

空气动力学方法在湍流通量 计算中的误差分析

刘树华

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

黄子琛 刘立超 冯金朝

(中国科学院兰州沙漠研究所, 兰州 730000)

提 要

采用迭代方法检验了在近地面层大气中使用空气动力学方法时, 温度、湿度和风速梯度等观测误差对感热和潜热通量计算的相对误差。结果表明, 在微风和低湿环境中, 空气动力学方法的使用受到限制。

关键词: 空气动力学方法 感热通量 潜热通量 相对误差

引 言

下垫面和近地面层大气之间的动量、热量和物质输送, 是微气象学、水文学、农学和植物生态学等学科领域共同的重要研究问题。它不仅为土壤-植被-大气系统和气候模式提供边、初条件参数, 而且在地表环境系统的物质能量流的理论研究和生产实践应用中都具有直接重要意义。

由于空气动力学方法的物理概念简明, 应用方便, 在下垫面与近地面层大气层之间的动量、热量、水汽和二氧化碳等通量的计算中得到广泛的应用。但对使用空气动力学方法计算湍流通量时的总体系统误差的分析还没有人具体检验过。本文检验了在近地面层大气中使用空气动力学方法时, 温度、湿度和风速梯度等观测误差对感热和潜热通量计算的相对误差, 及其与风速和湿度差的关系。为正确使用空气动力学方法提供了依据。

1 基本原理

在均匀下垫面近地面层中, 根据 Monin-Obukhov 相似理论, 风速、温度和湿度梯度可

写成:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{k(z-d)} \Phi_M(\xi) \quad z > h \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_*}{k(z-d)} \Phi_H(\xi) \quad z > h \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{e_*}{k(z-d)} \Phi_W(\xi) \quad z > h \quad (3)$$

其中, u 为全风速; T 为温度 (因在近地面层大气中 $\theta = T$, θ 为位温, 所以式(2)中取 $\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial z}$, 下同); e 为水汽压; k 为 Karman 常数, 取 $k=0.4$; u_* 、 T_* 和 e_* 分别为摩擦速度、温度和湿度尺度; d 为地面零平面位移高度; h 为地表粗糙元平均高度; $\Phi_{M,H,W}(\xi)$ 为动量、热量和水汽垂直交换通用稳定函数; $\xi = \left(\frac{z-d}{L}\right)$, L 为 Monin-Obukhov 长度, 定义为

$$L = -\frac{\rho C_p T u_*^3}{kgH} = \frac{T u_*^2}{kgT_*} \quad (4)$$

如果在已有风速、温度和湿度的梯度测量资料时, 可由式(1)–(3)确定 u_* 、 T_* 和 e_* , 即可由下式计算湍流通量

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (5)$$

$$H = -\rho C_p u_* T_* \quad (6)$$

$$\lambda E = -\rho \lambda \frac{\epsilon}{P} u_* e_* \quad (7)$$

式中, τ 、 H 和 λE 分别为动量、感热和潜热通量; ρ 为大气密度; C_p 为大气定压比热; λ 为水汽化潜热; ϵ 为水分子与干空气分子的摩尔质量比, 取 $\epsilon = \frac{\mu_w}{\mu_d} = 0.622$; P 为大气压。

由式(1)–(7)可得

$$\tau = \rho u_* k(z-d) \frac{\partial u}{\partial z} \Phi_M^{-1}(\xi) \quad (8)$$

$$H = -\rho C_p u_* k(z-d) \frac{\partial T}{\partial z} \Phi_H^{-1}(\xi) \quad (9)$$

$$\lambda E = -\rho \lambda \epsilon u_* k(z-d) \frac{\partial e}{\partial z} P^{-1} \Phi_W^{-1}(\xi) \quad (10)$$

以上式中 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 和 $\frac{\partial e}{\partial z}$ 可根据两个高度上的 u

$$\text{其中 } \Psi_M(\xi) = \begin{cases} \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - 2\tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} & \xi \leq 0 \\ -5\xi & \xi > 0 \end{cases}$$

$$x = \Phi_M^{-1}(\xi) = (1 - 16\xi)^{1/4}$$

至此, 我们可以利用上述推得的公式来计算温、湿和风速梯度观测误差对 H 和 λE 的计算产生的误差了。

2 误差分析

资料来源于1984年4–6月, 在中国科学院地理所北京大屯生态系统试验站, 麦田下垫面微气象综合观测试验。

参考文献[3][4]关于空气动力学方法的误差估计, 采用迭代法计算了输入参数的一般观测误差估计范围内的量值, 对感热和潜

(z)、 $T(z)$ 和 $e(z)$ 的测量值, 利用下式得到^[1]

$$\frac{\partial s}{\partial z} = \frac{s_2 - s_1}{(z_1 z_2)^{1/2} \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \quad (11)$$

