

计算农田蒸散量的冠层温度法研究

蔡焕杰 熊运章 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

目前,测算农田蒸散的方法有许多种,但都难以准确地求出大面积范围内的平均蒸散。红外测温技术为蒸散的估算提供了一种新的方法。本文在对几种冠层温度——蒸散模型评述的基础上,由实测资料用Brown-Rosenberg模型计算了冬小麦郁闭地面后的农田蒸散并与波文比方法计算的蒸散做了比较。结果表明,该模型可以较好地用于计算作物郁闭地面后的农田蒸散。

关键词: 农田蒸散量 冠层温度 蒸散模型

THE STUDY OF USING CANOPY TEMPERATURE TO ESTIMATE EVAPOTRANSPIRATION

Cai Huanjie Xun Yunzhang Shao Mingan

Abstract

Though there are many approaches to measure and estimate evapotranspiration, it is difficult to calculate the average evapotranspiration in large areas. Nowadays, with the development of infrared thermometry, a new approach was presented to estimate evapotranspiration. In the paper, on the basis of reviewing canopy temperature-evapotranspiration models, the Brown-Rosenberg model was used to calculate the evapotranspiration of winter wheat for full canopy cover with the measured data. And the results were compared with those of Bowen-ratio method. The comparison showed that this model might be used to calculate evapotranspiration for full canopy cover.

key words: evapotranspiration canopy temperature evapotranspiration models

引 言

到目前为止,研究和测算不同时间尺度的农田蒸散理论和方法有许多种,但这些方法大多是用点上的资料来测算蒸散。由于点上资料的地区局限性,使得其难以准确地求出大面积范围内的平均蒸散量。此外,这些方法大多是使用气象资料,因此它们不能说明

康绍忠博士审阅全文并提出宝贵意见,贾工作同志帮助进行田间试验,特此致谢!

作物和裸地表面的分布状况,也不能说明某些特殊地块的土壤水分状况^[7]。而农田蒸散研究的真正目的是确定较大面积范围内的平均蒸散量,以为农田水利建设,农田灌溉和地区水情预报服务。现有的研究方法距此还有一段距离。

Tanner (1963)^[14]首先采用红外测温仪测定了植物表面温度并且指出:“从能量平衡原理出发,如果辐射平衡和风的状况不变,植物蒸腾量即潜热交换的减少将导致植物体温度升高。”这就说明植物的蒸腾量和其本身的温度之间存在有一定的关系。随着红外测温技术的不断发展,植物体表面温度的测定也日臻准确。红外测温仪的广泛使用和遥感技术的发展,为利用植物冠层温度等资料估算区域的实际蒸散量,提供了一个新的方法。遥感测量植物的表面温度,可以小到几个平方厘米的手持红外测温仪测定,大至几个平方公里的遥感平台,飞机或卫星测量,用表面温度与气象资料结合可使区域实际蒸散量的估值得到改善。

从70年代起,就有一些学者对用冠层温度估算蒸散进行了研究^[2,3,13]。而在国内这方面的研究则刚刚开始,目前尚不多见^[1]。Monteith等人(1973)在能量平衡原理的基础上导出了在自然状况下估算蒸散量的一个较为全面的方法,其中包含有表面温度,它表明了表面温度在蒸发过程中的作用。Jackson等人^[12](1977)将几个变量组合成一个系数,他们认为该系数具有区域特征,然后用日实际蒸散总量与一日一次的中午冠层温度(T_c)减气温(T_a)的差值($T_c - T_a$)和净辐射 R_n 建立了关系。结果表明这种简单的利用冠层温度估算蒸散的方法可以得到较为满意的结果,其估值精度与能量平衡法相比在10%~15%以内。

上述的研究都表明冠层温度法估算蒸散量可得到较为满意的结果。本文对几种冠层温度——蒸散模型做了综述分析。其目的是在此基础上,选择一种较准确的方法,经过田间试验,研究分析其在我国西北半干旱地区的适用性。

