

植被内部的风速分布规律和湍流交换特性

刘树华

(北京大学地球物理系)

提 要

本文采用自制的热线微风仪在小麦冠层中观测到的风速梯度资料,对植被内部的风速廓线分布规律及湍流交换特性进行了研究。结果表明:植被内部风速分布及湍流交换系数较好地符合指数律分布。指数形式为: $u(z) = u(H) \exp[\alpha_1(z/H) - 1]$; $K_m(z) = K_m(H) \exp[\alpha_2(z/H) - 1]$ 。 α_1, α_2 值并与其他学者所得结果进行了比较。

前 言

植被内部的风速分布规律和湍流交换特性支配着植被层内动量、热量、质量的交换。对作物的生长发育有着密切关系,是农业生产潜力研究的基础工作之一。近年来人们对此产生了浓厚的兴趣并对其进行了观测及模拟研究,得到了一些有益结果^{[1]—(11)}。因冠层内风速廓线的测量对仪器精度、型体要求较高,所以,目前我国对冠层内风速廓线的精确测量结果还不多。本文采用自制的热线微风仪所取得的实测资料,分析探讨了在我国华北地区典型麦田植被内部风速分布

的基本规律和湍流交换特性及其分布模式,得到了一些有意义的结果。期望这一初步基础研究工作能为农作物播种规划设计提供一定依据。

一、场地、观测仪器及资料来源

1. 观测场地

1984年4月17日—6月8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。其中5月18—20日,6月5—8日,在小麦抽穗和灌浆期配合联合观测进行小麦冠层内风速廓线的观测。

观测场地开阔、平整。试验期间在主导风向(SW)上,有大于600m的“来流路径”。可供装设在作用面以上高达4m的各类仪器作梯度测量,并保证其数据的代表性。小麦冠层内风速廓线的测量是在距南、西麦地边缘各50m的地方进行的。

2. 观测仪器及布设

由于植被层内湍流场及空间的特性,观测仪器往往受到一定的限制。因此,风速观测仪器采用自制的热线微风仪,内阻约为 8Ω ,测量范围为 $0.1-10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,精确度可达 $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该仪器适宜于作物冠层之内的微风梯度测量。输出电压信号的动态范围为 $4.5-1.5\text{mV}$ 。其感应的电压信号通过电缆传输到观测场地以北120m处的观测室,通过转换系统,再由1905A型精密微伏级数字电压表自动采集。每小时观测一次,采样长度为10分钟,采用线路转换系统巡回观测10次,再将10组数据取平均。仪器安装高度分别为(从地面算起): $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7(0.65), 0.9(0.85), 1.1, 1.4, 1.7, 2.0\text{m}$ 。为保证数据的精确度,仪器制做完毕后,在旋臂机上进行了 $0.1-10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速范围内的检定,定出每个仪器的常数和计算公式。另外,为确保仪器的一致性,在试验场仪器安装之前,又进行了现场水平比较。水平比较试验的高度采用 1.2m ,将每个探头迎风安装,两次水平比较结果表明,相对误差一般都在 $1-3\%$ 以内。通过最近几年的野外观测实践证明,该仪器稳定可靠,精度高,使用方便。特别适用于农田植被上和冠层内的风速梯度的自动化采集。

二、结果分析

1. 植被内部的风速分布规律

在来流路径十分宽阔的农田中,研究植被内部风速的垂直分布,可以了解植株对于垂直方向动量交换影响的情况。这方面的资料在我国还较少。图1、2是麦田植被内的

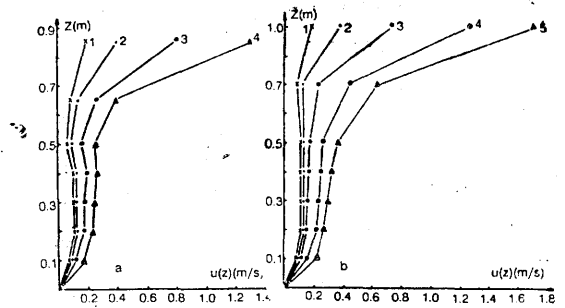


图1 小麦抽穗、灌浆期植被层内平均风速垂直分布

a. 1984年5月18—20日, b. 1984年6月5—8日

a图中1,表示 $u(h)\leq 0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 2, $u(h)0.31-0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 3, $u(h)0.51-1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 4, $u(h)1.01-2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

