

美国农业气象和农田蒸散研究

朱自玺

(河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

提 要

美国的农业气象比较强调基础和应用基础研究,重点为土壤-植物-大气系统中的能量交换、水分交换、物质积累和转化、农业生产模型以及植物与环境相互作用机制等。试验多在大田条件下进行,配有比较完善的数据自动化采集系统。在农田实际蒸散的测定中,中子仪和蒸散仪得到了广泛的应用,并用来检验各种蒸散计算公式。潜在蒸散的计算方法很多,多在 Penman 公式的基础上发展而来,并研制了相应的计算机软件。和其它公式相比, Penman-Monteith 公式比较精确,并得到了广泛的应用。

关键词: 农业气象 实际蒸散 潜在蒸散 作物系数

引 言

美国的气象业务在 20 年代以前属农业部(USDA),服务对象主要是农业。以后,随着航空、航海和交通事业的发展,气象工作转属商业部(USDC),由国家海洋大气局(NOAA)管辖,重点从事天气、气候服务。1973 年绝大部分气候学家下放到各个州,在州里从事对农业有重要影响的气候服务工作。美国没有专门的农业气象研究机构,除内布拉斯加大学和犹他州立大学等极少数大学外,大学里一般也不设农业气象专业。但是美国的农业气象研究仍然非常活跃,它们分散在大学的研究室、州农业试验站、区域农业研究中心和农业研究局(ARS)直属的实验室。绝大部分的农业气象研究是由 USDA-ARS 出钱资助的。ARS 有几个强有力的区域研究中心,协助州农业试验站进行有关项目的研究。

1 美国农业气象研究工作的特点

美国比较强调基础研究和应用基础研究。重点为土壤-植物-大气系统中的能量交换、水分交换、物质积累和转化、农业生产模型以及植物与环境相互作用机制。一般来说,从事农业气象研究的人员具有较好的理论基

础。由于美国的农业气象研究多在农业试验研究单位进行,因此和其它学科如土壤学、农学、生理学、物理学等配合得非常密切。从事农气工作的人员,可能是农学家、土壤学家、气象学家、生理学家,有的甚至是物理学家和数学家。他们不拘一格,不偏执一见,善于提出问题,发现问题,从而更加有利于这一边缘学科的发展。他们比较注重田间试验,试验规模一般比较大,通常为大田尺度,试验小区一般为数英亩(acre),所取样本(如测干物重、叶面积等)也比较大,并有与之配套的测定设备,如大型干燥箱(Drying Oven)和大型叶面积仪(LI-3100 Area Meter)等。田间安装有比较完善的气象测定装置,并与计算机连接,数据的采集和加工多是自动化进行,可以输出每 10 分钟、每小时或每日的测定结果。美国农业部(USDA)拥有庞大而完善的情报系统(CRIS),收藏了农业部正在进行的和最近完成的所有研究项目的情报,以及 50 个州的农业试验站、30 所大学和其它一些研究机构所提供的信息,可以随时检索。近年来,随着水资源的日趋紧张,美国对土壤水分、农田蒸散(Evapotranspiration)和有限灌溉(Limited Irrigation)以及保护水资源的措施的研究日益

重视,研究项目也逐渐增多,农业部在这方面的投入也比较大。提高水资源的利用效率,将是今后一个长期的重要研究课题。

2 农田蒸散研究

农田蒸散的研究不仅是农田水分平衡研究的重要组成部分,而且是制定灌溉计划以及评价气候资源和水分供应状况的前提,在农业生产中的作用日益重要。

2.1 实际蒸散 ET_a (Actual Evapotranspiration)

实际蒸散的测定一般是用仪器进行的,测量的精度随着所用仪器的不同而有差异。目前美国常用的方法有:

(1) 间接法——测定土壤含水量法

这是最简单的方法,我国也普遍采用。一般每隔一定时间测定一次,其测定深度视作物、地下水位的不同而不同。在连续两次测得土壤含水量后,即可算出在此期间的实际蒸散量。美国普遍使用的仪器是中子仪,可以将数据贮存,然后输入到计算机中。为了适应这一需要,美国开发了专用的计算机软件。由于慢中子放射范围较大,中子仪测定的土壤层次比较厚,而且在土壤表层精度较差。美国研制了一种新型的测定土壤湿度的仪器叫 TDR (Time Domain Reflectometry),可以测定每 2cm、5cm 土层的土壤湿度。至今美国仍采用土钻取样测定土壤湿度,但不是用人工取样,而是用机器 (Sampling Machine) 进行。这种方法仍然被认为是比较准确的测定方法,常用来标定中子仪和进行土壤水文特性分析。

