第23卷 第1期 南京气象学院学报 Vol. 23 No. 1
2000年3月 Journal of Nanjing Institute of Meteorology Mar. 2000

文章编号: 1000-2022(2000)-01-0101-05

农田蒸散量计算方法的比较研究*

孙卫国, 申双和
(南京气象学院环境科学系, 南京 210044)

摘要: 根据观测资料, 采用波文比法、廓线梯度法和综合阻抗法等分别计算了农田植被层上的蒸散量, 并对比分析了不同方法之间的相对误差和相关程度。结果表明, 用波文比法计算的潜热通量存在系统性偏小的现象, 而梯度法和综合阻抗法的计算结果比较一致。文中还讨论了不同方法的优缺点和产生误差的可能原因。

关 键 词: 农田蒸散; 波文比; 廓线梯度; 综合阻抗
中图分类号: P463.2 文献标识码: A

农田蒸散是发生在土壤—植被—大气系统这一相当复杂的体系内的连续过程, 它不仅需要对农作物生长发育至关重要的水分供应和能量来源, 而且决定着农田边界层的状况。因此, 农田蒸散的研究对于进一步了解土壤水分运动、植物水分传递、植物与大气之间的水汽交换以及农田植被层上的热量平衡状况, 认识大气边界层内不同下垫面上的湍流输送规律等都有重要的意义。

确定农田蒸散量有水文学、气象学和气候学等计算方法。而近代微气象学的发展, 又从不同角度推动了农田蒸散的研究, 提出了诸如波文比—能量平衡法、廓线梯度法、能量平衡—空气动力学阻抗综合法等计算方法。这些方法都具有一定的物理基础, 但几乎又都带有某些局限性。因此, 本文试图利用实际观测资料, 对上述计算农田蒸散量的微气象学方法作一比较, 并分析其产生误差的可能原因。

1 资料来源

本文所用资料为1988年在陕西省泾阳县农业试验站的冬小麦田内实测的农田小气候资料, 气象资料和作物发育资料取自该站地面气象观测记录表和农业气象观测记录表。观测时间为1988年4月26日至6月2日, 正值冬小麦的抽穗—乳熟期。主要观测项目包括地表太阳净辐射量的观测, 植被层上方不同高度处的风速、气温和水汽压的梯度观测, 土壤温度、湿度和土壤水势的观测等; 所使用的观测仪器有辐射平衡表、风向风速仪、通风阿斯曼、U 型汞柱张力计等; 梯度观测高度离地面0.8 m 和2.0 m; 观测时次为白天每2 h 观测一次, 其中5月11日

* 收稿日期: 1999-04-30; 改回日期: 1999-11-03
基金项目: 南京气象学院科研基金资助项目(9801)
作者简介: 孙卫国, 男, 江苏涟水人, 1954年12月生, 学士, 副教授。主要研究方向: 小气候, 气候变化

至 5 月 15 日为每 1 h 一次的加密观测。观测场地周围空旷开阔, 植被均匀平坦。

2 计算方法

2.1 波文比-能量平衡法(即 BREB 法, 简称波文比法)

用该方法确定农田植被层上潜热和显热输送通量的计算公式为[1]

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \frac{c_p p}{\epsilon\lambda}\frac{\Delta T}{\Delta e}} = \frac{R_n - G}{1 + \beta}, \tag{1}$$

$$H = \frac{R_n - G}{1 + \frac{\epsilon\lambda}{c_p p}\frac{\Delta e}{\Delta T}} = \frac{R_n - G}{1 + \frac{1}{\beta}}, \tag{2}$$

$$\beta = \frac{c_p p}{\epsilon\lambda}\frac{\Delta T}{\Delta e}。 \tag{3}$$

式中, R_n 为到达地表面的净辐射通量; G 为土壤热通量; λE 为潜热(蒸发耗热)通量; λ 为水的汽化潜热系数; H 为显热输送通量; $\epsilon = 0.622$ 为水汽分子与干空气分子的重量比; ρ、p、c_p 为空气密度、气压和定压比热。

2.2 廓线梯度法

根据莫宁-奥布霍夫相似理论, 近地面风速、温度和湿度廓线梯度可表示为[2]

$$\frac{\kappa z}{u_*}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \Phi_m(\xi), \quad \frac{\kappa z}{T_*}\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \Phi_h(\xi), \quad \frac{\kappa z}{q_*}\frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = \Phi_q(\xi)。 \tag{4}$$

