有以上不足之处,但它的理论基础仍是较严谨的,只要应用时对这些问题加以注意和适当的修正,仍能取得较精确的结果。本文在彭曼-蒙特斯模式的基础上,考虑气压的订正,得到如下模式:

$$T = \frac{1}{L} \cdot \frac{\frac{P_o}{P} \frac{\Delta}{\gamma}(1 - e^{-k \cdot LAI})R_n + \frac{\rho C_p}{\gamma}[e_w(T_z) - e_z]/r_a}{\frac{P_o}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + (1 + r_{sh}/r_a)} \quad (10)$$

式中 P_o 与 P 分别是海平面标准大气压和计算地点的实际气压,其余符号意义同前。

模式中冠层总净辐射 R_n 、空气饱和差 $e_w(T_z) - e_z$ 、气孔阻力 r_{sh} 、叶面积指数 LAI 等均能在田间测定,关键是空气边界层阻力 r_a 的计算和有关参数的确定。

2 空气边界层阻力与有关参数的确定

2.1 空气边界层阻力的计算

关于 r_a 的计算许多学者提出了不同的假设和公式。从理论上说,水汽、热量和动量的源汇并不在同一水平面上,因此 r_a 与动量传输的边界层阻力 r_{am} 并不相同。Monteith指出,在一般情况下,冠层水汽和热量的平均源面总是比动量的低,即水汽传输的下垫面粗糙度 Z_{ov} 总是小于动量传输的下垫面粗糙度 $Z_o^{[3]}$ 。这样水汽由 Z_{ov} 扩散到 Z_o 还受到一个阻力 r_b ,即

$$r_a = r_{am} + r_b \quad (11)$$

但在实际中 r_b 占的比重较小,大多数情况下都认为 $r_a \approx r_{am}$ 。

在不考虑层结订正时,我们建议采用Thom和Oliver(1977)公式^[4]确定空气边界层阻力 r_a ,即

$$r_a = r_{am} = 4.72 \left[\ln \left(\frac{Z-d}{Z_o} \right) \right]^2 / (1 + 0.54 U_z) \quad (12)$$

式中 U_z 是 Z 高度的风速, Z_0 与 d 分别是冠层粗糙度和零平面位移。

对于非中性层结, 应考虑层结稳定性对 r_a 的影响, 考虑层结订正后的空气边界层阻力 r_a 用如下公式估算:

$$r_a = r_{am} = \frac{4.72}{1 + 0.54 U_z} \cdot \left[\ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) - P_1 \right] \cdot \left[\ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) - P_2 \right] \quad (13)$$

式中 P_1 与 P_2 是空气层结稳定性修正因子。

对于中性层结, 即当 $|T_z - T_0| \leq 0.1^\circ\text{C}$ 时, $P_1 = P_2 = 0$ 。对非稳定层结, 即 $T_z - T_0 < -0.1^\circ\text{C}$ 时, P_1 与 P_2 采用下述公式确定:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1-x^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} & a \\ P_2 &= 2 \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) & b \\ \text{其中 } x &= \left(1 - 16 \frac{Z-d}{M_o}\right)^{0.25} & c \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

对稳定层结, 即 $T_z - T_0 > 0.1^\circ\text{C}$ 时, P_1 与 P_2 采用如下方法确定:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_2 = -5(Z - Z_0 - d) / M_o & ((Z-d) / M_o \leq 1.0 \text{ 时}) & a \\ P_1 &= P_2 = -5 \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) & ((Z-d) / M_o > 1.0 \text{ 时}) & b \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中莫宁—奥布赫夫(Monin-Obukhov, 1954)长度因子 M_o 采用下式确定:

$$M_o = \frac{z_* \cdot u_*^2}{g \cdot (T_z - T_0) \cdot \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right)} \cdot \frac{1 - P_2 / \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right)}{\left[1 - P_1 / \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right)\right]^2} \quad (16)$$

式中 g 是重力加速度, 其值取 9.8 m/s^2 。

从以上过程可知: 考虑层结订正的空气边界层阻力 r_a 的计算要比不考虑层结订正时复杂得多, 特别是需要叶温 T_0 来判别层结稳定状况, 即使目前能用红外温度计方便的测出 T_0 , 但花费太昂贵。在考虑层结订正时的 r_a 与 P_1 , P_2 有关, 而 P_1 , P_2 的确定需用试算法求得。

