

刘树华 张霄琛**

(北京大学地球物理系)

提 要

本文应用三种不同地表粗糙度条件下所取得的风、温廓线资料, 计算了在大气近地面层中风廓线曲率 β 和理查孙数 Ri 的值。 Ri 和 β 的关系表明: 在农田、草原和林网内1/2倍树高以下, 虽然离散, 但一致性较好; 而林网内两倍树高处, 在稳定层结时结果明显偏小。

一、引言

在近地面层的湍流运动是由热力和机械作用产生的。受湍流影响的地面层风速和温度廓线与稳定度有着直接关系, 并且不同地表粗糙条件, 也直接影响着近地面层风速和温度廓线的形成机制。本文试图采用不同地表粗糙条件的实测风速和温度廓线资料, 根据风速廓线曲率 β 和理查孙数 Ri 的定义, 研究近地面层中通量廓线的相似性。而风速廓线曲率和理查孙数之间的关系, 是进行这一理论检验的简便方法。

二、原理及计算方法

根据莫宁-奥布霍夫相似理论, 在近地面层中, 动量通量, 湍流热通量为常值, 风速和温度及湿度廓线趋近于对数规律。将流体力学的相似原理加以推广, 以寻求近地面层的各种特征尺度, 确定出它们的无量纲方程, 使之能普遍适用。适用于近地面层的宏观参数有: 比湍流热通量 $H/\rho C_p$; 比湍流切应力 τ/ρ ; 浮力参数 g/θ ; 比水汽通量 E/ρ , 它们构成的特征尺度有:

$$\text{特征长度: } L = -u_*^2 \theta / kg \theta_* \quad (1)$$

$$\text{特征速度: } u_* = (\tau/\rho)^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{特征温度: } \theta_* = -H/\rho C_p u_* \quad (3)$$

$$\text{特征比湿: } q_* = -E/\rho u_* \quad (4)$$

因而层结条件下的风速、温度和比湿廓线可以表达为无量纲化方程为:

$$\frac{kz}{u_*} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \varphi_m(\xi) \quad (5)$$

$$\frac{kz}{\theta_*} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = \varphi_h(\xi) \quad (6)$$

$$\frac{kz}{q_*} \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = \varphi_q(\xi) \quad (7)$$

式中 φ_m , φ_h 和 φ_q 称普适函数。通过水平切应力 τ 和垂直湍流热通量 H 定义以及湍流交换系数 k_m 和 k_h 的定义, 湍流交换系数的比

$$r = k_h/k_m = \varphi_m(\xi)/\varphi_h(\xi) \quad (8)$$

式中 k 为卡曼常数(0.4), $\xi = z/l$, 根据理查孙数的定义:

$$Ri = \left(\frac{q}{\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) / \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 \quad (9)$$

经推导可得到:

$$Ri = \xi \cdot \varphi_h / \varphi_m^2 \quad (10)$$

$$\xi = \begin{cases} Ri & Ri \leq 0 \\ Ri/(1-5Ri) & Ri > 0 \end{cases} \quad (11)$$

*本文为国家自然科学基金资助项目

**参加该项工作的还有陈重, 刘和平及中科院沈阳生态所朱廷耀, 孔凡智, 王述礼, 周广胜, 金昌杰等

Businger等⁽¹⁾, 从廓线分析中给出下面的关系:

不稳定条件时, $\xi < 0$,

$$\varphi_m = (1 - 15\xi)^{-1/4} \quad (12)$$

$$\varphi_m^4 - 9\xi\varphi_m^3 = 1 \quad (13)$$

$$\varphi_h = 0.74(1 - 9\xi)^{-1/2} \quad (14)$$

$$\text{或 } \varphi_h = 0.74(1 + 4|\xi|^{3/4})^{-2/3} \quad (15)$$

由方程 (8), (12), (14) 和 (10) 得到:

$$R_i = \frac{0.74\xi(1 - 15\xi)^{1/2}}{(1 - 9\xi)^{1/2}} \quad (16)$$

稳定条件时, $\xi > 0$,

$$\varphi_m = 1 + 4.7\xi \quad (17)$$

$$\varphi_h = 0.74 + 0.47\xi \quad (18)$$

由方程 (8), (17), (18) 和 (10) 得:

$$R_i = \frac{\xi(0.74 + 4.7)}{(1 + 4.7\xi)} \quad (19)$$

廓线曲率或者廓线斜率的变化, 是直接由于边界层内热力和动力影响的结果。而理查孙数定义也是由热力和机械湍流产生的力的比。因此, 研究廓线曲率与理查孙数的关系有很强的实际意义。风速廓线曲率 β 可由平均风速的两阶微商表示⁽²⁾:

$$\beta = -\left(z \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}\right) / \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right) = 1 - \frac{d(\log \varphi_m)}{d(\log \xi)} \quad (20)$$

