

麦田动力学参数的确定方法及其分析

刘树华

(北京大学地球物理系)

提 要

本文根据莫宁-奥布霍夫近地面层廓线模式,用轻便风速表、热线风速仪、低阈值风速表在麦田中得到的两年风速资料,提出了一个计算农田零平面位移 d 、粗糙长度 z_0 、摩擦速度 u_* 及空气动力学阻力 γ_m 、 γ_r 的方法。并对几种测风仪器所得结果进行了比较,分析了 d 、 z_0 、 u_* 、 γ_m 、 γ_r 随风速及稳定度的变化特点。

引 言

近年来,国内外农业气象学家在计算农田总蒸发量及采用空气动力学方法,确定植被和大气之间各种物理属性(如动量、热量、水汽、 CO_2 等)的交换时,首先要确定的量就是农田中的零平面位移 d ,粗糙长度 z_0 、摩擦速度 u_* ;及 γ_m 、 γ_r 。^{[1]~[6]}。这些参数不仅随风速和稳定度有变化,而且还因作物的种类、高度和密度的不同而发生变化。如果不考虑这些变化,而简单采用别人的经验公式,在计算农田各种通量时,必将存在误差。 d 、 z_0 、 u_* 、 γ_m 、 γ_r 的准确性直接影响着结果的可靠性。本文提供的计算方法简便易行,可靠性强。

一 场地、仪器及资料来源

1. 观测场地

1984年4月17日—6月8日,1986年5月7—23日,我们在中国科学院地理研究所大屯生态系统试验站进行了大型农田微气象联合观测。

观测场地开阔、平整。试验期间的主导风向为西南风,有大约600m的来流路径。可供布设在近地面边界层中4m高的各类仪器

作梯度测量,并保证其数据的代表性。试验场地均种植冬小麦,而且两年的冬小麦长势、高度及密度一致性较好。

2. 观测仪器及布设

(a) 风速廓线

两年的风速廓线观测采用了三种风速测量仪器,即苏联产轻便风速表、英国产低阈值风速仪、自制的热线风速仪。其中,低阈值风速仪为光电积分式,起动风速 $<0.2m \cdot s^{-1}$,试验前风洞检定一致性较好,故此在现场未做水平比较;轻便风速表及热线风速仪,观测前在实验室的旋臂机上和风洞中做了检定,为确保仪器的一致性,在安装前及使用后,在野外又进行了水平比较试验。水平比较试验的高度均为1.2m。两次水平比较结果表明,轻便风速表相对误差一般都在1%—2%以下,个别表可达到3%。热线风速仪相对误差一般都在3%以下,个别达到4%—5%。比较时取样时间,轻便风速表为30分钟,热线风速仪为10分钟。三种测风仪器除轻便风速表需每次现场读数外,其它两种均采用电缆将信号传输到现场以北120m外的观测室中分别记录。仪器的安装高度为(均从地面算起):轻便速表1.00、1.15、1.35、1.50、1.70、2.00、2.50m;英式风速表是1.05、

1.25、1.45、1.90、2.30、2.70m；热线风速仪是0.90、1.10、1.40、1.70、2.00m。

(b) 温、湿廓线

干、湿球温度和水汽压廓线由热电堆温度计测量。1986年的温度廓线由热敏电阻温度计测量。输出信号均由电缆传输到观测室利用1905A型精密微伏级数字万用表内部程序自动采集。

为了提高廓线测量的灵敏度，探头由5个热电偶串联起来的热电堆做成。灵敏度为 $200\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。本观测系统可采集到 $1\mu\text{V}$ 。在制作热电堆温度表过程中发现其一致性较好。因热电堆是由康铜丝和锰铜丝利用银焊结成热电偶，再串联构成并密封在玻璃管中的，其稳定性是可靠的，故观测结束后未对热电偶温度表做检定比较。

