

冬小麦农田日蒸散量的计算

李 临 颖

(上海市气象科学研究所)

提 要

本文从小气候观测资料着手,采用彭曼法、能量平衡法、波温比法和空气动力学等方法,对处于抽穗至乳熟期的冬小麦农田日蒸散量做了尝试性计算。着重考虑了彭曼公式的修正,并以水量平衡法为标准,对以上各方法的精度做了评价与误差分析。结果表明,订正后的彭曼公式可较为准确地计算各种能量、水分供应条件下有作物覆盖农田的日蒸散量,其它方法则存在较明显的不确定性误差。

一、引 言

计算蒸散的方法有多种,在实际应用时往往存在如下问题^[1,2]:一是对各种计算方法的结果缺乏一个精良的标准来检验;二是有些计算公式是为估算水面蒸发而设计的,用来计算有作物覆盖和各种能量、水分供应条件下的农田蒸散时需要某些订正;三是计算长时段、大范围的平均蒸散值只能满足气候分析的需要,在分析作物干旱机理、光合生产及制订灌溉策略时往往需要日蒸散量。鉴于以上问题,本文根据农田土壤湿度和作物近地层小气候观测资料,采用彭曼法、能量平衡法、波温比法和空气动力学等方法,对处于抽穗至乳熟期的冬小麦农田日蒸散量做了计算与分析,着重考虑了彭曼公式的修正,并用水量平衡法为标准,对以上各方法的精度做了评价和误差分析。

二、实验及资料来源

实验于1985年4—5月在南京水文所滁州试验基地进行。实验田块为一大型水泥池式蒸渗仪,面积150m²,土深1m,池内壁涂有沥青防渗,池底有一水出口,外接流量计以测渗漏量。项目设置分三部分:一是梯度观测,包括四个高度上(0.5、1.0、1.5、2.0m)的风速和温、湿度;二是辐射观测,包括总辐射、天空辐射、直接辐射、反射辐射和净辐射,观测高度均为1.5m;三是土壤部分观测,包括土壤温度(0.00、0.05、0.10、0.15、0.20m)、土壤湿

度(0.0~0.6、0.3~0.9m 两个层次的平均体积含水量)。各项目的观测时次如下:土壤湿度一日三次(08、14、20 时),其余一日七次(02、06、08、11、14、17、20 时),夜间辐射部分仅观测净辐射。

对应的大气候资料取自附近气象站。

三、农田蒸散量的计算

1. 水量平衡法

用水量平衡法计算蒸散的表达式为:

蒸散 = 降水 + 灌溉 + 土壤含水量初值 - 土壤含水量终值 - 渗漏 - 迳流

水量平衡法具有直观、简便的优点,其精度取决于水量平衡方程中各分量的测量精度,其误差是各分量观测误差的累积值。因为蒸散是几个大量的代数和,所以一般不易得到精确的结果。但在特定条件下,如长期无降水也无灌溉,因而没有迳流和渗漏,此时蒸散量等于土壤含水量的变化,水量平衡方程简化为:

$$E = H_1\Delta\theta_1 + H_2\Delta\theta_2 + \dots = \sum H_i\Delta\theta_i \quad (1)$$

式中, E 为某一时段的蒸散量(mm), H_i 为第 i 土层的厚度(cm), $\Delta\theta_i$ 为该时段内第 i 土层中土壤体积含水量的变化。

我们在实验中用中子法测得了 0.0~0.6m 和 0.3~0.9m 两个土层的平均体积含水率 θ_1 和 θ_2 , 经分析,取 $H_1=H_2=50\text{cm}$, 所以

$$E = (50\Delta\theta_1 + 50\Delta\theta_2) \times 10 = 500(\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2) \quad (2)$$

由于中子测试具有较高的精度,用上式可计算长期无雨条件下农田蒸散量的精确值。我们将以水量平衡法作为标准。检验其它方法的精度。

2. 彭曼法

自彭曼提出计算水面蒸发量的公式之后,许多学者将它推广到农田蒸散的计算上。但彭曼公式简化了能量平衡方程,忽略了水层或土层热通量,对于较短时段,可能产生明显误差。其次,农田中水分供应状况与自由水面差异很大,必须进行土壤含水量的订正。三是农田中蒸发面温度有别于气温。本文将从上述三个方面对彭曼原式进行订正,以计算冬小麦农田日蒸散量。