b图中1,表示 $u(h)\leq 0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 2, $u(h)0.31-0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 3, $u(h)0.51-1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 4, $u(h)1.01-1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 5, $u(h)1.51-2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下各图同

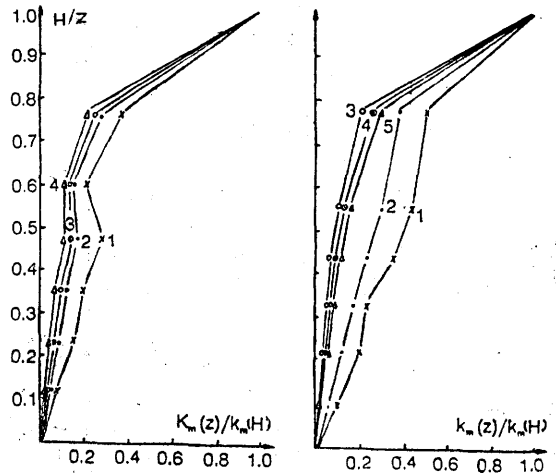


图2 小麦植被层内归一化平均风速垂直分布观测结果。

由图1、2可见,小麦植被层内的风速垂直分布,无论是抽穗期还是灌浆期,均呈“S”型分布。这种分布规律纯系作物本身的结构所形成。这是由于在作物植被中部,植株要素(叶、茎、干等)吸收了风的运动能量。因此,风速随高度的变化在植被内的上半部,风速削减迅速,而在下半部则较缓慢,甚至近似为常数。

从理论上探讨植被内风速分布的规律,许多人都在进行研究,一般模式⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁶⁾为:

$$\partial \tau / \partial z = C_M(u) a(z) u^2(z) \quad (1)$$

$$\tau(z) = K_m \partial u / \partial z \quad (2)$$

式中 τ 为湍流剪切应力 ($-\overline{u'w'}$)； $C_M(u)$ 为作物阻力系数； $u(z)$ 为平均风速； $a(z)$ 为叶面积密度； K_m 为动量交换系数。

由方程 (1) (2) 消去 $\tau(z)$ ，得

$$\frac{\partial K_m}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + K_m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_M(u) a(z) u^2(z) \quad (3)$$

假定 $C_M(u)$ 、 $a(z)$ 及边条件 $u(h)$ 、 $u(0)$ 已知。根据普兰德-卡曼混合长理论，湍流交换系数为：

$$K_m = l^2 \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4)$$

这里根据冠层内实测风速廓线，假设湍流交换系数只与风速梯度有关，因而 (4) 式中混合长 l 在植被中取最简单形式等于常数，即得到方程 (3) 最常用的指数律公式为：

$$u(z)/u(h) = \exp[\alpha_1(z/h - 1)] \quad (5)$$

式中 α_1 为衰减系数， $\alpha_1 = \frac{1}{2} (C_M a h^3 l^2)^{1/3}$ (1)(3)(10)； h 为作物平均高度； $u(h)$ 为植被高度 h 处的风速。这是一指数风速廓线，在推导过程中做了一些假设，以致得到了一个单一参数的拟合公式。此公式之所以在多种植被中得到广泛应用，主要原因是通过适当挑选 α_1 值，能较好地描述作物植被内的风速廓线。Cionco(2)概括了多种不同植被情况，指出 α_1 的最好值通常在2至3之间。而本文所得结果见图3。