(2) 直接法——蒸散仪 (Lysimeter) 法

可分为非称重式和称重式两种。在地下水埋深较浅的地区,可以采用控制地下水位和测定补偿水量的非称重式蒸散仪,通过测量地下供水量和排水量以及灌水量和降雨量作为推算蒸散量的依据。美国佛罗里达大学农业与教育中心安装有 9 台混凝土蒸散仪。我国使用的“测坑”,也属于非称重式蒸散仪,不过要采用人工取土、称重、烘干、计算等步

骤,与间接法无太大差异。非称重式蒸散仪的测量精度为 1—3mm,取得数据的时间间隔为 5—10 天。在 50 年代以前,称重式蒸散仪还比较少,1936 年在美国俄亥俄州 Coshoc-ton 建立的大型称重式蒸散仪,在当时是最先进的一个。以后,各种类型的称重式蒸散仪在世界各地纷纷建立,主要有机械称重式、液压称重式和浮力称重式,其测量精度可达 1/5—1mm。美国内布拉斯加大学 Sandhills 农业实验室有 16 台液压式蒸散仪。我国 50 年代从苏联引进的水力式蒸发器属于浮力称重式蒸散仪。随着电子技术的迅速发展,研制出电子称重式或机械-电子称重式蒸散仪。这种蒸散仪将土壤容器的重量或是直接传到电子荷载传感器上,或是经过一系列杠杆或滑轮缩小后再传到电子传感器上变成电讯号输出。测量精度可达 1/50mm。有的甚至可达 1/100mm。可以每小时,甚至每 30 分钟读取一个数据。美国农业部农业研究局在 Bushland 的试验室共有 4 台电子称重式蒸散仪,每一台安装在 5ha 田块的中央,配有横向移动式喷灌机。蒸散仪的水平面积为 9m²,深度 2.3m,测量精度为 0.05mm。每台蒸散仪上安装有净辐射表和地中热流量板和其他气象仪器。与其配套的气象观测场与 4 台蒸散仪的距离为 170—400m,地面为充分灌溉的浅草覆盖。80 年代又出现了气动轴承天平称重式蒸散仪,其精度可达 10⁻⁶(重量),可每隔 1 分钟或数分钟取得一个数据。不过其量度范围很小(100kg),尚处于研究阶段。

用蒸散仪直接测定农田蒸散比较准确,常被用来检验各种蒸散计算公式,进行适当修正;同时它也是确定作物系数、计算农田水分平衡的重要仪器。现在美国各州都有不同类型的蒸散仪用于农田水分研究。

2.2 潜在蒸散 ET_p (Potential Evapotranspiration)

确定农田蒸散的另一种方法,是根据气象要素计算潜在蒸散,而后进行各种订正,得出实际蒸散。1948 年 Penman 首先提出了计

算水面蒸发的综合方程式^[1]:

$$\lambda E_0 = \frac{\Delta}{\Delta + r}(R_n - G) + \frac{r}{\Delta + r}\lambda E_a \quad (1)$$

式中 E_0 为水面蒸发速率($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); λ 为蒸发潜热($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); r 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); R_n 为净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 当以一日为时段时可不予考虑; E_a 为空气动力学项, 被定义为:

$$E_a = f(u)(e_z^0 - e_z) \quad (2)$$

其中 $f(u)$ 为风函数, u 为风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e_z^0 和 e_z 分别为 z 高度上的饱和水汽压和实际水汽压(kPa)。公式(1)是用来计算水面蒸发的, 但它的基本假定也适用于植被表面, 即植被茂盛, 覆盖均匀, 供水充足。自 Penman 公式发表以来, 许多科学家围绕计算潜在蒸散的公式进行了大量工作, 对其进行修订, 提出了以不同植被为参照面的计算潜在蒸散的公式。正因为这个缘故, “潜在蒸散”一词常常被“参照蒸散(Reference Evapotranspiration)”所代替。美国的灌溉学家分别用充分灌溉的苜蓿地和草地作为参照面计算参照蒸散量, 二者系数不同, 使用时应予以注意。