其中 z_1 和 z_2 为零平面位移高度以上风速、温度和湿度的观测高度; s_1 和 s_2 为相应的测量值。

$\Phi_{M,H,W}(\xi)$ 计算式采用 Dyer (1974) 给出的形式^[2]

$$\Phi_M(\xi) = \begin{cases} (1 - 16\xi)^{-1/4} & \xi \leq 0 \\ 1 + 5\xi & \xi > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\Phi_H(\xi) = \Phi_W(\xi) = \begin{cases} (1 - 16\xi)^{-1/2} & \xi \leq 0 \\ 1 + 5\xi & \xi > 0 \end{cases} \quad (13)$$

由式(1)积分得风速廓线公式为

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \Psi_M(\xi) \right] \quad (14)$$

热通量所产生的相对误差 $\frac{\sigma H}{H}$ 和 $\frac{\sigma \lambda E}{\lambda E}$ 。

我们把输入参数 $T = 19.5^\circ\text{C}$, $\Delta T = 1.10^\circ\text{C}$, $\Delta e = -2.47\text{hPa}$, $d = 0.45\text{m}$, $z_0 = 0.09\text{m}$, $z_1 = 0.74\text{m}$, $z_2 = 1.8\text{m}$ 的观测误差估计为 $\sigma T = 0.3 - 0.6^\circ\text{C}$, $\sigma \Delta T = 0.05 - 0.2^\circ\text{C}$, $\sigma \Delta e = 0.06 - 0.14\text{hPa}$, $\sigma u = 0.1 - 0.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\sigma d = 0.05 - 0.1\text{m}$, $\sigma z_0 = 0.02 - 0.04\text{m}$ 。给定一组 $d, z_0, T, \Delta e$ 和 u 可得到一个 H_0 和 λE_0 , 再用 $d \pm \sigma d, z_0 \pm \sigma z_0, T \pm \sigma T, \Delta T \pm \sigma \Delta T, \Delta e \pm \sigma \Delta e, u \pm \sigma u$ 得到 $H_1, \lambda E_1$ 和 $H_2, \lambda E_2$ 值, 定义 H 和 λE 的相对误差为

$$\frac{\sigma H_0}{H_0} = \frac{|H_0 - \bar{H}| + |H_1 - \bar{H}| + |H_2 - \bar{H}|}{3H_0} \times 100\%$$

$$\frac{\sigma \lambda E_0}{\lambda E_0} = \frac{|\lambda E_0 - \bar{\lambda E}| + |\lambda E_1 - \bar{\lambda E}| + |\lambda E_2 - \bar{\lambda E}|}{3\lambda E_0} \times 100\%$$

其中 $\bar{H} = (H_0 + H_1 + H_2)/3$, $\bar{\lambda E} = (\lambda E_0 + \lambda E_1 + \lambda E_2)/3$

按定义 d 和 z_0 只与粗糙元高度和分布及稀疏度有关, 它们决定着下垫面湍流拖曳

力的大小, 由中性层结条件下风速梯度资料确定。

下面以求 H_0 和 λE_0 为例, 具体说明迭代步骤如下: ①首先假定层结是中性的, 即 L

→ -∞, $\Phi_M = \Phi_H = \Phi_W = 1, \Psi_M = 0$, 由式(14)求得 u_* 的初值, 再由式(9)和(10)求得 H_0 和 λE_0 的初值; ②由式(4)计算 L , 并由式(14)得到新的 u_* 值及式(12)和(13)得到 $\Phi_{M,H,W}(\xi)$ 值, 再由式(9)和(10)得新的 H_0 和 λE_0 值; 依次迭代下去, 直到 $u_*, \Phi_{M,H,W}(\xi), H$ 和 L 都收敛到某个给定的小量误差范围内, 本文规定 $|1 - \frac{n_i}{n_{i+1}}| \leq 0.005$ (其中 n 代表 $u_*, \Phi_{M,H,W}(\xi), H$ 和 L 的迭代值)即迭代结束。

由以上迭代求 $H, \lambda E$ 的过程可见, 温度、湿度和风速及其梯度的测量误差, 显然会影响它们的计算精度。为此, 本文分别迭代计算了 $d \pm \sigma d, z_0 \pm \sigma z_0, T \pm \sigma T, \Delta T \pm \sigma \Delta T, \Delta e \pm \sigma \Delta e, u \pm \sigma u$ 的 $H_1, \lambda E_1$ 和 $H_2, \lambda E_2$ 的值。得到相对误差 $\frac{\sigma H_0}{H_0}, \frac{\sigma \lambda E_0}{\lambda E_0}$ 与风速和湿度差的关系如图 1—5 所示。

