

大气稳定度对农田蒸散计算准确性的影响

周 英 申双和

(南京气象学院应用气象系, 南京, 210044)

张红卫

(河南新乡气象局, 新乡市, 450000)

摘要 在运用 Penman-Monteith(彭曼-蒙蒂斯)公式计算农田蒸散时,综合考虑了大气稳定度的影响。通过引入适应指数公式,检验稳定度修正前后对农田蒸散计算的精度影响。结果表明,修正后的公式计算精度明显下降,平均绝对误差增大一倍多。由此证明在计算农田蒸散时不考虑大气稳定度的订正是完全可靠的。此结论与文献[2]的研究结果一致。

关键词 大气稳定度,农田蒸散,适应指数

分类号 P4:S161.4

目前国内外计算农田蒸散普遍采用的公式是 Penman-Monteith 公式^[1]。该公式由于全面考虑了空气动力学阻抗和作物冠层阻抗对农田蒸散的综合影响,因而具有较好的适用性。通常在计算空气动力学阻抗时,不考虑大气稳定度的影响,始终把大气层结当作中性处理。国外学者在这方面也作了研究^[2],发现考虑稳定度修正后的蒸散公式并未提高计算精度。为了验证这一结论,我们在陕西省泾阳县进行了农田小气候观测,分析研究得出类似结论。

1 资料来源

文中农田小气候资料为1988年在泾阳县农试站冬小麦田实测得到,气象资料和作物发育期资料取自该站地面观测记录表和农气表。观测时段为5月份,正值冬小麦的抽穗—乳熟期。主要观测项目及使用仪器与方法详见表1。农田蒸散实测值是采用零通量面法得到,土壤水势测定仪器为U型汞柱张力计,土壤水分特征曲线的制作方法为压力膜法,由南京土壤研究所物理组完成。

表1 冬小麦田间观测情况一览表

观测项目	观测部位(m)	每日次数	仪器名称
净辐射	2.0	6~8	辐射平衡表
水汽压	0.8,2.0	6~8	通风阿斯曼
风速	0.8,2.0	6~8	轻便风速仪
气温	0.8,2.0	6~8	通风阿斯曼

2 方法介绍

计算农田蒸散的 Penman-Monteith 公式为

$$ET = 3600 \times \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a}{L[\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)]} \quad (\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$$

为着重探讨大气稳定度对空气动力学阻抗 r_a 的影响,将 r_c 看成常数^[21], $r_c = 33.3 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

$$r_a = \frac{1}{\kappa^2 \cdot u(z)} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 \cdot \Phi_m^2$$

采用 Lumley 等(1964)和 Munn 等(1977)的研究结果^[1]

$$\Phi_m = \begin{cases} (1 - 5Ri)^{1.0} & Ri > 0 \\ (1 - 16Ri)^{0.25} & Ri < 0 \end{cases}; \quad Ri = \frac{g}{T} \cdot \frac{(T_2 - T_1)(z_2 - z_1)}{(u_2 - u_1)^2}$$

以上各式中符号的意义分别为: ET 为农田蒸散 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), ET_0 , ET_1 , ET_2 分别代表实测的和大气稳定度修正前、后的 ET 值; Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率 ($\text{Pa} \cdot \text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数, $\gamma = 0.66 \text{ hPa} \cdot \text{C}^{-1}$; R_n 为净辐射 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), 假设在以天为周期时 $G = 0$; ρ 为空气密度, $\rho = 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_p 为空气比热, $c_p = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$; r_a 为空气动力学阻抗 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); r_c 为作物冠层阻抗 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); $e_s - e$ 为 2m 处饱和水汽压与实际水汽压之差 (Pa); L 为水的汽化潜热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$); z 为离水平地面的高度 (m), $z_1 = 0.8 \text{ m}$, $z_2 = 2.0 \text{ m}$; d 为零平面位移 (m), $d = 0.63H$ ^[21]; z_0 为麦田粗糙度 (m), $z_0 = 0.13H$ ^[21]; H 为作物株高 (m), 分别取 0.9 m (5月1~6日) 和 0.95 m (5月7~31日); κ 为卡曼常数, $\kappa = 0.41$; g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); Ri 为里查逊数; Φ_m 为大气稳定度函数, 中性层结 $\Phi_m = 1$, \bar{T} 为空气平均温度 (K), $\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$; u_1 为 0.8 m 处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); u_2 为 2.0 m 处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); T_1 为 0.8 m 处的气温 (K); T_2 为 2.0 m 处的气温 (K); $u(z)$ 为 z 高度处的风速。