2.2.1 Kimberly Penman 公式

这是以苜蓿地为参照面计算潜在蒸散的公式。其参照面的标准为: 苜蓿高度不低于 30cm, 生长茂盛, 覆盖均匀, 且土壤水分充足的开阔表面。1970—1987 年, Jensen 和 Wright 在美国爱达荷州的 Kimberly 进行了多年的研究, 提出了以下公式^[2]:

$$\begin{aligned} \lambda E_w &= \frac{\Delta}{\Delta + r}(R_n - G) \\ &+ \frac{r}{\Delta + r}6.43W_f(e_z^0 - e_z) \\ e_z^0 - e_z &= \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} - e^0(T_{\text{dew}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= 0.892 - 0.0781U_d + 0.00219U_dR_s + 0.000402RH_{\max}R_s \\ &+ 0.000196U_d/U_n U_d RH_{\max} + 0.0000198U_d/U_n U_d RH_{\max}R_s \\ &+ 0.00000236U_d^2 RH_{\max}R_s - 0.0000086(U_d/U_n)^2 U_d RH_{\max} \\ &- 0.0000000292U_d/U_n U_d^2 (RH_{\max})^2 R_s - 0.0000161RH_{\max}R_s^2 \end{aligned}$$

$$W_f = a_w + b_w U_2$$

式中, E_w 为充分灌溉的苜蓿地的参照蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); W_f 是风函数, 表示为年历中自然天数(D)的函数, 其约束条件为 $90 < D < 305$, 即适用于 4—10 月。

$$\begin{aligned} a_w &= 0.4 + 1.4 \exp\{-[(D - 173)/58]^2\} \\ b_w &= 0.605 + 0.345 \exp\{-[(D - 243)/80]^2\} \end{aligned}$$

U_2 为 2m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $e^0(T_{\max})$ 、 $e^0(T_{\min})$ 和 $e^0(T_{\text{dew}})$ 分别为最高温度、最低温度和露点温度时的饱和水汽压(kPa)。

Wright 和 Jensen 在 1972 年还建议, 在沿海和气候湿润地区, 风函数用 $W_f = (1 + 0.536U_2)$; 而在干旱和半干旱地区, 风函数用 $W_f = (0.75 + 0.993U_2)$ 。

2.2.2 FAO Penman 公式

Doorenbos 和 Pruitt 以草地为参照面提出的计算潜在蒸散的公式。其参照面是由生长繁茂、高矮均一的 8—15cm 青草完全覆盖, 且土壤供水充足的开阔地面。以草地为参照面的潜在蒸散通常比以苜蓿地为参照面的潜在蒸散要小, 特别在干燥、多风的条件下。FAO Penman 公式的表达形式为^[3]:

$$E_{t0} = C \left[\frac{\Delta}{\Delta + r}(R_n - G) \right.$$

$$\left. + \frac{r}{\Delta + r}2.7W_f(e_z^0 - e_z) \right]$$

$$W_f = (1 + 0.864U_2)$$

$$(e_z^0 - e_z) = e^0(T_{\text{mean}}) - e^0(T_{\text{dew}})$$

$$\text{或}(e_z^0 - e_z) = e^0(T_{\text{mean}})(1 - RH/100)$$

式中, E_{t0} 以草地为参照面的蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为净辐射, 其单位这里为 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; U_2 为 2m 高风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_z^0 和 e_z 分别为 z 高度的饱和水汽压和实际水汽压(kPa); C 为决定于气候条件的调整因子, 1989 年经 Allen 和 Pruitt 修订, 其调整因子为:

其约束条件为:

$$\begin{aligned} 3 &\leq R_n \leq 12 \text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \\ 30 &\leq RH_{\max} \leq 90\% \\ 0 &\leq U_d \leq 9 \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \\ 1 &\leq U_d/U_n \leq 4 \end{aligned}$$

当上述因子超出此范围时,用边界值。式中, RH_{\max} 是一天中的最大相对湿度(%); R_n 为日辐射($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); U_d 是白天(7—19时)平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); U_d/U_n 是白天和夜间风速之比。调整因子 C 的这种表达形式,适合于电子计算机计算参照蒸散。