彭曼公式是:

$$E_0 = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} = \frac{\Delta}{\gamma + \Delta} R_n + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} E_a \quad (3)$$

上式中,等式后第一项为热力项,第二项为动力项, $\frac{\Delta}{\gamma + \Delta}$ 和 $\frac{\gamma}{\gamma + \Delta}$ 分别是这两项的加权因子。式中 E_0 是自由水面蒸发量, $\gamma=0.486$ 为干湿表常数, Δ 是温度为平均气温时饱和水汽压曲线的斜率。 R_n 为净辐射, $E_a=0.26(e_a-e_d)(1+0.5U_2)$ 为大气干燥力, e_a 、 e_d 是气温下的饱和水汽压和实际水汽压, U_2 是 2 米处的风速。

(1) 下垫面条件对彭曼公式的修正

要得到农田实际蒸发量 E , 首先将水面蒸发订正到有植被地面的可能蒸发量。据彭曼等人^[3]的研究, 它可由两种方法得出, 一是乘以系数 f , f 由实验方法确定, 并随季节变化。这种方法仅适于气候分析, 对短时段可能误差较大。二是 R_n 取有植被地面自身的净辐射, (3)式可直接给出有植被地面的可能蒸发量 E_0 。因此, 我们以农田上方 1.5 m 处的实测净辐射代入计算。

有植被地面的可能蒸发量是在水分供应不受限制的条件得出的, 因此必须进行土壤含水量的订正, 订正系数 $k = \begin{cases} \bar{\theta}/\theta_m & \bar{\theta} < \theta_m \\ 1 & \bar{\theta} > \theta_m \end{cases}$, $\bar{\theta}$ 为 0~60cm 实际土壤含水量, θ_m 是土壤张力为零时的 0~60cm 土壤含水量, 试验测定 $\theta_m = 21.5\%$ 。

对于有作物生长的农田来说, 为得出实际蒸散量, 还应乘以作物系数 h , 据陶祖文等人^[4]的结果, 处于抽穗—乳熟期的冬小麦农田 h 可取 1.22。由此得出:

$$E = k \cdot h \cdot E_0 \quad (4)$$

式中, E 为农田实际蒸散; E_0 为可能蒸发量; k , h 分别为土壤含水量和作物的订正系数。

(2) 考虑土壤热通量对彭曼公式的订正

净辐射并非全部用于感热和潜热, 对于较短时段, 热量平衡方程中忽略土壤热通量是不合理的, 可能产生较大误差。因此, 必须对彭曼原式进行土壤热通量 Q_s 的订正, 即:

$$E_0 = \frac{\Delta}{\gamma + \Delta}(H - Q_s) + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta}E_a \quad (5)$$

式中 Q_s 的计算采用台站规范法^[5]:

$$Q_s = \frac{C_m}{t_2 - t_1}(S_1 - \frac{K_s}{10}S_2) \quad (6)$$

$Q_1 = \frac{C_m}{t_2 - t_1}S_1$ 和 $Q_2 = \frac{C_m}{t_2 - t_1}\frac{K_s}{10}S_2$ 分别是 0~20cm 土层的平均热含量变化和平均热通量; K_s 是日平均土壤导热率; C_m 是土壤容积热容量。

① K_s 的计算

$$\left\{ \begin{aligned} K_s &= \frac{M}{N} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} M &= 26.67(0.26\Delta\theta_0 + \Delta\theta_5 + 1.62\Delta\theta_{10} + \Delta\theta_{15} + 0.06\Delta\theta_{20}) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} N &= 6\left(\frac{D_0 + D_{20}}{2} + D_{11} + D_{14} + D_{17}\right) \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中 $\Delta\theta_0, \Delta\theta_5, \dots$ 为各深度 20 时与 08 时地温差, D_0, D_{11}, \dots 为各时次土壤温度分布特征值, 并且有: $D = \frac{\theta_0 + \theta_{20}}{2} - \theta_{10}$, $\theta_0, \theta_{10}, \theta_{20}$ 是各时次 0cm, 10cm, 20cm 的土壤温度。