在观测前严格调节马达通风的一致性，通风速度精确到 $0.01\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，由此消除通风不均造成的误差。试验中马达通风速度为 $3.15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在水平比较时，得出在测量过程中，热电堆温度计的误差范围为，干球一般小于 0.05°C ，而湿球则为 0.07°C 左右。

温湿廓线测量探头安装高度（从地面算起）为0.95、1.10、1.25、1.55、1.85、2.15m。

热敏电阻温度表，采用70年代初购进的热敏电阻。在实验室中相隔两个月的检定结果几乎无变化，证明其稳定性是可靠的。所采用的热敏电阻温度表对数线性相关系数 $r = 0.99999$ 以上。

热敏电阻温度表的精度还取决于1905A型精密微伏级数字万用表的采样精度，观测中取 $20\text{k}\Omega$ 档，可精确采到欧姆位。估计观测中由于电缆等造成的误差，不会大于 0.05°C 。由热敏电阻温度表测量廓线时的安装高度（从地面算起）为0.90、1.30、1.70、2.15m。

3. 资料预处理

由于观测场地及气象条件的影响，在处理资料前，对资料进行了预处理，将不符合

要求的资料剔除，其原则如下：

(1) 剔除北方、西北、东、东北方向来流的资料，因上述方向200m以内有树障及房屋，仪器按装杆在探头的东北方向。

(2) 剔除静风及风速梯度测量最高层风速小于 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的资料，因小风时，风杯时转时停，资料不准确。

(3) 剔除清晨和傍晚时的某些资料，因此时各种物理量随时间变化较快，常常引起风速廓线的畸变。

(4) 经过以上预处理后，对合理资料输入计算机，采用尝试迭代法计算出 d 、 z_0 、 u_* 。计算中再将相关系数小于0.98的资料剔除。这样算出的 d 、 z_0 、 u_* 即为真值，然后再进行 $\gamma_{.m}$ 、 $\gamma_{.l}$ 的计算。

二 计算方法

由莫宁-奥布霍夫相似理论，近地面层风廓线模式为：

$$\frac{K(z-d)}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} = \phi_m \left(\frac{z-d}{L} \right) \quad (1)$$

式中 K 为卡曼常数； u_* 为摩擦速度； d 为零平面位移； ϕ_m 为稳定度函数。

ϕ_m 形式采用Dyer的建议^[7]：

$$\phi_m = \begin{cases} (1-16\zeta)^{-1/4} & \zeta \leq 0 \\ 1+5\zeta & \zeta > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\zeta = \frac{z-d}{L}$ ； $L = -\rho c_p T u_*^3 / K g H$ ， ζ 与

理查逊数 Ri 的关系为：

$$\begin{cases} \zeta = Ri & Ri \leq 0 \\ \zeta = Ri / (1-5Ri) & Ri > 0 \end{cases} \quad (3)$$

理查逊数根据下式计算。

$$Ri = \frac{g}{T} (\partial T / \partial z) / (\partial u / \partial z)^2 \quad (4)$$

将(2)式代入(1)式对高度 z 积分，可得：

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left[\ln \frac{z-d}{z_0} - \psi_m \left(\frac{z-d}{L} \right) \right] \quad (5)$$

式中

$$\psi_m = \begin{cases} \ln[(1+\chi^2)/2] + 2\ln[(1+\chi)/2] - 2\text{tg}^{-1}(\chi) + \pi/2 & (z-d)/L < 0 \\ -5[(z-d)/L] & (z-d)/L \geq 0 \end{cases}$$

$$\chi = [1 - 16(z-d)/L]^{1/4}$$

求d、z₀、u*的具体方法是，采用尝试迭代法对(5)式进行线性回归，相关系数达到最大时，求出d、z₀、u*的真值。

空气动力学阻力的计算方法

(1)在近似中性条件下，动量、热量、水汽交换与湍流交换系数类似，假定

$$\gamma_{.m} = \gamma_{.h} = \gamma_{.e},$$

$$\begin{cases} \gamma_{.e} = \frac{1}{ku_*} \ln[(z-d)/z_0] \\ \gamma_{.m} = \gamma_{.e} \{1 + \phi_h / \ln[(z-d)/L]\} \end{cases} \quad (6)$$