2.2.3 Priestley-Taylor 公式

1972年 Priestley 和 Taylor 提出了一个简化的、适用于湿润地区的综合公式^[4], 式中将空气动力学项省略,对辐射项加以修订,

$$\lambda E_p = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + r} (R_n - G)$$

式中, E_p 为潜在蒸散($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), α 为修正系数,在湿润条件下,当气温在 15—30°C 之间时, $\alpha = 1.26$ 。

2.2.4 Penman-Monteith 公式

在最初的 Penman 公式中,没有考虑到水汽输送的阻力因子。为了实际应用,他曾提出了风函数的经验公式,并研制了单叶阻力方程。后来, Covey (1959)、Priestley Taylor、Rijtema 和 Monteith (1965, 1981) 把影响显热和水汽输送的空气动力学阻力和对水汽输送有影响的冠层阻力纳入到 Penman 公式中去,而称为 Penman-Monteith 公式,可以描述植被蒸散的一般过程。对于中性稳定的大气,其公式为^[5]:

$$\begin{aligned} \lambda E_c &= \frac{\Delta}{\Delta + r^*} (R_n - G) \\ &+ \frac{r}{\Delta + r^*} K_1 \frac{0.622\lambda\rho}{P} \frac{1}{r_a} (e_0^s - e_z) \\ r_a &= \frac{\ln[(Z_w - d)/Z_{om}] \ln[(Z_p - d)/Z_{ov}]}{(0.41)^2 U_z} \\ r^* &= r(1 + r_c/r_a) \end{aligned}$$

式中, E_c 为潜在蒸散($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); K_1 为量纲系数,使单位保持一致,当风速 U_z 的单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $K_1 = 8.64 \times 10^4$, 当 U_z 的单位用

$\text{km} \cdot \text{d}^{-1}$ 表示时, $K_1 = 10^3$, 保证空气动力学项与 R_n 、 G 有同一量纲($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。 P 为大气压力(kPa); ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); r_a 和 r_c 为空气动力学阻力和冠层阻力($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); Z_w 为风速测定高度(m); Z_p 为干湿表安装高度(m); U_z 为在高度 Z_w 处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); Z_{om} 为动量输送粗糙长度(cm), Z_{ov} 为热量和水汽输送粗糙长度(cm), d 为风速廓线的零平面位移(cm)。Brutsaert (1975) 提出,若以 h_c 来表示植物冠层的平均高度(cm),则 h_c 和 z_{om} 有如下关系^[6]:

$$h_c/Z_{om} = 3e = 8.15$$

$$\text{则 } Z_{om} = h_c/8.15 = 0.123h_c$$

Stricker 和 Brutsaert (1978) 认为,水汽输送粗糙长度要比动量输送粗糙长度小得多,只相当于其十分之一,即

$$Z_{ov} = 0.1Z_{om}$$

Monteith (1981) 认为作物地里风速廓线的零平面位移与植株高度的关系为:

$$d = 2/3h_c$$

Allen (1989) 等人认为作物冠层阻力 r_c 和叶面积系数(LAI)有密切关系,当叶面积大时,则阻力减小。

$$r_c = 100/(0.5LAI)$$

而叶面积的大小与植株高度有关,对高度小于 15cm 的草地来说,

$$LAI = 0.24h_c$$

对于高度大于 30cm 的草地和苜蓿地来说,

$$LAI = 1.5\ln(h_c) - 1.4$$

式中, h_c 以 cm 为单位。

Penman-Monteith 公式可用来计算草地或苜蓿地的参照蒸散,但所用参数不同。另一点值得注意的是,公式中所需要的气象要素应当在同一参照面上取得,不要简单借用气象站观测资料。如果能取得每小时的观测资料,则 E_c 的计算将更加精确。

1987—1988 年美国农业部农业研究局 (USDA-ARS) Bushland 实验室的 T. Howell 和 J. Steiner 对 1948 年 Penman 原式和 Penman-Monteith 公式(3)进行了试验订正。在