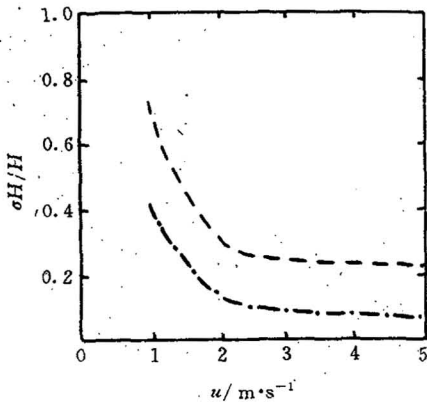


图1 $\frac{\sigma H}{H}$ 与风速的关系

$d=0.45\text{m}, z_0=0.09\text{m}, z_1=0.74\text{m}, z_2=1.8\text{m}, T=19.5^\circ\text{C}, \Delta T=1.10^\circ\text{C}, \Delta e=-2.47\text{hPa}$

图中虚线表示输入参数的误差取上限时的 $\frac{\sigma H_0}{H_0}$ 和 $\frac{\sigma \lambda E_0}{\lambda E_0}$, 点划线为输入参数的误差取下限时的 $\frac{\sigma H_0}{H_0}$ 和 $\frac{\sigma \lambda E_0}{\lambda E_0}$ 的计算结果。由图 1—5 可见, 当风速 $u_{2.0} < 2.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 及 $-\Delta e < 0.5\text{hPa}$ 时, $\frac{\sigma H_0}{H_0}$ 和 $\frac{\sigma \lambda E_0}{\lambda E_0}$ 迅速增加。由此可见空气动力学方法在微风低湿的环境中使用

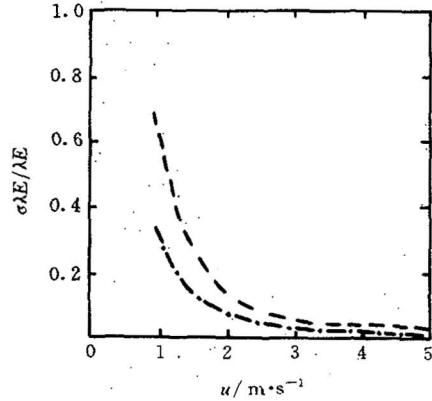


图2 $\frac{\sigma \lambda E}{\lambda E}$ 与风速的关系
说明同图 1

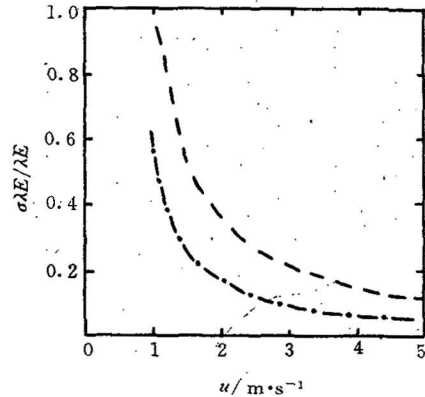


图3 $\frac{\sigma \lambda E}{\lambda E}$ 与风速的关系

$d=0.60\text{m}, z_0=0.12\text{m}, z_1=1.20\text{m}, z_2=1.70\text{m}, T=22.9^\circ\text{C}, \Delta T=1.03^\circ\text{C}, \Delta e=1.49\text{hPa}$

时, 会产生较大误差。由图 1—5 我们还可看出, 当 $u_{2.0} < 2.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 输入参数的误差取上限, $\frac{\sigma H_0}{H_0}$ 的相对误差 $< 25\%$, 而输入参数的误差取下限时, $\frac{\sigma H_0}{H_0}$ 的相对误差 $< 10\%$ 。当 $u_{2.0} > 2.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}, -\Delta e < 0.5\text{hPa}$ 时, $\frac{\sigma \lambda E_0}{\lambda E_0}$ 一般在 10% 左右。因此, 在使用空气动力学方法时, 不但要提高温度、湿度和风速梯度的观测精度, 而且要注意调整所使用的两干湿球温度差测量的高度, 以便提高该方法的计算精度。