3 结果分析

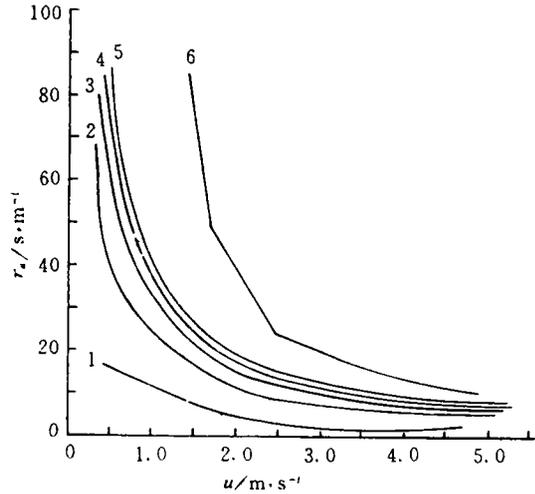
表2 Φ_m 出现频率及 ET 误差分析

Ri	Φ_m	发生频数	频率百分比	绝对误差	相对误差
>0.1	>2.0	10	8	0.153	79%
0.075~0.1	1.6~2.0	5	4	0.105	38%
0.057~0.075	1.4~1.6	3	2	0.080	22%
0.033~0.057	1.2~1.4	7	6	0.047	15%
0.018~0.033	1.1~1.2	7	6	0.030	9%
0.000~0.018	1.0~1.1	30	25	0.011	3%
-0.007~0.000	0.9~1.0	27	22	0.011	4%
-0.015~-0.007	0.8~0.9	8	7	0.019	22%
-0.042~-0.015	0.6~0.8	11	9	0.042	53%
<-0.042	<0.6	13	11	0.047	73%

利用每小时观测的温度和风速资料计算里查逊数和相应的大气稳定度函数。将121个样本按照其值大小划分为10个区段,统计 Φ_m 修正前、后的蒸散值之差(简称绝对误差)和相对误差(以稳定度修正前的 ET_1 为真值求算,列表2)。由表2可见,在中性层结附近, $\Phi_m = 1.0 \pm 0.1$ 的范围内出现频率最高,共占47%, ET_1 与 ET_2 之间的绝对误差为 $0.011 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 相对误差为

4%,均为最小。说明在50%的情况下不考虑大气稳定度订正不会影响农田蒸散的计算精度。大气层结距中性愈远,| Φ_m |愈大,相应的绝对误差和相对误差愈大。在 $\Phi_m > 2.0$ 和 $\Phi_m < 0.6$ 时,其相对误差均超过70%,但其绝对误差仅在 $\Phi_m > 1.6$ 时才会超过 $0.10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,而出现这种情况的频率仅为12%,故对日农田蒸散值影响较小。至于不稳定层结,它所引起的最大绝对误差不到 $0.05\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,对日农田蒸散的影响就更小。因此可以得出结论:不考虑大气稳定度修正不会引起每日农田蒸散计算的显著误差。

由 Penman-Monteith 公式可以清楚地发现,大气稳定度 Φ_m 是通过改变空气动力学阻抗 r_a 而间接影响农田蒸散的效果,在 r_a 为常数的情况下,它的作用尤为重要,由 r_a 的计算式可以看出,影响 r_a 大小的主要因子除 Φ_m 外还有风速。分析不同层结条件下空气动力学阻抗与风速之间的关系(附图),可以看出: $Ri = -0.1 \sim 0.01$ 范围内, r_a 的大小主要取决于 u 值, r_a 与 u 之间为双曲线关系。层结偏离中性愈远,层结稳定度的作用愈大,尤其以稳定层结为最显著。而各种层结在 $u \leq 2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风速增大, r_a 迅速下降;超过此界, r_a 则与 u 几乎无关,且层结之间引起的 r_a 差异大大减小。故风速大于 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时