确定 r_a 时的冠层粗糙度 Z_0 采用 Szcicz 公式^[6]计算, 零平面位移 d 采用 Stanhill 公式^[7]计算, 即:

$$\log Z_0 = 0.997 \log H - 0.883 \quad (17)$$

$$\log d = 0.979 \log H - 0.154 \quad (18)$$

式中 H 是冠层作物高度(m)。

2.2 模式中有关参数的确定

为了提高计算精度, 对一些基本参数尽可能地采用比较精确的形式, 空气密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、湿度计常数 $\gamma(\text{hPa/K})$ 和汽化潜热 $L(\text{J/g})$ 与气温 $T_z(^\circ\text{C})$ 有关, 采用如下公

式:

$$\rho = 1.2837 - 0.0039T_z \quad (19)$$

$$\gamma = 0.6455 + 0.00064T_z \quad (20)$$

$$L = 2500.80 - 2.3668T_z \quad (21)$$

饱和水汽压-温度曲线的斜率 Δ 用下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= \frac{25966.89}{(241.9 + T_z)^2} \cdot 10^{\frac{7.36T_z}{241.9 + T_z}} \quad (T_z > 0^\circ\text{C}) \quad a \\ \Delta &= \frac{35485.05}{(265.5 + T_z)^2} \cdot 10^{\frac{9.50T_z}{265.5 + T_z}} \quad (T_z \leq 0^\circ\text{C}) \quad b \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

气压订正项 P_0/P 采用式(23)确定:

$$P_0/P = 10^{\frac{H}{18400(1 + T_z/273)}} \quad (23)$$

式中 H 为海拔高度(m)。

空气定压比热 C_p 取值 $1012\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 消光系数 k 的取值与冠层叶面积状况有关, 变化幅度在 $0.3 \sim 1.5$ 之间, k 值具有日变化, 正午最小, $k = 0.55$ 。由于中午冠层内透光最大, 所以一般可用中午的平均 k 值计算 $R_n^{[8]}$ 。

3 模式的验证与结果分析

3.1 试验研究方法

为了验证上述作物蒸腾量计算模式, 我们于 1989 年 3 月 1 日至 6 月 10 日在西北农业大学水利系灌溉试验站(北纬 $34^\circ 18'$, 东经 $108^\circ 04'$, 海拔 521m)进行了田间小区试验研究。四周较为开阔, 为了避免“晒衣绳”效应, 50m 范围内种有相同作物, 试区土壤质地为中壤, 供试作物为冬小麦。

叶气孔阻力、蒸腾速率、叶湿采用美国 LI-1600 型稳态气孔计测定, 每次在各小区随机抽样 6 个叶片, 正、反两面都测, 测点在叶片的中上部, 冬小麦抽穗前测定第二片叶, 抽穗后测第一片叶, 每周测定一次日变化过程(从早 6:00 至晚 8:00 每小时测一次)。

用阿斯曼通风干湿表在小区冠层上方测定干、湿球温度的日变化, 然后通过《湿度查算表》求出相应的空气饱和差, 用轻便三杯风速仪测定离地面 1m 高处的风速, 这些测定项目与蒸腾速率的测定同步进行。

用 DYM1 型净全辐射仪测定各日的冠层净辐射, 从早 6:00 到晚 8:00 每小时测定一次, 在全生育期每旬测定一次作物的高度, 即在各小区随机抽样测 10 株平均求得小区的平均株高, 并量取单株叶面积, 小区总叶面积等于单株叶面积乘以株数。

3.2 结果分析与讨论

3.2.1 气压订正对计算结果的影响 我们根据晴天和阴天两种天气类型分别用考虑气压订正的(10)式和不考虑气压订正的(9)式估算了叶面蒸腾量的日变化过程, 并与实测结果进行了对比(图 2)。从图 2 可看出, 考虑气压订正项 P_0/P 后的计算结果更接近于实