两台面积各为 9m^2 的蒸散仪上种植高粱,保持水分供应充足,其上安装有净辐射表和地中热流量板,附近有气象观测场,以取得必要的气象要素资料。利用蒸散仪所测得的蒸散值,代入公式(1),可求得空气动力学项 E_a ,再利用公式(2),可求得风函数 $f(u)$,并建立 $f(u)$ 与 u 之间的关系^[7]:

$$f(u) = 2.63 + 1.38u \quad (4)$$

式中, u 为 2m 高度处风速。这样,即可用公式

$$U_{2s} = U_{zg} \frac{\ln[(Z_e - d_g)/Z_{0mg}]\ln[(Z_g + H_s - d_s)/Z_{0ms}]}{\ln[(Z_e - d_s)/Z_{0ms}]\ln[(Z_g - d_g)/Z_{0mg}]}$$

式中, d 为零平面位移,对草地和高粱地来说,分别用 d_g 和 d_s 来表示。 H 为植被高度,草和高粱的高度分别用 H_g 和 H_s 表示,分别为 0.1m 和 1m 。 Z_{0m} 为动量粗糙长度,草地和高粱地分别为 Z_{0mg} 和 Z_{0ms} 。 U_{2g} 和 U_{2s} 分别为草地和高粱地上方 2m 高处的风速。 Z_e 为风速不受地面性质影响的高度,取 $Z_e = 10\text{m}$ 。

R_c 的计算,他们分别用了 Allen 和 Idso 的两种方法,来计算高粱冠层阻力:

$$r_c = R/LAI \quad (5)$$

其中 R 为一常数,对高粱来说, $R = 325$, $LAI = 3.0$ 。

$$r_c = \{[1 - b(r + \Delta)] / (1 - b\Delta)\} [(a\rho c_p) / (br R_{nf})] \quad (6)$$

其中 a, b 为系数,分别为 $a = 2.5^\circ\text{C}$, $b = 1.96 (\text{C} \cdot \text{kPa}^{-1})$; R_{nf} 为净辐射通量密度,单位为 Wm^{-2} 。

通过试验,在用 Penman-Monteith 公式计算高粱的潜在蒸散时,用公式(5)和(6)计算冠层阻力,则潜在蒸散的计算结果与蒸散仪实测的潜在蒸散值之比分别为 0.99 和 0.96 ,效果很好。如用 Penman 原式和公式(4)来计算潜在蒸散,则其结果与实测值之比为 1.21 。说明 Penman 原式有偏大的正误差。

1973 年美国土木工程师学会出版了由 M. E. Jensen 主编的《耗水量和灌溉需水量》(Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements)一书,汇编了估算耗水量和蒸散量的许多方法,并提供了充分的背

(1)和(4)来计算同样气候类型下高粱地潜在蒸散 E_i 。

用 Penman-Monteith 公式计算高粱地的潜在蒸散时,综合了 Jacobs 和 Boxel(1988)对玉米地试验的结果,对零平面位移、动量粗糙长度、高粱植株上方 2m 高的风速和冠层阻力作如下订正^[7]:

$$d = 0.75H$$

$$Z_{0m} = 0.25(H - d) = 0.065H$$

景材料,以满足从事灌溉和农田水分研究人员的需要。1990 年在此书的基础上,由 M. E. Jensen, R. D. Burma 和 R. G. Allen 编辑出版了《蒸散和灌溉需水量》(Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements)一书,对当前使用的估算蒸散的方法从理论和实践上作了比较详尽的阐述,并给出了必要的参数,是目前世界上比较完整而系统地介绍蒸散的一本书。同年,犹他州立大学的 R. G. Allen 根据该书提供的计算潜在蒸散的主要方法,编制了计算机软件,可同时输出用 8 种方法计算的潜在蒸散值,在美国已得到普遍应用。

3 作物系数

潜在蒸散是相对于一定的参照面而言的,并不能代表实际农田的蒸散。由于农作物类型和土壤水分状况与参照面的情况不同,从而使作物实际蒸散与潜在蒸散有较大差异。通常把某一时段作物实际蒸散(E_{ic})与参照蒸散(E_{ir})之比称为作物系数(K_c),即

$$K_c = E_{ic}/E_{ir}$$

严格来讲, E_{ic} 是就充分灌溉的农田而言的,即 K_c 是在水分供应充足的情况下,作物地里的实际蒸散与潜在蒸散之比。如果考虑到土壤水分不足的限制作用,则 K_c 叫做相对蒸散更为恰当。 E_{ic} 通常用土壤湿度测定资料,根据水分平衡方程计算求得,或者用蒸散仪的实测资料来确定。