其中 κ 为卡门常数; $\xi = \frac{z-d}{L}$ 为无因次高度, L 为莫宁-奥布霍夫长度, d 为零平面位移高度; T_*、q_* 为特征温度和特征比湿; Φ_m、Φ_h、Φ_q 为普适函数, 分别表示无因次风速切变、无因次温度梯度和无因次比湿梯度。本文采用 Dyer 等的普适函数表达式[3]。

积分(4)式, 可得近地面层风速、温度和湿度平均廓线的表达式, 即

$$\bar{u}_2 - \bar{u}_1 = \frac{u_*}{\kappa}\Psi_m, \quad \bar{T}_2 - \bar{T}_1 = \frac{T_*}{\kappa}\Psi_h, \quad \bar{q}_2 - \bar{q}_1 = \frac{q_*}{\kappa}\Psi_q。 \tag{5}$$

式中 Ψ_m、Ψ_h、Ψ_q 为积分相似函数, 可采用 Benoit 表达式[4]。由此, 可确定湍流特征参量; 具体计算时以采用迭代法求解效果较好[5]。

2.3 能量平衡-空气动力学阻抗综合法(即 EBAR 法, 简称综合阻抗法)

由于 Penman-Monteith 公式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, 有较好的适用性, 因此计算农田蒸散时得到国内外学者的广泛采用。该公式[6]为

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p(e_s - e)/\gamma_a}{\Delta + \gamma(1 + \gamma_c/\gamma_a)}。 \tag{6}$$

式中, Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率; γ 为干湿表常数; e_s 为饱和水汽压; γ_c 为作物冠层阻抗, 本文取常数($33.3\ \mathrm{s \cdot m^{-1}}$); γ_a 为空气动力学阻抗, 采用谢贤群的修正公式[7]

$$\gamma_a = \gamma_0 + \frac{\Phi_h}{\kappa u_*} = \gamma_0\left(1 + \Phi_h/\ln\frac{z-d}{z_0}\right)。 \tag{7}$$

式中 z_0 为粗糙高度; Φ_h 为热量输送普适函数; γ_0 为中性层结时的空气动力学阻抗, 表达为

$$\gamma_0 = \left(\ln\frac{z-d}{z_0}\right)^2/(\kappa^2 u)。 \tag{8}$$

3　结果分析

根据上述方法, 利用实际观测资料, 计算了均匀下垫面(冬小麦田)、不同稳定度条件下农田植被层上方的水汽输送通量。下面就不同方法的计算结果进行简单的讨论。

潜热(水汽) 通量的大小主要取决于太阳净辐射、湍流交换条件和湿度铅直梯度, 其日变化规律与太阳净辐射的日变化规律相一致, 因为蒸发的主要能量来源是太阳净辐射。图 1 给出了 3 种方法计算的小麦田上方的潜热通量和太阳净辐射的日变化曲线。由图可见, 上午, 随着太阳辐射的不断增强, 下垫面受热使得近地面层出现不稳定层结, 湍流交换不断增强, 湿度梯度增大, 从而导致潜热通量随时间不断增加, 并在中午前后达到一天的最大值; 下午, 随太阳辐射和湍流交换的不断减弱, 大气层结趋于稳定, 潜热通量又逐渐减小, 夜间甚至出现负值(即出现凝结而释放热量) 。由图 1 还可以看出, 采用廓线梯度法计算的潜热通量 λE_g 和采用综合阻抗法计算的潜热通量 λE_r 比较接近, 两者相差不大, 后者略小于前者; 而采用波文比法计算的潜热通量 λE_b 则明显小于前两种方法的计算结果。

图 2 给出了廓线梯度法和综合阻抗法计算的潜热通量。由图可见, 这两种方法的计算结果比较一致, 数据点集中分布在 1: 1 线附近, 而且离散程度较小; 据统计, 两者相关系数为0. 97, 平均相对误差为 12. 4 %; 虽然这两种方法的最大相对误差达 24. 1 %(5 月 12 日 09 时) , 但该时次潜热通量的绝对误差仅为 20. 4 W/ m^2。