测值。根据分析计算,西北农业大学水利系灌溉试验站所在地不同温度时的气压订正

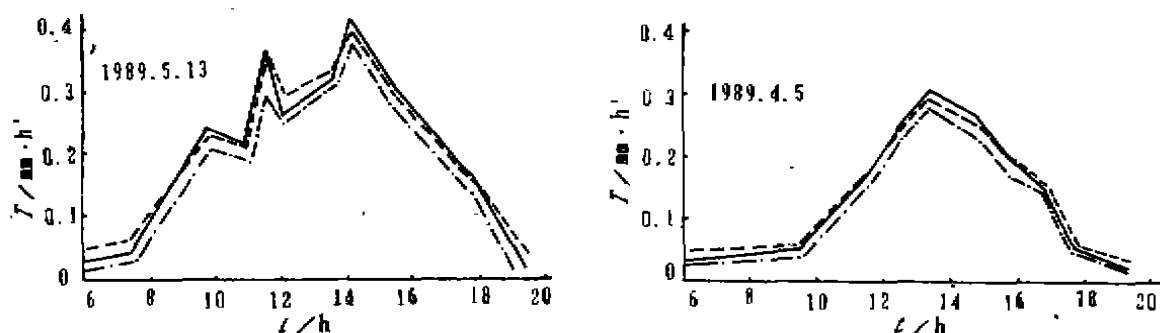


图2 蒸腾量计算值和实测值的比较

——实测;考虑气压订正; - · - · - 不考虑气压订正

项 P_0/P 如表 1 所示。如某日气温为 10°C , $R_n=200\text{w}/\text{m}^2$, $LAI=3.0$, $k=0.55$, $e_w(T_x)=12.27\text{hPa}$, $e_z=8.0\text{hPa}$, 实测 $r_H=200\text{s}/\text{m}$, r_a 计算结果为 $50\text{s}/\text{m}$, $L=2477.13\text{J}/\text{g}$, $\gamma=0.6519\text{hPa}/\text{K}$, $\rho=1.2447\text{kg}/\text{m}^3$, $Cp=1012\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$, 则由不考虑气压订正的(9)式计算得到叶面蒸腾量为 $2.03\text{mm}/\text{d}$, 由考虑气压订正的(10)式计算得到叶面蒸腾量为 $2.40\text{mm}/\text{d}$, 两者相差明显。根据分析, 不考虑气压订正的(9)式

表1 不同气温时的气压订正项

气温 $T_x(^{\circ}\text{C})$	0	5	10	15	20	25	30	35
P_0/P	1.067	1.066	1.065	1.064	1.063	1.062	1.061	1.059

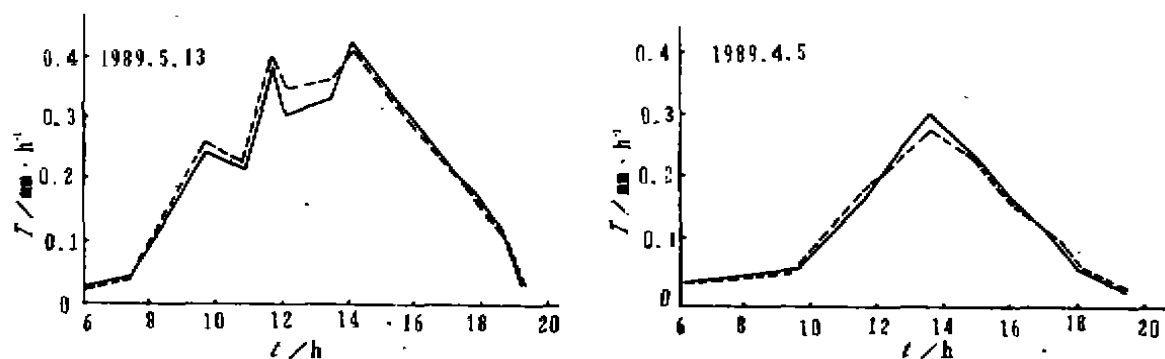


图3 考虑与不考虑空气层结订正的计算结果比较

——考虑空气层结;不考虑空气层结

计算的叶面蒸腾量比实测结果偏小 $10\%\sim 20\%$ 左右。因此, 宜推荐采用考虑气压订正后的(10)式作为叶面蒸腾量计算的基本模式。

3.2.2 空气层结订正对计算结果的影响 由图3可看出, 早、晚考虑和不考虑空气层结的叶面蒸腾量计算结果相差较小, 几乎接近, 中午差异稍大。另外, 晴天两者的差异比阴天的大。这是因为早、晚 $|T_x - T_0|$ 相对较小, 此时的 P_1 , P_2 接近于 0, 相当于中