式中φ_h形式为：

$$\phi_h = \begin{cases} (1 - 16 \frac{z-d}{L})^{1/2} & \frac{z-d}{L} < -0.03 \\ (1 + n \frac{z-d}{L}) & \begin{cases} \frac{z-d}{L} > 0 \\ -0.03 < \frac{z-d}{L} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

其中n为经验常数，根据文献^[8]，(z-d)/L < 0时取n = 4.5，(z-d)/L > 0时，n = 5.2。z为所选参考高度，L为莫宁-奥布霍夫特征长度。

(2)动量交换空气动力学阻力定义为^[5]

$$\gamma_{.m} = \rho u(z) / \tau \quad (8)$$

积分(1)式得

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \left[\ln \frac{z-d+z_0}{z_0} + \int_{d+z_0}^z \frac{(\phi_m - 1)}{z} dz \right] \quad (9)$$

由(8)、(9)式得

$$\gamma_{.m} = \left[\ln \frac{z-d+z_0}{z_0} + \phi_m \right]^2 / K^2 u(z) \quad (10)$$

$$\text{式中 } \phi_m = \int_{d+z_0}^z \frac{\phi_m - 1}{z} dz$$

根据Dyer(1974)^[10]建议：

$$\Phi_m = \begin{cases} (1 - 16\text{Ri})^{-1/4} & \text{Ri} < -0.05 \\ 1 & -0.05 < \text{Ri} < 0.05 \\ (1 - 5\text{Ri})^{-1} & \text{Ri} > 0.05 \end{cases} \quad (11)$$

在实际情况下，农田中水汽、热量和动量的源汇并不一定在同一水平面上。Monteth(1975)指出，在一般情况下，冠层中水汽和热量的平均源面总是比动量的汇低，即z₀（水汽及热量传输的下垫面粗糙长度）总小于z_{0v}，这样水汽由z_{0v}扩散到z₀还需受到一个阻力γ_b^[1]，即：

$$\gamma_a = r_{am} + \gamma_b \quad (12)$$

$$\gamma_b = \ln(z_0/z_{0v}) / (Ku(z)) \quad (13)$$

实际情况下计算γ_b时，Thom(1972)^[9]指出，对一般作物，非充分湿润的蒸发面：

$$\gamma_b = 6.266u_*^{-2/3} \quad (14)$$

$$\text{所以 } r_a = r_{am} + 6.266u_*^{-2/3} \quad (15)$$

结合(8)式，并代换u*可得到：

$$\gamma_a = \gamma_{am} + 6.266(u(z)/r_{am})^{-1/3} \quad (16)$$

三、结果

(1)总粗糙度d+z₀随风速及层结的变化

我们称d+z₀为农田总粗糙高度。其物理意义与裸地粗糙高度z₀相当。在d+z₀高度以上，风廓线满足莫宁-奥布霍夫模式，这高度以下则不能。在近中性条件下，总粗糙高度d+z₀随风速的变化规律见图1。由图1可见，两年三种仪器所得结果基本一致。d+z₀的大小一般在50—75cm之间。d+z₀在风速小于2.5m·s⁻¹时，随风速增大很快减小，而后随风速增大趋于一个常值。风速再继续增大有下降趋势。这一变化规律可作如下解释：作物的植株具有柔软性，可随风摆动，植被表面的起伏程度也随风速变化。在风速较小时(<2.5m·s⁻¹)，小麦植被稍有摆动，但摆动是紊乱的。在这