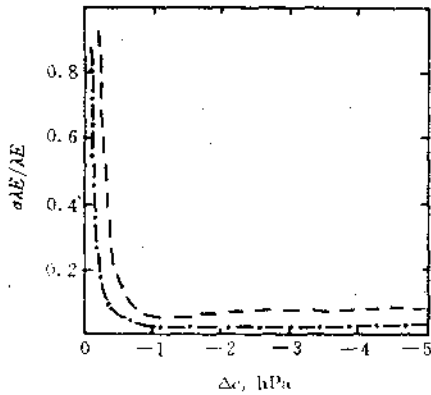


图4 $\frac{\sigma_{\lambda E}}{\lambda E}$ 与湿度差的关系

$d=0.45\text{m}, z_0=0.09\text{m}, z_1=0.74\text{m},$

$z_2=1.8\text{m}, u=3.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}, T=19.5^\circ\text{C}, \Delta T=1.10^\circ\text{C}$

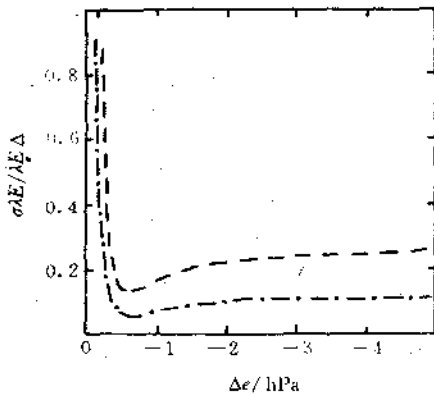


图5 $\frac{\sigma_{\lambda E}}{\lambda E}$ 与湿度差的关系

$d=0.6\text{m}, z_0=0.12\text{m}, z_1=1.20\text{m},$

$z_2=1.70\text{m}, T=22.9^\circ\text{C}, \Delta T=1.03^\circ\text{C}, u=3.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

在使用空气动力学方法迭代求湍流通量时,需要知道通用稳定度函数 $\Phi_{M,H,W}(\xi)$ 的形式。然而, $\Phi_{M,H,W}(\xi)$ 的函数形式有多种,都是不同作者,在不同地点、时间,使用不同仪器得到的。它们本身存在差异,任意选用必然会导致通量计算的误差。对于相同廓线资料应用于不同通用稳定度函数,计算通量的相对误差可参见 Aloysius and Gordon (1978) 的检

验结果^[4]。他们采用相同的廓线资料应用于三个众所周知的通用稳定度函数计算了湍流通量。结果发现相互之间偏差可达 20%—40%,并且其偏差在稳定层结比不稳定层结显著偏高。

而本文应用的是一种通用稳定度函数,讨论的是温度、湿度和风速梯度观测误差对通量计算影响的相对误差。因此可不考虑通用稳定度函数的影响,以此来检验温度、湿度和风速梯度观测误差对空气动力学方法在湍流通量计算中的误差分析是很有意义的。

3 结论

空气动力学方法以物理概念简明,理论成熟,使用方便为人们在计算近地面层湍流通量时广泛应用。但本文计算结果表明,当风速 $u_{2.0} < 2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 及 $-\Delta e < 0.5\text{hPa}$ 时,感热和潜热通量的相对误差迅速增加。因此,在微风、低湿的环境中,该方法的使用受到限制。使用中不但要提高温度、湿度和风速梯度的观测精度,而且要注意调整所使用的两干湿球温差的测量高度,以便提高该方法的计算精度。

参考文献

- 1 Verma, S. B., et al., Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. J. Appl. Meteor., 1978, 17: 330—338.
- 2 Dyer, A. J. A review of flux-profile relationships. B. L. Meteor., 1974, 7: 363—372.
- 3 Verma, S. B., and N. J. Rosenberg. Accuracy of lysimetric energy balance and stability-corrected aerodynamic methods of estimating above canopy flux of Co. J. Agronomy, 1975, 67: 699—704.
- 4 Aloysius, K. L., and A. M. Gordon. On the relative errors in methods of flux calculations. J. Appl. Meteor., 1978, 17: 1704—1711.

(下转第 29 页)

Errors Analysis of Aerodynamic Method in Turbulent Flux Calculation

Liu Shuhua

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Huang Zichen Liu Lichao Feng Jinzhao

(Institute of Desert Research, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract

By using an alternative method the relative errors are examined of sensible heat and latent heat flux computed from the aerodynamic method. The results show that the relative errors of sensible heat and latent heat rapidly increased as $u_{z,0} < 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $-\Delta e < 0.5 \text{ hPa}$. The employing of this method is limited in the environment of tiny wind and low humidity.

Key Words: aerodynamic method sensible heat flux latent heat flux relative error