1 冠层温度——蒸散模型分析

冠层温度法估算蒸散的理论是建立在能量平衡原理基础上的。蒸散面的表面能量平衡方程为:

$$R_n = ET + H + G \quad (1)$$

式中 R_n 为净辐射; ET 为潜热通量(蒸散量), H 为显热通量; G 为土壤热通量,其各项单位均为 $W \cdot m^{-2}$ 。

扩散是边界层传递的主要方式,据Fick第一定律,在边界层内,某物质的扩散通量与其浓度梯度成正比。假定在贴近地面处大气中的各种量水平均一,则蒸散面上两个高度间的质量(水汽)和热量扩散的通量方程可写成:

$$ET = \frac{1}{\gamma} \rho C_p K_w (e_1 - e_2) \quad (2)$$

$$H = \rho C_p K_h (t_1 - t_2) \quad (3)$$

式中 ρ 为空气密度(kg/m^3); C_p 为空气的定压比热 $[J/(kg \cdot ^\circ C)]$; t_1 、 t_2 分别为蒸散面上高度 Z_1 和 Z_2 处的温度($^\circ C$); e_1 、 e_2 分别为蒸散面上高度 Z_1 和 Z_2 处的水汽压(KPa); K_w 和 K_h 分别为 Z_1 和 Z_2 间的平均水汽和热量的湍流扩散系数; γ 为干湿球常

数 ($\text{KP}_a/\text{℃}$)。按电学类比方法, 式 (2) 和 (3) 可仿欧姆定律改写成:

$$ET = \frac{1}{\gamma} \rho C_p (e_1 - e_2) / \gamma_{aw} \quad (4)$$

$$H = \rho C_p (t_1 - t_2) / \gamma_{ah} \quad (5)$$

这里 γ_{aw} 和 γ_{ah} 分别表示 Z_1 到 Z_2 高度处的水汽和热量传输的边界层阻力 (s/m)。在实际应用中大多数学者倾向于认为 $\gamma_{aw} = \gamma_{ah} = \gamma_a$ 并用 γ_a 表示, 并称之为空气动力学阻力。若蒸散面充分湿润 (如自由水面), 则由蒸散面到高度 Z 处的扩散通量方程 (4) 和 (5) 可写成:

$$ET = \frac{1}{\gamma} \rho C_p [e_s(t_c) - e_a] / \gamma_a \quad (6)$$

$$H = \rho C_p (t_c - t_a) / \gamma_a \quad (7)$$

式中 t_c 、 t_a 分别为蒸散面和 Z 高度处的空气温度 (℃); $e_s(t_c)$ 、 e_a 分别为蒸散面温度下的饱和水汽压和空气的实际水汽压 (KP_a)。实际上, 作物表面与自由水面不同, 蒸发面上的水汽压并不经常处于饱和状态, 若将 (6) 式用于作物表面时必须将其进行修正, 这个问题可以通过引入一个作物的冠层阻力 γ_c 来解决。因此对作物表面 (6) 式可变成:

$$ET = \frac{1}{\gamma} \rho C_p \cdot [e_s(T_c) - e_a] / (\gamma_a + \gamma_c) \quad (8)$$

该式的物理意义为: 从蒸散面到大气的水汽散失通量等于蒸散面与大气之间的水汽压差与水汽传输路径中断遇到的阻力 (冠层阻力 γ_c 和空气动力学阻力 γ_a 之和) 之比。

由于冠层阻力 γ_c 受到气象、植物特性和土壤水分等条件的影响, 冠层阻力的确定是相当困难和复杂的, 所以 (8) 式在实际应用中很不方便。

Bartholic 等人假定作物的冠层和周围的空气均处于饱和状态, 这时 (8) 式中的冠层阻力 γ_c 可忽略不计, e_a 以气温下的饱和水汽压代替, 则可得到空气动力学阻力 γ_a 的表达式为:

$$\gamma_a = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{e_s(T_c) - e_s(T_a)}{ET} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (7) 中并与式 (1) 结合, 消去空气动力学阻力 γ_a 项, 则可得到:

$$ET = \frac{R_n - G}{1 + \gamma \frac{T_c - T_a}{e_s(T_c) e_s(T)}} \quad (10)$$

该式通常被称之为 Bartholic - Mamken - Wiegand 模型。此模型包含有这样两个假设条件: 1) 作物冠层充分湿润, 其水汽压为冠层温度 T_c 时的饱和水汽压; 2) 接近作物冠层的空气是饱和的, 它的水汽压近似为气温 T_a 时的饱和水汽压。在作物不缺水的条件下, 第一个假定可能是满足的, 但第二个假定在田间条件下似乎不可能得到满足^[8]。因而式 (10) 的计算值为无限湿润面的潜在蒸散。