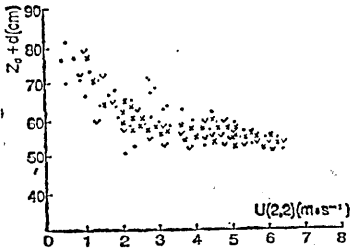


图1 总粗糙度 $z_0 + d$ 与风速的变化关系

• 为1984年热线资料; × 为1984年风杯风速表资料;
 √ 为1986年风杯资料

种情况下,一方面使总粗糙度有所增大,而另一方面风速增加后向植被层内输送的动量也增加,两者作用的总效果使得 $d + z_0$ 随风速增加而下降。这说明风速较小时,动量向植被中输送起主要作用。当风速继续增大,在 $2.5 - 5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,此时产生了“麦浪”,植被摆动方向趋向一致,无疑“麦浪”的形成相当于在原来的 $d + z_0$ 上又叠加了一个 $\Delta(d + z_0)_1$,同时由于风速增大,动量向植被中的传递也增加,又使总粗糙度减小一个 $\Delta(d + z_0)_2$,结果表明 $\Delta(d + z_0)_1 \approx \Delta(d + z_0)_2$,故在 $2.5 - 5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, $d + z_0$ 的总效果趋于不变。而当风速大于 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,植株的摆动趋于一致,使得植被的有效高度降低,同时动量向植被中的传递不再继续增大,由于植被密度相对增大,动量下传受到一定阻力。所以植被有效高度的降低则成为使得 $d + z_0$ 下降的主要因素。

$d + z_0$ 随稳定度参数 z/L 增大近似线性增加(见图2)。在不稳定层结下,湍流交换能力强,动量下传容易。中性层结时,虽然湍流交换较弱,但风速一般较大,动量下传也较强,故在不稳定或中性层结时 $d + z_0$ 较小。而在稳定层结条件下,湍流交换弱,动量不易下传,加上此时风速一般较小,故此时 $d + z_0$ 较大。

(2) u_* 随风速的变化

图3是在近中性层结条件下,摩擦速度

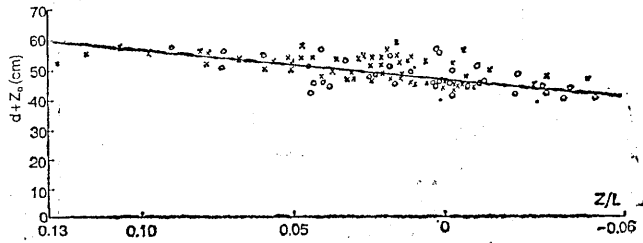


图2 总粗糙度 $d + z_0$ 随 z/L 的变化关系
 ×、○ 分别为1984、1986年风杯风速表资料。

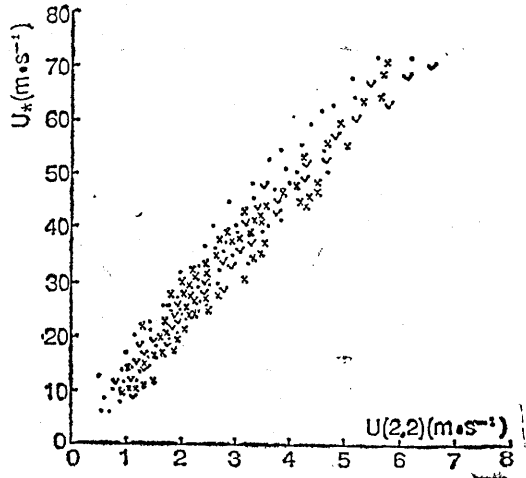


图3 摩擦速度 u_* 随风速变化关系
 (说明同图1)

u_* 随风速的变化规律。从中可看出,三种仪器所得结果一致性较好,并且随风速都近似为线性变化。

(3) 空气动力学阻力特性

本文就动量交换空气动力学阻力,采用了两种方法进行了计算,两种方法均采用了稳定度订正,结果如图4所示,两种方法所得结果基本一致。

早期采用空气动力学阻抗模式计算田间近地面蒸发时,一般采用动量交换阻力代替水汽和热量交换阻力。本文结果表明,这样会给计算结果带来不可忽视的误差。从图5、6可看出,水汽交换阻力 γ_w 明显大于动量交换阻力 γ_m 。图7是水汽交换阻力 γ_w ,不考虑稳定度订正与考虑稳定度订正时的关