作物系数(相对蒸散)受作物类型、生长发育阶段、土壤干湿状况等许多因子的影响。

根据 Wright 在美国爱达荷州 Kimerly 20 多年的研究,在土壤表层变干、土壤蒸发减少到最低限度,而土壤有效含水量又能充分满足作物生长和蒸腾需要的情况下所得出的作物系数称为基本作物系数 K_{cb} 。对大多数作物来说,在播种和苗期基本作物系数较小,为 0.15—0.2;快速生长期迅速增大,为 0.3—0.8;当植被完全覆盖地面后,达最大值,接近于 1.0;成熟期迅速减小,为 0.8—0.15。显然,基本作物系数没有考虑到降水或灌溉的影响,也没有考虑到土壤有效含水量亏缺的影响。在实际生产中,这种理想的情况往往是难以达到的。土壤蒸发常常因降雨和灌溉而骤然增加,或者因土壤过分干燥而减小。因此,实际作物系数与基本作物系数是有差别的,往往需要进行订正^[8]:

$$K_c = K_{cb} \cdot K_a + K_s$$

其中 K_c 为经过订正的作物系数; K_{cb} 为基本作物系数; K_a 为决定于土壤有效含水量的调整因子。当水分不成为限制因子时, $K_a=1$;在土壤干燥的情况下,蒸发减小, $K_a<1$ 。 K_s 是雨后或灌溉后由于土壤表面过湿而使蒸发增加的调整因子。对于湿润的土壤表面, $K_a=1$, $K_s>0$,则 $K_c>K_{cb}$;当土壤表面干燥,但土壤含有较充足的有效水而未限制作物蒸腾时,则 $K_a=1$, $K_s=0$,这时 $K_c=K_{cb}$;当土壤表层干燥且土壤有效水分限制了作物生长和蒸腾时, $K_a<1$, $K_s=0$,则 $K_c<K_{cb}$ 。

Jensen 在爱达荷州对 K_a 进行了试验, K_s 和土壤有效水的关系取决于土壤性质和根系分布。一般来说,它们有如下关系^[9]:

$$K_a = \ln(A_w + 1) / \ln(101)$$

其中 A_w 为土壤温度占田间持水量的百分比,当 $A_w=100$ 时,即达到田间持水量时, $K_a=1$;当 $A_w=0$ 时,则 $K_a=0$;当 $A_w \geq 50$ 时, K_a 对 K_c 影响不大。

Boonyatharokol 和 Walker 在科罗拉多州进行了试验,提出当 $A_w > 50\%$ 时, $K_a=1$;当 $A_w \leq 50\%$ 时, $K_a=A_w/50$ 。

Jensen 在爱达荷州 Kimberly 进行了试

验,提出了 K_s 的近似计算方法:

$$K_s = (K_1 - K_a) e^{-\zeta t}$$

其中 t 为雨后或灌溉后的日数, ζ 为决定于土壤特性和蒸发力的影响因子, K_a 为雨前或灌溉前已达到的作物系数, K_1 为雨后或灌溉后作物系数可以达到的最大值,随土壤和气候类型而不同,一般来说, $K_1=0.8-1.0$ 。该公式仅用于雨后或灌溉后 3 日之内。

Wright 在基本作物系数的基础上,综合考虑了土壤表层干湿状况和灌溉方法,提出了计算作物系数的一般公式如下^[10]:

$$K_c = K_a K_{cb} + (K_1 - K_a K_{cb}) [1 - (t/t_d)^{1/2}] f_w$$

式中 K_c 是修订后的作物系数; t_d 是雨后或灌溉后土壤表面变干所需要的天数; f_w 是灌溉后或雨后土壤表面变湿部分占整个土壤表面的比例,随灌溉方法不同而不同,对于喷灌和降雨, $f_w=1.0$, $f_w=0.5$ 。