给出一个 φ_m 或 R_i 值, 可从 (8) 至 (20) 式计算出 β 的理论值。理论上的 β - R_i 曲线还可与实验值比较。从实测廓线数据计算 β 与 R_i 的方法为⁽³⁾:

$$Ri_2 = g(z_2)(\theta_3 - \theta_1)\bar{\theta}^{-1}(u_3 - u_1)^{-2} \ln(z_3/z_1) \quad (21)$$

$$\beta_2 = 1 - \alpha_2 - 2[\log(\alpha_{2,3}/\alpha_{1,2})] / \log(z_3/z_1) \quad (22)$$

式中

$$\alpha = \frac{d(\log \bar{u})}{d(\log z)} = \left(z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right) / \bar{u}$$

所以

$$\alpha_{2,3} = [\log(u_3/u_2)] / \log(z_3/z_2)$$

$$\alpha_{1,2} = [\log(u_2/u_1)] / \log(z_2/z_1)$$

而 $\alpha_2 = (\alpha_{2,3} + \alpha_{1,2})/2$

式中, $\theta_1(k)$, $\theta_2(k)$, $\theta_3(k)$ 及 u_1 , u_2 , u_3 分别为 z_1 , z_2 和 z_3 处同时测得的位温和风速。应用方程 (21), (22) 即可从在大气近地面层中同时测到的风速和温度廓线梯度资料, 计算出 Ri_2 和 β_2 。

在不稳定条件时 ($\xi < 0$), 我们从公式 (12) 经推导, 整理可得:

$$\beta = (5 - \varphi_m^4) / 4 \quad (23)$$

同样, 从式 (13) 经推导整理可得:

$$\beta = 4 / (3 + \varphi_m^4) \quad (24)$$

在稳定条件时 ($\xi > 0$), 由 (17) 式得:

$$\frac{d(\log \varphi_m)}{d(\log \xi)} = \frac{\varphi_m - 1}{\varphi_m} \quad (25)$$

同样将 (25) 式代入 (20) 式, 得到:

$$\beta = 1 / \varphi_m \quad (26)$$

(23), (24) 和 (26) 式即为近地面层大气不稳定层结和稳定层结时的风速廓线曲率理论关系式。同理也可求温度及湿度的廓线曲率。

三、实验场地及仪器

1. 乾安实验场地及仪器

1989年5月在吉林省乾安县防风林田内进行了为期20天的大气边界层及微气象观测。防风林田为南北方向长1300m, 宽250m, 林带宽15m, 树高9m, 林网田为播种前裸地。

风速、温度、湿度和气压廓线由Ts-3BI型系留气球系统测量。观测高度为2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19m。取样长度为30分钟, 在30分钟内各高度上下测两个循环, 然后取平均。数据可在主机上编程自动打印或在屏幕上显示手记。另外还进行了湍流, 辐射, 地温, 水平场等测量, 因与本文无关故不叙述。

2. 旷野实验场地及仪器

旷野观测场位于林网观测场以西20km处, 与林网内同步进行观测。该场为草高大

约3cm,覆盖率为60%的大草甸子,观测项目、仪器同林网内。观测高度为2,4,6,8,11m。

3. 北京大屯生态实验站场地及仪器

1986年5月8日至6月4日,在中国科学院北京大屯生态试验站的麦田内进行了地面湍流及微气象观测。观测场地开阔,平整。试验期间主导风向上(SW),有大约600m的来流路径,因此,装设在作用面以上高达4m的各类梯度测量仪器,都可保证其数据的代表性。

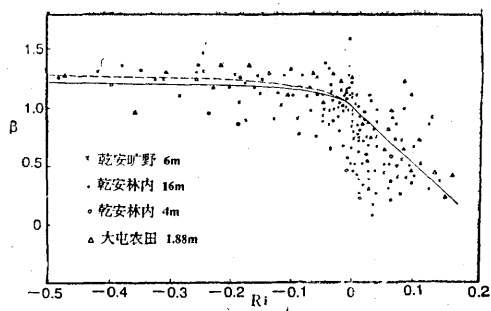
风速、温度廓线分别由积分式低阈值风速仪和热敏电阻温度表测量,风速廓线测量高度为1.1,1.3,1.5,1.9,2.3,2.8m,温度廓线观测高度为0.5,0.73,0.88,1.32,1.48,2.23m,另外在2.2m高处还装了DAT-300型日产超声风速仪,记录采用模拟磁带机记录。