在 Bartholic 等人的模型中, 由于应用了冠层与空气间的温度差和饱和水汽压差的比值, 模型就对冠层和空气温度相对来说不太敏感, 净辐射是蒸散 ET 的最主要的驱动参数。这种方法不需要作为风速和作物冠层空气动力学性质函数的空气动力学阻力 γ_a , 因此, 该模型的应用很方便^[8]。

Brown和Rosenberg (1973) 将方程 (1) 的右边第二项用 (7) 式代入得到了又一个估算蒸散量的模型为:

$$ET = R_n - G - \rho C_p (T_c - T_a) / \gamma_a \quad (11)$$

空气动力学阻力 γ_a 是不同植物类型的风速剖面的函数, 其准确测定相当困难。目前大多是用估算的方法确定, 一般采用下式:

$$\gamma_a = [1.4(z-d)/z_0]^2 / k^2 u \quad (12)$$

式中 z 为参考高度(m); d 为零平面位移(m); z_0 为表面粗糙高度(m); u 为参考高度上的风速(m/s); k 为卡曼常数(一个无量纲数, 一般取为0.4)。(12)式未考虑稳定性的影响, 也就是说该式是在中性条件($T_c \approx T_a$)时适用的公式。如果在非稳定条件下采用此式, 会使 γ_a 的估值过高。一般情况下, 对田间作物, 在中低大气湿度的条件下, 冠层温度与气温的差值($T_c - T_a$)可能在 -10 至 $+5^\circ\text{C}$ 之间变化, 这主要取决于植物的水分状况^[10]。因此, 在用冠层温度法估算蒸散时, 一般对中性条件不太感兴趣。当采用方程(12)计算空气动力学阻力 γ_a 时, 为使其接近田间实际状况应对其作稳定修正。

Monteith (1973) 建议采用下式即可满足田间条件下一般使用的要求。

$$\gamma_{ac} = \gamma_a \cdot [1 - n(z-d)g(T_c - T_a)/(T_0 U^2)] \quad (13)$$

式中 γ_{ac} 为经过稳定修正后的空气动力学阻力($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); g 为重力加速度($9.8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-2}$); n 为适用于田间的经验常数(可取为5)。 T_0 为由绝对温度表示的冠层温度 T_c 和气温 T_a 的平均值, 通常取为气温值。

在(12)和(13)式中的零平面位移 d 和表面粗糙高度(z_0)可由中性条件下的风速廓线得到, 亦可由经验公式近似求得。一些学者分析了 d 和 z_0 对蒸散计算的影响, 认为用经验公式计算 d 和 z_0 对阻力和蒸散计算结果的影响不大。对一般田间作物, 可由下面较简单的形式估算 d 和 z_0 :

$$\begin{cases} d = 0.63h \\ z_0 = 0.13h \end{cases} \quad (14)$$

式中的 h 为作物高度(m)。

对上述几个冠层温度——蒸散模型已经有过一些评论, 都表明它们在区域蒸散的估算上是有前途的, 但至今还没有对其在大面积上作全面的评价, 以确定其用途和存在问题^[8]。Stone和Horton^[13] (1974) 将Bartholic等的模型和Brown-Rosenberg模型与传统方法——冯·巴维尔(Van Bavel)法、彭曼(Penman)法和波文比(Bowen ratio)法作了比较, 他们认为前两种方法均具有应用前景。据他们分析Bartholic等人的模型估值与其它方法相比约小17%, 而Brown-Rosenberg模型则偏高22%。Gupta^[6]等(1986)用Bartholic模型估算蒸散比波文比法低可达27%, 其误差早晚较大, 中午较小。Hatfield等人^[9]也对上述的二个模型计算值与蒸渗仪(Lysimeter)的实测值进行了比较, 结果表明在其所研究的四个地区, 当作物郁闭地面后用Brown-Rosenberg模型估算的蒸散值与实测值非常一致, 同时还表明用该模型时, 应当对空气动力学阻力 γ_a 进行修正, 而且这种修正不存在地区特性, 所以这个模型可以广泛采用。而Bartholic模型的估值误差则较大。在作物不完全遮盖地面的情况下, 若采用组合表面温度, Brown-

Rosenberg法要比Bartholic模型精确的多。Choudhury等^[5](1986)将Brown-Rosenberg模型的计算值与实测值之间建立了关系,发现二者之间存在有很好的线性相关关系,相关系数达0.96,斜率为0.975,接近于1:1线。在国内张鸿儒等^[1](1987)也对Brown-Rosenberg模型进行了研究,结果表明,在北京地区该模型可以较好地估算冬小麦作物郁闭地面后的农田蒸散。