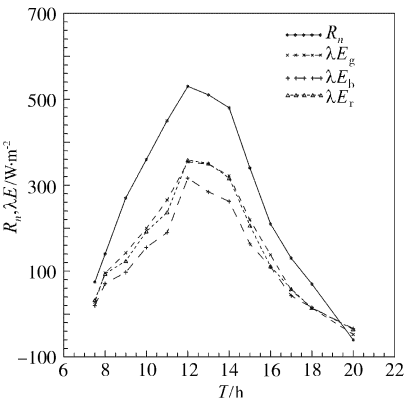

图 1　太阳净辐射和潜热通量的日变化曲线(5 月 14 日)

Fig. 1　Daily changes of net radiation and latent heat flux (May 14)

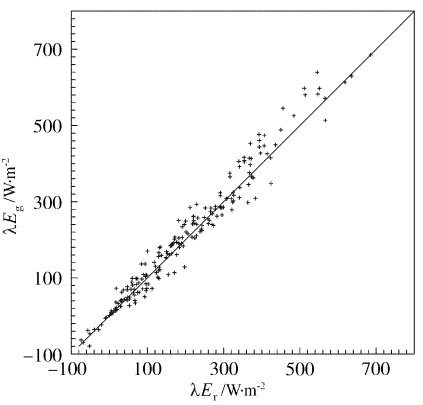

图 2　廓线梯度法和综合阻抗法计算结果的比较

Fig. 2　Comparison of latent heat flux between PG and EBAR methods

确定湍流通量的梯度方法, 基于近地面层相似理论, 以普适函数描述湍流输送和平均廓线, 既考虑了大气层结稳定度对通量输送的影响, 又考虑了风速、温度和湿度铅直梯度的大小; 计算过程中, 采用迭代方法确定湍流特征参量, 更提高了计算结果的精确度。综合阻抗法基于下垫面能量平衡方程和空气动力学理论, 同时考虑了空气动力学阻抗和作物冠层阻抗; 计算过程中, 还对空气动力学阻抗进行了大气层结稳定度的订正, 从而保证了农田蒸散量计算结果的合理性和准确性。由于这两种方法理论基础可靠, 较全面地考虑了农田蒸散的影响因素, 而且某些参量的计算方法又经过不同学者在科研实践中的合理改进和修正, 使得其计算结果比较符合实际。

廓线梯度法和综合阻抗法也有其不足之处。例如, 梯度法需要不同高度上的廓线梯度观测资料, 使其适用范围受到限制; 选取的普适函数的适用性也会影响计算结果的精确度; 采用积分形式和迭代方法使其计算过程不够简便等等。而综合阻抗法中取作物冠层阻抗为常数以及空气动力学阻抗的计算误差, 太阳净辐射量、土壤热通量、水汽压的观测误差等都可能直接影响计算结果的准确性。廓线梯度法和综合阻抗法的这些缺点, 使得两种方法计算的潜热通量值存在误差, 致使图 2 中的数据点出现一定程度的离散。

采用波文比法计算的潜热通量 λE_b 与廓线梯度法计算结果 λE_g 的比较如图 3 所示。由图可见, λE_b 较 λE_g 有明显的系统性偏小的趋势; 图中绝大部分数据点分布在 1:1 线的下方但其离散程度并不大, 这表明采用波文比法计算的潜热通量值虽然偏低, 但它与廓线梯度法的计算结果仍具有较好的相关关系。经统计, 两者的平均相对误差为 21.8 %, 最大相对误差为 43.2 %, 相关系数达 0.96。

图 4 为波文比法和综合阻抗法计算的潜热通量的比较。总体上与图 3 类似, 波文比法计算的潜热通量 λE_b 小于综合阻抗法的计算结果 λE_r, 但两者相关程度较好; 平均相对误差为 17.6 %, 最大相对误差为 34.0 %, 相关系数达 0.94。