四、结果分析

结果见附图所示。图中 $Ri < 0$ 边的实线是由(9)式和(16)式算出 ξ 后,再代入(12)式得到 φ_m 值,然后再由(23)式计算出 β 而点绘出来的;而虚线则是由(9)式和(16)式算出 ξ 后,代入(12)式得到 φ_m 值,然后再由(24)式计算出 β 值与 Ri 值在图上点绘的。而在 $Ri > 0$ 时, Ri 与 β 的对应曲线,是由(9),(19),

(17)式分别计算出 Ri , ξ 和 φ_m 后再代入(26)式,计算出 β 值与 Ri 点绘的。图中各种符号点是采用乾安防护林内,乾安旷野点和北京大屯农田中,三个不同地表粗糙度条件,四个不同高度所取得的实测资料,应用(21),(22)式计算值点绘出来的。

从附图中可看出, β 值的变化范围在0.20至1.56之间,并且三个不同粗糙度地表面,四个不同高度的 Ri 与 β 的点聚图、基本与Businger的理论曲线相吻合,但总的来讲离散较大。在近中性及弱稳定层结时,结果还表明,防风林中16m处的 β 值,偏小于Businger



理论曲线较多,并且离散性也较大。这是因为在此高度处,由于气流绕过林带而形成风速大值区,以及近中性本来热力作用就近于零,所以,在此高度处动力形成的影响大于热力影响,故形成了 β 值随 Ri 变化不敏感和离散性较大。但是,在高度低时,层结的影响相对于风切应力来说本来就小, Ri 的绝对值也小,故表现出 Ri 与 β 相关较好。总的来讲,整个实测 β 值随着稳定度增大而逐渐减小,当从中性变为稳定时, β 值出现迅速递减,并且高度越高递减越快。从(23)和(24)式及附图中可见,当 $\xi \rightarrow -\infty$ ($Ri \rightarrow -\infty$)时, $\varphi_m \rightarrow 0$,则 $\beta = 5/4$ 或 $4/3$ 。

在过去近地面层廓线结构研究中, Ri 是作为一整体参数来考虑的,而风廓线曲率不过是在整体热稳定性短暂影响下讨论的。这方面的研究可在近地面层中,相对小的高度内讨论局地 β 值与 Ri 的关系。这就是说,在近地面边界层中,可以把 Ri 作为检验廓线结构的有效参数,即 β 值是一个随高度变化的整体参数。

结果还表明,研究近地面层风速廓线与稳定度的关系时,采用 β 比 φ_m 物理意义更清楚,并且(23)式更实用。在近地面层中,同样也可推广到对温度和湿度廓线的理论检验。

五、结论与讨论

(1) 采用 Ri 与 β 的关系来研究近地面层通量廓线关系更具有实际意义, β 随着 Ri 的变化物理意义清楚,但接近中性大气层结时

关系不甚明显。

(2) β 值随稳定度和高度而变化, 本文结果变化范围为0.20至1.56。当大气层结从中性到稳定时, β 值出现迅速递减, 并且高度越高, 递减速度越快。这是由于热力影响随高度增加而减弱, 还是由于地表条件的影响, 有待进一步研究。

(3) 本文结果与Businger理论公式结果相吻合, 但离散性较大。

参 考 文 献

- (1) Businger, J.A. et al., Flux-profile relationships in the atmospheric surface

layer, J Atmos. Sci., 23, pp.181—189, 1971.

- (2) Viswanadham, Y., Examination of the empirical flux-profile models in the atmospheric surface boundary layer, Boundary Layer Meteorol., 22, pp.61—77, 1982.

- (3) Lettau, H.H., Wind and temperature profile prediction for diabatic surface layer including strong inversion cases, Boundary Layer Meteorol., 17, pp. 443—464, 1979.

- (4) Dyer, A.J., A review of flux-profile relationship, Boundary Layer Meteorol. 7, pp. 363—372, 1974.

The relationship between Richardson Number and the curvature of wind profile

Liu Shuhua

Zhang Aichen

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

In this paper, values of Richardson Number (Ri) and the curvature of the wind profile (β) in the atmospheric near to the ground are calculated with the data obtained under three surface roughness conditions. The results show that the values of Ri and β appear scattering but agreeable over farmland, grassland and at the height to the middle of the tree within the forest-net, and the values are obviously smaller at the height twice of the tree within the forest-net as well as in the stable stratification.