由上述可以看出:许多学者的研究表明用Brown-Rosenberg模型估算农田蒸散,可以得到较为满意的结果。那么这个模型在我国西北地区的适用性又如何呢?笔者通过田间试验对这个问题进行了研究。

2 试验研究方法

本研究于1990年4~5月在西北农业大学水利系灌溉试验站进行。土壤为中壤土,种植作物为冬小麦(小偃六号),试验期内作物生长状况良好。

用红外测温仪测定每小时的作物冠层温度(T_c)。因为红外测温仪测定作物的冠层温度具有方向性,面向太阳的一边温度较高,背向太阳的一面温度较低。为了消除这一影响,在测量时,在南北两个方向上分别读取4个数据,然后取其平均值作为冠层温度(T_c)值。测量在北京时正点附近进行。

净辐射(R_n)用安装于地面以上1.0m高度处的净辐射表测定,每小时测量一次与冠层温度的测量同步进行。

因无实测的蒸散值,而波文比能量平衡法被认为是测算农田实际蒸散的一种较为可靠的方法^[6]。因此,我们用波文比法计算的蒸散量作为相对标准。为了计算波文比,需要知道作物冠层上方二个高度间的温度和湿度的梯度。为此目的在作物上部0.5m和1.0m高度用阿兹曼通风干湿表分别测量了其温度和湿度。为了减小时间因素对测量结果的影响,采用上下两个高度循环测量的方法。

风速的测定采用三杯风速仪测,其安设高度为地面以上1.5m。作物高度每周用米尺测定一次。

本研究中土壤热通量(G)未进行观测,据Gupta^[6]等人的研究当作物郁闭地面后,土壤的热通量 G 小于净辐射的1%。张鸿儒等^[1]计算了充分灌溉和非充分灌溉地的 G/R_n ,发现绝大多数的每小时 G/R_n 值都小于5%。在本研究中我们取 $G = 0.05R_n$,这个值应当是适当的。

在研究中作为相对标准的波文比方程为:

$$ET_0 = \frac{R_n - G}{1 + \gamma \frac{T_2 - T_1}{e_1 - e_2}} \quad (15)$$

式中 ET_0 为由波文比法计算的蒸散值(以与 ET 区别); T_2 、 T_1 、 e_2 、 e_1 分别为作物冠层上部1.0m和0.5m处的温度和绝对湿度。

3 试验结果与讨论

利用冬小麦的试验资料根据方程(11)和(15)分别计算了冬小麦田的蒸散量。我们

选择了三种天气状况下的计算结果。

4月9日为晴天有时薄云, 5月7日为晴天, 5月14日为阴天。这三天的计算结果见图1。

由图1可以看出, 在各种天气条件下用Brown-Rosenberg模型和波文比模型求出的蒸散量值都吻合的比较好, 其每天的变化趋势二者也是相同的。同时我们由图1看到5月14日全天由Brown-Rosenberg模型计算的蒸散量都比波文比法计算的值大, 而且经过比较发现该值同时也大于净辐射 R_n 值。由(11)式知道当冠层温度 T_c 与空气温度 T_a 差($T_c - T_a$)为负值时, 其计算的蒸散量ET值即大于 $R_n - G$, 而该天全天的($T_c - T_a$)几乎均为负值, 因此从我们的研究表明在阴天的情况下, 式(11)所计算的蒸散值偏大。

经过对计算的蒸散量与净辐射的日变化过程的分析表明, 在中午以后计算的蒸散量值大多高于净辐射 R_n 值, 这是由于中午以后作物的蒸腾强烈, 使得作物的冠层温度低于上方的空气温度, 显然由上向下传递至作物的冠层所致, 这一结果与张鸿儒等人的结果是一致的。

将用Brown-Rosenberg模型的计算值和波文比法的计算值作图, 如图2。从图2看到两者之间存在有相当好的关系, 大部分点在1:1线附近。经过对这两个值的相关分析发现其有如下关系(样本数 n 为48):

$$ET = 31.60 + 0.943ET_0 \quad (16)$$

相关系数为0.974。最大偏差为 $16.9W \cdot m^{-2}$ 。由(16)式可以看出截距为 $31.60W \cdot m^{-2}$ 。这个值对于蒸散的估算来说是完全可