附图 不同风速和不同空气层结下边界层阻力的差异
 1: $Ri = -1.0$; 2: $Ri = -0.1$; 3: $Ri = -0.01$
 4: $Ri = 0$; 5: $Ri = 0.01$; 6: $Ri = 0.1$

即可不考虑层结稳定度订正,风速小于 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 也只需考虑 $Ri > 0.1$ (即 $\Phi_m > 2.0$) 时的稳定度订正。此结论与 Thom 和 Oliver (1977) ³¹ 的结论一致。此外, Bailey 和 Davies (1981) ³¹ 也指出:当观测高度贴近冠层(大约1m以内),空气层结的稳定度可以不考虑,因为愈靠近地面,层结愈接近中性。虽然在大多数情况下不进行层结稳定度订正对农田蒸散计算结果不会有多大影响,但为客观定量地评价稳定度修正前后 ET 计算式的适用性和可靠性,我们引进适应指数 (IA) 这一指标,以检验两种公式的计算准确度。

$$IA = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i'| + |O_i'|)} \right\}, 0 \leq IA \leq 1$$

式中, IA 为介于零与1之间的数, IA 愈接近1,说明该公式愈适用; P_i, O_i 分别为 ET 的计算值和实测值; P_i', O_i' 分别为计算值和实测值与 ET 平均值之差; $P_i' = P_i - \bar{O}, O_i' = O_i - \bar{O}$ 。同时分别对两种方法所得到的蒸散值与实测 ET 值进行相关分析(结果见表3)。由表可见,未进行

表3 两种方法统计分析结果比较

项 目	ET_1 与 ET_0 比较	ET_2 与 ET_0 比较
适应指数	0.69	0.51
相关系数	0.88	0.82
截 距	1.24	1.30
斜 率	0.66	0.68
标准差	0.75	0.82
绝对误差	0.16	0.36

稳定度函数修正的 Penman-Monteith 公式的计算精度高于修正后的精度,其适应指数和与真值的相关系数均较高,标准差和绝对误差均较低。根据其相关散点分布图也可得出相同的结论(图略)。

因此利用实测资料依据 Lumley 和 Munn 提出的大气稳定度函数公式求算空气动力学阻抗 r_a ,再代入 Penman-Monteith 公式估算农田蒸散,其计算精度并未因考虑了稳定度订正而提高。造成这种结果的原因很多,仪器的测定时间、高度、精度和测定方法均与之密切相关,空气动力学阻抗 r_a 对大气稳定度 Φ_m 不敏感,很大可能是因为稳定度修正效果被气象要素值的测定误差所掩盖。要准确解释这一现象,还有待于测量仪器和测定方法的进一步改进和完善,以及更深入地观测、分析和研究。

参 考 文 献

- 1 Monteith J L 著. 植被与大气. 卢其尧等译. 北京: 农业出版社, 1985. 117~127
- 2 Van Zyi W H, Dejager J M. Accuracy of the Penman-Monteith equation adjusted for atmospheric stability. *Agri and Fore Met.* 1987, 41: 57~75
- 3 Thom A S, Oliver H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Q J R Met Soc.* 1977, 103: 345~357
- 4 Bailey W G, Davies J A. The effect of uncertainty in aerodynamic resistance on evaporation estimates from the combination model. *Boundary Layer Met.* 1981, 20: 187~199

A STUDY OF THE EFFECT OF ATMOSPHERIC STABILITY ON ACCURACY OF FIELD EVAPOTRANSPIRATION (ET)

Zhou Ying Shen Shuanghe

(Department of Applied Meteorology, Nanjing Institute of Meteorology, 210044, Nanjing, PRC)

Zhang Hongwei

(Xinxiang Meteorological Bureau, Henan Province, 450000, Xinxiang, PRC)

Abstract The effect of atmospheric stability has been considered in calculating ET from fields by Penman-Monteith method. By introducing the equation of the Index of Agreement, the effect on accuracies of ET calculations with and without adjustment of the stability have been examined. Results show that the accuracy of the calculation by the revised equation is sharply reduced with the mean absolute error increased by as $>100\%$. Therefore, it is feasible to neglect the correction of atmospheric stability in calculating ET. The result is in agreement with the reference [2] conclusion.

Keywords atmospheric stability, evapotranspiration, index of agreement