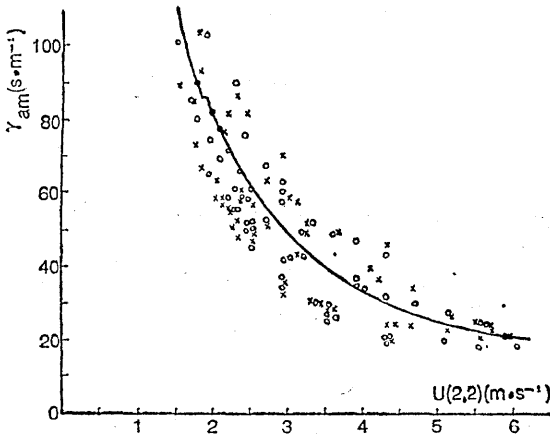


图4 两种方法计算的 $\gamma_{.m}$
○为方法一; ×为方法二

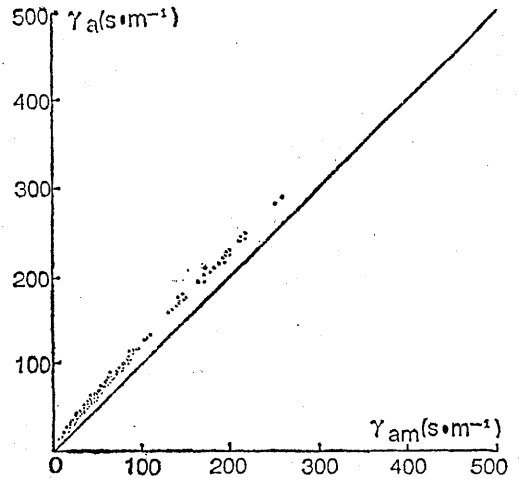


图6 方法二计算的 $\gamma_{.m}$ 与 γ_a 之间的关系

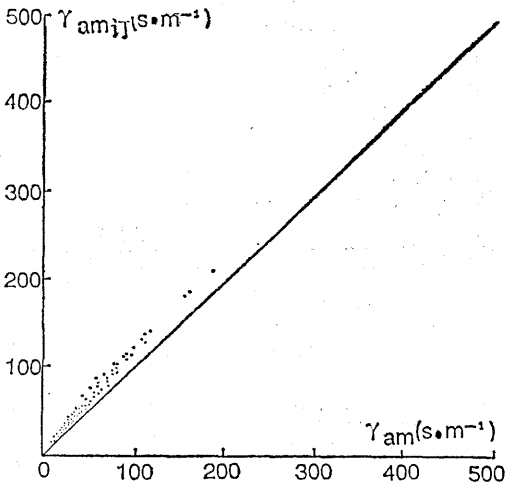


图5 方法一计算的订证与未订证的 $\gamma_{.m}$

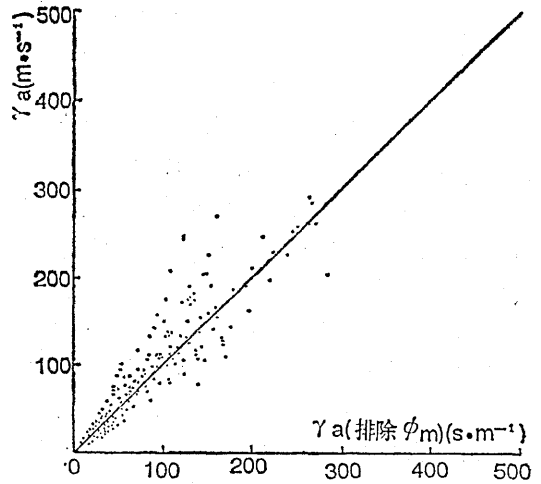


图7 方法二计算 γ_a 的稳定度影响

系。由此看出,不考虑稳定度订正时, $\gamma_{.m}$ 的点子离散较大。

四、问题与讨论

(1) 本模式建立在近地面层中风速廓线接近对数分布的基础上。虽然模式中进行了稳定度订正,但在很稳定或很不稳定时,即风廓线偏离对数分布较大时,会造成一定的误差。但计算结果还是令人满意的。

(2) 热线风速仪在观测中是采用循环观测10分钟,再取其平均结果。而苏式轻

便风速表是观测30分钟的平均结果;英式低阈值小风杯风速仪是光电积分式,输出数据为前10分钟的积分值。图1中由热线风速仪测量的值在低风速时较离散,这主要是热线风速仪循环观测时间短,加上低风速时湍流对观测精度影响也较大造成的。

(3) 农田中的 d 和 z_0 不仅随风速和层结稳定度不同而有变化,同时也随植被的种类、高度、水分供应情况、密度及作物茎秆的柔性的不同而变化。在使用 d 、 z_0 参数时,必须通过实际观测,或采用作物种类、

高度、密度等相似的植被的结果。不能任何植被都套用前人中性层结时的经验公式。特别指出的是 d 、 z_0 并不唯一决定于作物高度。

(4) 在采用空气动力学阻抗模式计算田间总蒸发量时, γ_{*m} 、 γ_{*v} 必须考虑稳定度订正, 不能以 γ_{*m} 代替 γ_{*v} 。

参 考 文 献

- [1] Monteith, J. L., Principles of environmental physics, Edward Arnold, London, 1975.
- [2] Stanhill G., A simple instrument of the field measurement of turbulent diffusion flux, J. Appl. Meteor., 8, pp 509-513, 1969.
- [3] Legg, B. J., Turbulent diffusion within a wheat canopy., Q. J. R. Meteor. Soc, 101, pp 597-610, 1975.
- [4] Bache, D. H and Unsworth, M. H., Some aerodynamic features of a cotton canopy, .

- Q. J. R. Meteor. Soc., 103, pp 121-134, 1977.