② C_m 的计算

$$C_m = C_1\rho_1 + C_2\rho_2 = \rho_1(C_1 + C_2\theta) \quad (10)$$

上式中 C_1 和 C_2 分别为土壤和水的比热, ρ_1, ρ_2 分别为单位体积的土重和水重, θ 为土壤含水量。可见, 容积热容量 C_m 随土壤含水量 θ 的增加而线性增加, 计算时取 $C_1 = 1.0 \text{ J/g} \cdot \text{K}$, $\rho_1 = 0.1625 \text{ g/cm}^3$, $C_2 = 4.2 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ 。

K_s 、 C_m 、 Q_s 的计算结果见表 1。可以看出,在春季升温阶段,土壤热通量是向下的。

表 1 K_s 、 C_m 、 Q_s 的计算结果

日期	K_s (cm^2/h)	C_m ($\text{J}/\text{K} \cdot \text{cm}^3$)			Q_s (W/m^2)							
		08h	14h	20h	02 ~06h	06 ~08h	08 ~11h	11 ~14h	14 ~17h	17 ~20h	20 ~02h	平均
29/04	6.31	2.22	2.21	2.17	-33.49	41.87	130.49	96.99	-30.01	-60.71	-69.08	11.17
30/04	5.35	2.20	2.17	2.15	-32.10	32.10	141.65	110.25	-30.70	-69.78	-75.36	11.17
01/05	6.05	2.22	2.17	2.21	-35.59	32.40	104.67	110.25	-32.80	-62.80	-67.69	6.98
02/05	5.08	2.29	2.31	2.13	-42.57	19.54	99.79	44.69	-18.84	-46.35	-55.82	6.98

(3) 蒸发面温度的确定

农田蒸散主要是由土壤蒸发和叶面蒸腾两部分组成,在应用彭曼公式时,用气温代替蒸发面温度不尽合理。对于作物群体蒸发面温度可视为作物活动层温度,可取 50cm 气温代替。因此,蒸发面温度可用土表温度和 50cm 气温的平均值代替。

在以上修正的基础上,给出彭曼法计算结果,见表 2。由于忽略了土壤热通量,使日蒸散计算值偏大。在白天 08h~14h,由于土壤热通量占平均净辐射的 50%左右,忽略土壤热通量将产生更大误差。

表 2 彭曼法蒸散计算过程及结果 (mm/d)

日期	\bar{T}	k	Δ	E_0	H	\bar{Q}_s	E_0	E'_0	E	E'
29/04	21.2	0.933	1.161	6.534	0.315	0.016	7.28	7.01	8.29	7.98
30/04	23.0	0.902	1.276	6.852	0.353	0.016	8.05	7.78	8.86	8.56
01/05	23.8	0.932	1.331	4.498	0.261	0.010	5.81	5.64	6.39	6.21
02/05	23.4	0.978	1.304	3.535	0.134	0.010	3.31	3.14	3.76	3.57

注: E_0 和 E 没经 Q_s 订正; E'_0 和 E' 是经 Q_s 订正后的值。

3. 由水汽传输计算蒸散方法

这种方法包括空气动力学方法、能量平衡法和波温比能量平衡法,三者的基本出发点都是热量平衡方程,都假定:水汽扩散是垂直的一维扩散形式;水汽、显热、潜热的乱流交换系数是相同的。为考虑作物群体对风速廓线的影响,应引入零平面位移 d 。根据 Monteith 的研究^[6], $d=0.63H$, 试验田中小麦平均高度 H 为 80cm, 所以 d 取 50cm。单位高度上湍流交换系数的计算采用布德柯方法^[5]:

$$K(1) = \frac{\kappa^2(U_2 - U_1)}{\ln Z_2 - \ln Z_1} \left[1 + \frac{T_1 - T_2}{(U_2 - U_1)^2} \ln \frac{Z_2}{Z_1} \right] \quad (11)$$

式中卡曼常数 $\kappa=0.41$, U_2 、 U_1 、 T_2 、 T_1 分别为 Z_2 、 Z_1 高度的风速和温度。计算时若 $K(1)$ 出

现负值时则以零计。

(1) 空气动力学方法

概括地说,此法就是根据水汽扩散对动量的比率推算蒸发,要求有不同高度上的温度和水汽压的测定值,计算公式如下:

$$LE = \rho LK(1) \frac{q_1 - q_2}{\ln[(Z_2 - d)/(Z_1 - d)]} \quad (12)$$

式中, LE 是蒸散潜热, $\rho = 0.0013 \text{g/cm}^3$, $L = 2499.6 \text{J/g}$, $Z_1 = 100 \text{cm}$, $Z_2 = 200 \text{cm}$, $d = 50 \text{cm}$, q_1, q_2 为两个高度上的比湿。所以,代入(12)式可得到计算结果。