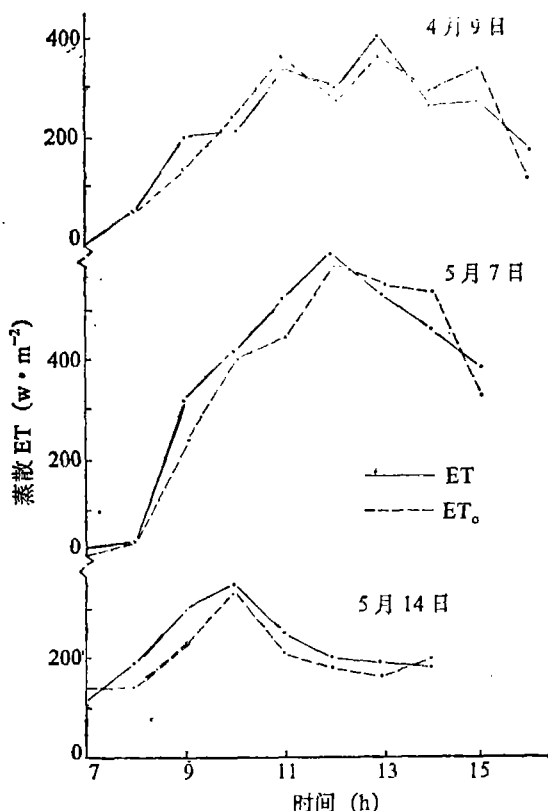


图1 用Brown-Rosenberg模型及用波文比法估算的蒸散的日变化趋势

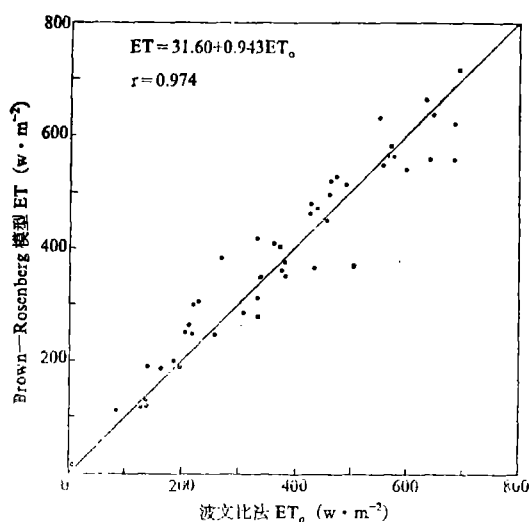


图2 用Brown-Rosenberg模型与用波文比法估算的蒸散之间的关系 ($n = 48$)

以接受的。而且斜率为0.943与1,0亦相差不大。

对用两种计算方法得到的白天全天蒸散值的总量的比较见表1。从表1看到两种方法计算的白天全天的蒸散值非常接近,除了阴天的5月14日两者的相对误差较大(+13.5%)外,其余各天两者的相对误差不超过±10%。

表1 Brown-Rosenberg和波文比模型计算的蒸散值比较表

时 间	Brown-Rosenberg模型值	波文比模型值	$ET - ET_0$	$(ET - ET_0) / ET_0$
	ET (mm/d)	ET_0 (mm/d)		(%)
4月4日	5.89	5.92	-0.03	-0.5
4月9日	4.60	4.37	+0.23	+5.3
5月7日	6.08	5.81	+0.27	+4.6
5月11日	6.65	6.67	-0.02	-0.3
5月14日	3.27	2.88	+0.39	+13.5

经过上述对试验结果的分析可以看出利用Brown-Rosenberg模型可以较为准确地计算在各种天气状况下的农田实际蒸散量值。

Jackson等人(1977)通过将风速的影响变为一个经验系数建立日蒸散量与净辐射 R_n 和冠层与空气温差 $(T_c - T_a)$ 之间的关系。那么对于蒸散量的瞬时值(蒸散强度)净辐射、冠层与气温差和风速的作用又如何呢?