- [5] Bailey, W and Davies, J. A., The effect of uncertainty in aerodynamic resistance on evaporation estimates from the combination model., B. L. Meteor., 20, pp 187-199, 1981.
- [6] 谢贤群. 一个改进的计算麦田总蒸量的能量平衡——空气动力学阻抗模式, 气象学报 Vol. 46, NO. 1, pp 102-106, 1988.
- [7] Dyer, A. J and Hicks, B. B., Flux-Profile relationships in constant flux layer., Q. J. R. Meteor. Soc., 94, pp 318-332, 1970.
- [8] Webb, E. K., Profile relationships: the loglinear range and extension to strong stability., Q. J. R. Meteor. Soc., 96, pp 67-80, 1970.
- [9] Thom, A. S., Momentum, mass and heat exchange of vegetation., Q. J. R. Meteor. Soc., 98, pp 124-134, 1972.
- [10] Dyer, A. J., A review of flux-profile relationship., B. L. Meteor., 7, pp 365-372, 1974.

The definition of aerodynamic parameters in the wheat fields and their analysis

Liu Shuhua

(Department of Geophysics, Beijing University)

Abstract

In this paper, using the model of wind profile of Monin-Obukhov in the near surface layer, the zero-plane displacement d ; the roughness parameter z_0 ; friction velocity u_* and aerodynamic resistance factors γ_{*v} and γ_{*m} are calculated. The characteristics of d , z_0 , u_* , γ_{*v} and γ_{*m} , and their variations with wind velocity and stability are analyzed and discussed.