由图3可见，在小麦抽穗及灌浆期， $u(h)$ 在 $0.5-2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $0.1h < z < 0.5h$ 范围内， α_1 值均在 2 ± 0.5 之内。而在 $z > 0.5h$ 以后 α_1 值衰减较快，其值大于其他作者(1)(2)所得结果。这是由于所观测场地的小麦较密植，上部叶子稠密，致使风速急剧衰减所致。同样有人在森林以及玉米植被中观测到类似结果(11)。而在 $u(h) \leq 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $0.1h < z < 0.5h$ 时， α_1 值小于2，所以当风速小

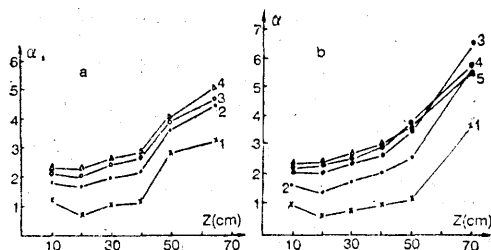


图3 植被层内平均风速衰减系数 α 的垂直分布

时，由于作物植株阻碍动量传递的比重就小。

2. 植被内的湍流交换系数

植被内湍流交换系数的大小表征着湍流运动的强弱，它在能量与物质的交换中起着重要作用。也是农业生产潜力研究的基础工作之一。在植被中物质、能量和动量的交换能力，主要来源于植被以上大气中的湍流输送(6)(9)(10)。由图4可见， $0.1h < z < 0.6h$ 范围内，植被中风速廓线近似为中性大气的对数分布规律。从而受到启发，此处湍流运动主要取决于动力因子，所以湍流交换系数 $K_m(z)$ 可看成与湍流特征速度以及湍流特征长度成正比。湍流特征速度自然选为 u_* ，长度自然选为高度 z ，即：

$$K_m(z) = (\text{特征速度}) \times (\text{特征尺度}) = K u_* z = l(z) u_* \quad (6)$$

式中 K 为卡曼常数，取为0.4； u_* 是摩擦速度； l 为混合长度。另外，考虑到植被层以上风速的影响， l 除与 z 有关外，还与零平面位移 d 有关，即

$$l(z) = K z (1 - d/h) \quad (7)$$

然而由混合长法

$$K_m(z) = l^2 \partial u / \partial z = l(z) u_* = K^2 z (1 - d/h) \cdot u(z) / \ln[(h-d)/z_0] \quad (8)$$

式中： $u_*(z) = \frac{K u(h)}{\ln[(h-d)/z_0]} e^{-\alpha_1(z/h-1)}$ ； $d = 0.6h$ ； $z_0 = 0.1h$ 。