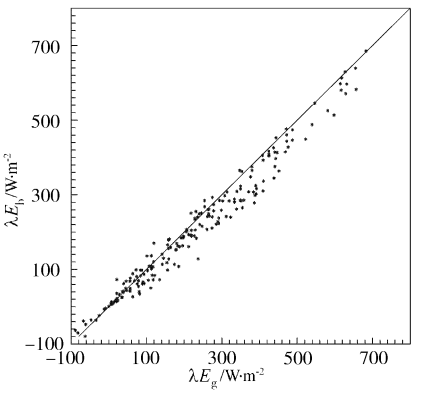

图 3 波文比法和廓线梯度法计算结果的比较

Fig. 3 Comparison of latent heat flux between BREB and PG methods

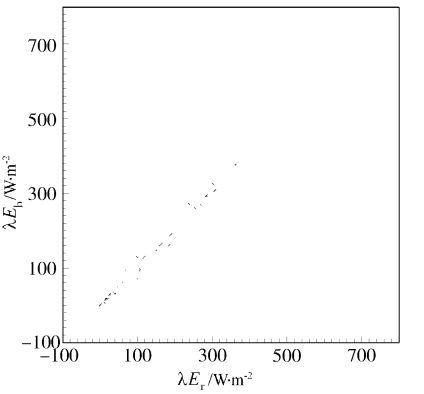

图 4 波文比法和综合阻抗法计算结果的比较

Fig. 4 Comparison of latent heat flux between BREB and EBAR methods

根据(4)式分析, 采用波文比法确定农田蒸散量的计算误差可能来自以下几个方面: 一是太阳净辐射量和土壤热通量的观测误差, 波文比法计算的潜热通量与差值 $R_n - G$ 成正比, 因此太阳净辐射量和土壤热通量观测值的偏大或偏小都将造成计算结果 λE_b 的系统性偏差。二是假设条件产生的误差, 波文比法假设近地面层热量和水汽的湍流交换系数相等, 即 $K_H = K_W$, 这一假设仅在中性层结时才近似成立, 而在非中性层结时并不成立; 尤其是在稳定层结情况下, $K_H/K_W > 1$, 随着层结稳定度的增大, $K_H \gg K_W$, 此时若仍使用该假设条件, 势必造成波文比法计算的潜热通量值明显偏低。三是由有限差分形式取代偏微分形式引起的误差, 波文比法采用有限差分形式计算不同高度上的温湿度差值显然不如梯度法中采用积分形式的计算结果来得精确; 此外, ΔT 和 Δe 还受仪器精度的限制和观测员水平的影响。以上几个因素的累积误差必然导致波文比法计算的潜热通量值产生较大的计算误差, 从而影响到其计算结果的准确性和可靠性。

4 小　结

本文根据实际观测资料, 采用波文比法、廓线梯度法和综合阻抗法分别计算了农田蒸散量, 并对这些方法的优缺点和产生误差的可能原因进行了讨论和分析。结果表明, 用波文比法计算的农田蒸散量存在系统性偏小的现象, 计算误差较大; 而采用梯度法和综合阻抗法计算的农田蒸散量比较一致, 计算误差较小, 计算结果比较符合实际, 具有一定的准确性和可靠性。

因此, 本文认为, 采用廓线梯度法确定农田蒸散量较为精确; 随着观测仪器、观测手段和计算条件的改善, 根据空气动力学理论建立的计算湍流通量的廓线梯度法必将获得更广泛的应用。而综合阻抗法计算方法简便, 计算结果可靠, 是一种具有广泛应用前景的方法, 可结合遥感技术用于大面积农田蒸散量的估算。

参考文献:

[1] ROSENBERG N J. Microclimate —— the biological environmant[M]. New York: John Wiley, 1974

[2] HAUGEN D A. Workshop on micrometeorology[M]. New York: the American Meteor Soc, 1973

[3] DYER A J, HICKS B B. Flux-gradient relationships in the constant flux layer[J]. Quart J Roy Met Soc, 1970, 96(410): 715～721

[4] BENOIT R. Notes on the integral of the surface layer profile gradient functions[J]. J Appl Meteor, 1977, 16(8): 859～860

[5] 孙卫国, 刘树华. 农田植被层上通量—廓线关系的研究[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(3): 404～409

[6] BROWN K W, ROSENBERG N J. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field[J]. Agron J, 1973, 65(6): 635～641

[7] 谢贤群. 一个改进的计算麦田总蒸发量的能量平衡—空气动力学阻抗模式[J]. 气象学报, 1988, 46(1): 102～106

A comparative study on calculation methods of field evapotranspiration

SUN Wei-guo, SHEN Shuang-he

(Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing　210044)

Abstract: Based on the experimental data from wheat fields, the evapotranspiration has been estimated using Bowen ratio-energy balance(BREB) method, profile gradient(PG) method and energy balance-aerodynamic resistance(EBAR) method respectively. Estimations and their errors are compared among the different methods with the error causes under discussion. Results show that the latent heat flux calculated by the BREB method is systematically about 20 % lower than by the PG method and slightly less than by the EBAR method.

Key words: field evapotranspiration; Bowen ratio; profile gradient; energy balance-aerodynamic resistance