从实用角度来说,估算雨后或灌溉后土壤表面蒸发是很不方便的,而且为了计算季节需水量,使用平均作物系数 K_{cm} 更为有利。在一定气候类型条件下,平均作物系数综合考虑了降雨和灌溉的影响,而不再单独考虑调整因子 K_s 的调整作用。平均作物系数 K_{cm} 可以从蒸散仪的测定资料得出。一般来说,在作物快速生长期以前,平均作物系数 K_{cm} 比基本作物系数 K_{cb} 略大,主要受降雨和灌溉的影响;而在生长后期,二者基本相同。根据 Wright(1982)在 Kimberly 的试验资料,平均作物系数 K_{cm} 在播种和苗期约为 0.25—0.3,快速生长期为 0.35—0.9,当植被完全覆盖地面后为 1.0,与 K_{cb} 基本一致,成熟期与 K_{cb} 完全相同,为 0.8—0.15。当土壤有效含水量发生亏缺时,要对平均作物系数 K_{cm} 进行订正,即

$$K_c = K_{cm} \cdot K_a$$

作物系数在估算农田实际蒸散方面是十分有用的,但是需要强调的是,作物系数是在一定气候条件、一定土壤类型下得出的,并受到管理措施的影响。因此,当我们使用这些指

标时,一定要进行订正,使之适合当地的情况,否则,将造成一定的误差。

目前,我国在农田蒸散方面的研究工作,在某些研究单位和学校已进行多年,并取得了一定进展,但发展缓慢,应用也不够广泛。面对水资源日趋紧张的形势,提高水分利用效率将成为越来越迫切的任务,作为一项应用基础研究,农田蒸散将成为一个十分重要的课题,在发展生产和保护环境资源中起着重要的作用。

参考文献

- 1 Penman, H. L. . Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, 1948, A193: 120—146.
- 2 Jensen, M. E. , Wright, J. L. and Pratt, B. j. . Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. Trans. Am. soc. Agric. Engrs. , 1971, 14: 954—959.
- 3 Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. . Guidelines for predicting of crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24, 2nd ed. , FAO, Rome, Italy, 156pp, 1977.
- 4 Priestly, C. H. B. and Taylor, R. J. . On the assessment of

surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Mon. Weath. Rev. , 1972, 100: 81—92.

- 5 Monteith, J. L. . Evaporation and surface tempreture. Quart, J. Roy. Meteorol. Soc. , 1981, 107: 1—27.
- 6 Brutsaert, W. . Comments on surfer roughness paramaters and the height of dense vegetation. J. metoorl. Soc. Japan, 1975, 53: 96—97.
- 7 Steiner, J. L. , Howell, T. A. and Schneider, A. D. Lysimetric evaluation of daily potentail evapotranspiration models for grain sorghum. Agronomy Journal, 1991, 83 (1): 240—247.
- 8 Burman, R. D. , Nixon, P. R. , Wright, J. L. and Pruitt, W. O. . Water requirements. In Jensen, M. E. (ed.) , Design and operation of farm irrigation systems. Amer. Soc. Agric. Engr. , St. Josepl, Mich. 1980.
- 9 Jensen, M. E. , Robb, D. C. N. and Franzoy, C. E. . Scheduling irrigations using climate-crop-soil data. J. Irrig. and Drain. Div. , SACE, 1970, 96: 25—28.
- 10 Wright, J. L. . Crop coefficients for estimates of daily crop evapotranspiration. Irrig. Scheduling for Water and Energy Conserv. in the 80'ss. Am Soc. of Agric. Engrs. , 1981, 12: 18—26.

Research on Agrometeorology and Evapotranspiration of Farmland in the United States of America

Zhu Zixi

(Henan Institute of Meteorology, Zhengzhou 450003)

Abstract

Research on basic theory and its application in Agrometeorology is emphasized in the United States of America, especially laying stress on energy exchange, water exchange, accumulation and change of matter, models in agricultural production, and interaction between plant and environment in the soil-plant-atmosphere system. Reserch is conducted in field condition with advanced data collect system. Neutron probe and lysimeter are widely used in measurement of actual evapotranspiration and used to verify the formulas for calculating evapotranspiration. Many methods calculating potential evapotranspiration are developed from Penman equation and developed computer soft wares to match it. Comparing to other equations, modified Penman-Monteith equation is accurate and used widely.

Key Words: Agrometeorology actual evapotranspiration potential evapotranspiration plant coefficient