性层结的情况。在中性层结条件下考虑和不考虑层结因子,其叶面蒸腾量的计算结果是相同的。中午 $|T_a - T_o|$ 相对较大,偏离中性层结较远,因而考虑和不考虑层结订正的 r_a 计算结果有偏差,导致叶面蒸腾的计算结果有差异。阴天两者相差比晴天的小也是同样的道理。总之,空气层结稳定度的考虑与否对计算结果的影响不如气压订正的明显。

3.2.3 其它因素对计算结果的影响 用彭曼-蒙特斯模式估算叶面蒸腾量在早晨 6:00~8:00 之间,中午 12:00~下午 2:00 前后、傍晚 6:00 之后的误差比其余时间的大。早晚计算误差较大是由于能量平衡方程(1)中忽略了 M , P 两项所致。在此时期虽然 M , P 较小,但占 R_n 的比重却比其它时间大得多。中午 12:00 至下午 2:00 的计算误差较大是由于在此时期作物水分亏缺严重, T_o 与 T_z 相差较大所致。因为根据式(7)有

$$\Delta = [e_s(T_o) - e_s(T_z)] / (T_o - T_z) \quad (24)$$

但彭曼-蒙特斯模式最后采用了 T_z 处切线的斜率替代 T_o 和 T_z 之间割线的斜率(图 4), 即

$$\Delta = de_s / dT_z \quad (25)$$

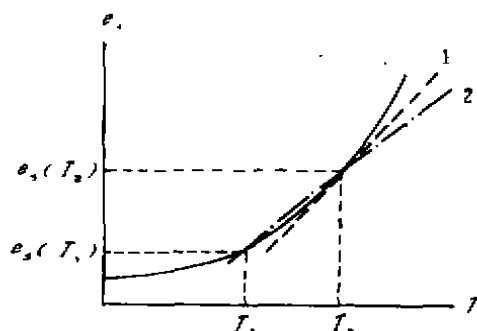


图 4 切线斜率代替割线斜率的近似

$$1. \Delta = de_s / dT_z; 2. \Delta = \frac{e_s(T_o) - e_s(T_z)}{T_o - T_z}$$

从图 4 可知,当 T_o 和 T_z 两者相差较大时,这种近似处理与实际是有较大偏差的,从而也会带来叶面蒸腾量的计算误差。

本文仅探讨了单个叶片的蒸腾量计算问题,对于整个冠层蒸腾量的计算彭曼-蒙特斯模式中的叶气孔阻力 r_{ST} 应改用冠层整体气孔阻力 r_{ST} 。当有热量平流时,还需考虑平流状况的修正。

参 考 文 献

- 1 Monteith J L. Evaporation and environment. In: The State and movement of water in Living organisms. 19th Symposium of the Society for Experimental Biology. New York: Academic Press, 1965. 205~234
- 2 Penman H L. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proc R soc. Ser. A*, 1948, 193: 120~145
- 3 Monteith J L. Vegetation and the atmosphere, Volume 1, Principles. London: Academic press, 1975. 112~140
- 4 Hatfield J L. Evapotranspiration obtained from remote sensing methods. In: Advances in irrigation. vol. 2. New York: Academic press, 1983. 395~416
- 5 Camillo P J. A resistance parameter for bare soil evaporation models. *Soil Science*, 1986, 14(2): 95~105
- 6 Szeicz G. Surface resistance of crop canopies. *Water Resour Res*, 1969, 5: 622~633
- 7 Stanhill G. A simple instrument for field measurement of turbulent diffusion flux. *J Appl Meteorol*, 1969, 8: 509~513
- 8 卢振民, 牛文元, 张翼, 田间作物蒸腾量测算方法研究. *生态学报*, 1988, 8(1): 35~43

A Study of Penman-Monteith Model to Estimate Transpiration from Crops

Kang Shaozhong Xiong Yunzhang Liu Xiaomin

(Department of water Conservancy and Architectural Engineering)

Abstract This paper deals with the deducing process of Penman-Monteith Model and also analyses four factors causing errors in calculations. The values of parameters in the model are discussed, and also, a comparison is made of difference of calculated values with and without taking air pressure calibration into account and air layer stable calibration. The results show that the calculated values without taking air pressure into account are 10% -20% smaller than the actual measured ones, while air layer stable calibration has less significant effect upon the calculated results than those by air pressure calibration.

Key words crop transpiration, stomatal resistance, energy balance,
aerodynamic resistance, estimation