(2) 能量平衡法与波温比法

这两种方法物理意义都比较明确,计算式分别为:

$$LE = H - P - Q_s \quad (13)$$

$$LE = \frac{H - Q_s}{1 + \beta} \quad (14)$$

式中, P 为感热通量, β 为波温比,且有:

$$P = \rho c_p K \frac{T_1 - T_2}{\ln[(Z_2 - d)/(Z_1 - d)]} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{P}{LE} = 0.650 \Delta T / \Delta e \quad (16)$$

以上三种方法既可计算各日平均蒸散量,又可计算一日中各时次蒸散量。在计算后者时,例如 11 时的蒸散量, Q_s 以 08~11h 和 11~14h 热通量的平均值代入计算的。表 3 是上述方法在典型晴天时的日蒸散量计算结果。

表 3 三种方法计算的日蒸散量(mm/d)

日期	29/4	30/4	01/5	02/5	04/5	08/5	09/5	10/5	11/5
动力学方法	6.12	10.28	4.18	1.60	1.48	3.86	3.88	4.44	2.55
能量平衡法	6.88	8.71	6.80	4.13	4.28	0.23	2.24	0.68	3.71
波温比法	5.81	10.63	7.66	3.30	2.80	1.47	2.57	1.36	4.29

四、结论与分析

以水量平衡法的结果作为标准,其它方法的结果与之比较,得出各方法的计算误差(见表 4)。

可以看出,订正后的彭曼法计算结果较好,相对误差在 10% 以内。动力学方法、能量平衡法和波温比法均不理想。原因是:①要求精度较高的温、湿、风的梯度观测资料,一般的仪器和观测方法难以满足要求。例如在计算波温比时, $\beta = 0.650 \Delta T / \Delta e$, 是两个小量之比, Δe 稍有变化就能引起 β 值的很大变化;②各公式的应用有其附加条件,例如较为稳定层结下, K, P 和 β 均可出现负值,使计算产生不确定性影响;③能量平衡方程中忽略了群体进行光合生产所需的能量,也可能产生误差。

表4 各方法的计算误差

日期	水量平衡法	彭曼法		动力学方法		能量平衡法		波温比	
		计算值	误差	计算值	误差	计算值	误差	计算值	误差
4月29日	8.2	7.98	2.7%	6.12	25.4%	6.88	16.1%	5.81	29.1%
4月30日	9.0	8.56	4.9%	10.28	14.2%	8.71	3.2%	10.63	18.1%
5月01日	6.9	6.21	9.9%	4.18	39.4%	6.80	1.4%	7.66	11.0%
5月02日	3.8	3.57	6.1%	1.60	57.9%	4.13	8.7%	3.30	13.2%

参 考 文 献

- [1] 唐登银等,我国蒸发研究的概况与展望,地理研究,3,84—95,1984。
 [2] 裴步祥,蒸发与蒸散的测定与计算方法的现状及发展,气象科技,2,1985。
 [3] Penman, et al., On Penman's equation for estimating regional evaporation, *Quart. J. R. M. S.*, 103, p. 436, 1977。
 [4] 陶祖文等,农田蒸散和土壤水分变化的计算,气象学报,39,4,1981。
 [5] 翁笃鸣,小气候与农田小气候,41—46,71—75,农业出版社,1979年。
 [6] [英]J. L. 蒙特思等主编,植被与大气原理,卢其尧等译,68—75,农业出版社,1985年。

THE CALCULATION OF DAILY EVAPOTRANSPIRATION IN THE FIELD OF WINTER WHEAT

Li Linying

(Shanghai Meteorological Institute)

Abstract

Based on the microclimatological data, the daily evapotranspiration in the field of winter wheat during the period of heading and milky maturity is preliminarily calculated with the help of the Penman formulas and the other methods, such as energy balance, Bowen ratio and aero-dynamics. The modification of Penman formula is principally considered. The accuracy and error analysis of the formulas and methods above are evaluated by the results of water balance method, which can be regarded as a standard. The conclusions show that after being modified by the crop coefficient, water content and heat exchange in soil as well as the surface temperature of evaporation, Penman formula can be used to calculate accurately the daily evapotranspiration of crop-covered field on the conditions of different energy and water supply.