首先将净辐射 R_n 与蒸散 ET 的差同冠层温度与气温的差值和风速之间建立经验关系有:

$$R_n - ET = 66.243 + 42.78 (T_c - T_a) - 23.904V \quad (17)$$

该式的相关系数为0.934,标准差为31.80。若不考虑风的作用, $R_n - ET$ 与 $(T_c - T_a)$ 之间的关系为:

$$R_n - ET = 26.822 + 44.108(T_c - T_a) \quad (18)$$

相关系数0.884,标准差为40.42。更进一步,假设不考虑冠层温度与气温的差值 $(T_c - T_a)$ 对蒸散的影响,仅考虑风速的作用,则可建立下面的关系:

$$R_n - ET = 62.06 - 32.09V \quad (19)$$

相关系数0.40,标准差为79.04。

由式(17) — (19)我们发现,风速对蒸散有影响,但其影响很复杂,其作用比 R_n 和 $(T_c - T_a)$ 要小。在用经验公式估算蒸散 ET 时,若考虑到风的因素,可以提高其精度如(17)式。但是若缺少风速时,用冠层温度法的经验公式,也可得到较为满意的结果,如式(18)。Verma等(1976)认为 ET 对 $(T_c - T_a)$ 敏感而对 r_n 不太敏感,这与我们的试验结果是相同的。

4 结 论

通过用Brown-Rosenberg模型计算冬小麦郁闭地面之后的农田蒸散,并将计算结果与波文比方法估算的蒸散进行比较,从而得出了如下结果:

1. Brown-Rosenberg模型可以较好地估算冬小麦作物郁闭地面后的农田蒸散,在一般情况下,与波文比方法相比其全天的误差不超过±10%。

2. 在阴天时,Brown-Rosenberg模型估算的蒸散值与波文比法相比偏高。

3. 经过对蒸散 E_T 与净辐射 R_n 、冠层与气温的差值 $(T_c - T_a)$ 和风速 V 等因素的相关分析,发现 $T_c - T_a$ 对蒸散的影响比风速 V 的影响要大。

本文主要研究了用Brown-Rosenberg模型对瞬时蒸散的计算。Brunel (1980)和Jackson等(1983)研究了将每天一次的蒸散值转换为白天全天蒸散量值的方法问题。另外,据研究在作物未郁闭地面之前,Brown-Rosenberg模型估算的蒸散值误差较大。对这些问题有待于做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 张鸿儒、卢振民、牛文元. 利用冠层温度—蒸散模型计算农田水分散失; 牛文元、周允华, 张翼等·农田生态系统能量物质交换, 气象出版社, 1987.12. 156~164.
- [2] Brown, K.W., 1974. Calculations of evapotranspiration from crop surface temperature. *Agric. Meteorol.*, 14, 199~209
- [3] Brown, K.W. and Rosenberg, N.J., 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agron. J.*, 65, 341~347.
- [4] Brunel, J. P., 1980. Estimation of sensible heat flux from measurements of surface radiative temperature and air temperature at two meters. Application to determine actual evaporation rate. *Agric. For. Meteorol.*, 46, 179~191.
- [5] Choudhury, B. J., Reginato, R. J. and Idso, S. B., 1986. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. *Agric. For. Meteorol.*, 37, 75~88.
- [6] Gupta, P.L. and Sastry, P. S.N., 1986. Estimating evapotranspiration from midday canopy temperature. *Irrig. Sci.*, 7, 237~243.
- [7] Hatfield, J. L., Perrier, A. and Jackson, R.D., 1983. Estimation of evapotranspiration at one-time-of-day using remotely sensed surface temperatures. *Agric. Water Manage.*, 7, 341~345.
- [8] Hatfield, J. L., 1983. Evapotranspiration obtained from remote sensing methods. in: D. E. Hillel(editor). *Advancas in irrigation*, Vol. 2 Academic Press. New York. pp359~416.
- [9] Hatfield, J. L., Reginato, R. J. and Idso, S. B., 1984. Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops. *Agric. For. Meteorol.*, 32, 41~53.
- [10] Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J. and Pinter, P. J., Jr., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, 17, 1 133~1 138.
- [11] Jackson, R. D., Hatfield, J. L., Reginato, R. J., Idso, S. B. and Pinter, P. J., Jr., 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one-time-of-day measurements. *Agric. Water Manage.*, 7, 351~362.
- [12] Jackson, R. D., Reginato, R. J. and Idso, S. B., 1977. Wheat canopy temperature, A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.*, 13, 651~656.
- [13] Stone, L. R. and Horton, M. L., 1974. Estimating evapotranspiration us-

ing canopy temperatures, Field evaluating. Agron. J., 66, 450~454.

[14] Tanner, C. B., 1963. Plant temperatnres. Agron. J., 55, 210~211.

[15] Verma, S.B., Rosenberg, N.J., Blad, B. L. and Baradas, M. W., 1976. Resistance-energy method for predicting evapotranspiration, Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. Agron. J., 68, 776~782.