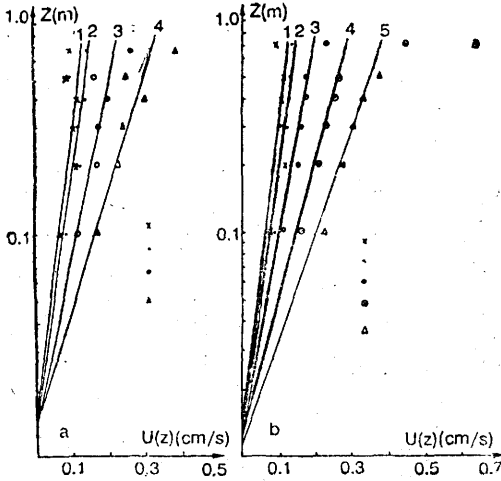


图4 植被层内平均风速廓线的对数垂直分布

动量交换系数的垂直分布见图5。首先由图5可看出, K_m 的值要比近地面层中的值小1—2个数量级。由此可见植被内部的动量交换是较小的。还可看到 $u(h)$ 较大时, 动量交换不一定就强, 这主要是当 $u(h)$ 增加到一定程度时, 植株的茎叶会对动量交换形成较强的阻碍作用。由图5可看出, K_m 在不同生长时期, 垂直分布是不同的, 并且随着 $u(h)$ 的变化也不同。在抽穗期, 60cm 以下, $u(h) < 0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 K_m 最大, $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1} < u(h) < 0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时最小。并且, 在 $40\text{cm} < z < 60\text{cm}$ 之间 K_m 都随高度递减。这可能是此时, 小麦有生命力的植株叶子都集中在这个部位, 阻碍了动量的传递。在灌浆期, 由于植株上部叶子比较稀疏, 故动量上下交换较畅通。但也存在 $u(h)$ 在 $0.31\text{—}0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $z < 40\text{cm}$ 时, K_m 大于图中任何 $u(h)$ 时的值的现象, 而且出现 $u(h)$ 在 $0.51\text{—}1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, K_m 的垂直分布大于 $u(h)$ 在 $1.01\text{—}1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的现象。并且在 $u(h)$ 为 $0.31\text{—}0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $z > 40\text{cm}$ 时, K_m 的垂直分布均大于 $u(h)$ 在 $0.51\text{—}1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $u(h)$ 为 $1.01\text{—}1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的值。由此可见, 植被内部动量的交换与 $u(h)$ 密切相关, 但 $u(h)$ 大, 不一定就动量交换

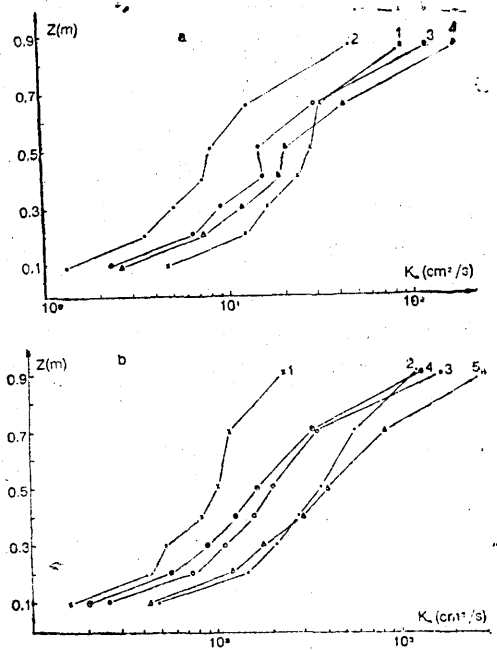


图5 植被层内平均湍流交换系数 K_m 的垂直分布

强。

由图6 植被层内归一化平均湍流交换系数的垂直分布可看出, 交换系数在植被上层

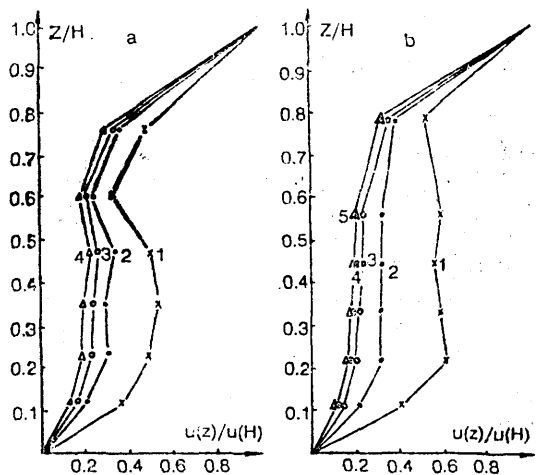


图6 植被层内归一化平均湍流交换系数的垂直分布

急剧衰减, 而从 $0.75h$ 处开始向下则变化缓慢。人们在不同种类的植物群落结构中, 也同样观测到这种趋势^[11]。由本文结果可拟合出 $K_m(z)/K_m(h)$ 具有指数关系:

$$K_m(z)/K_m(h) = \exp(\alpha_2(z/h) - 1) \quad (9)$$

有人指出在稻科植被中, α_2 值在2—3之间(1)。在叶密度大的植被中也曾有人指出 $\alpha_2 > 3$ 。

在 $0.1h < z < 0.5h$ 范围内, 在小麦抽穗期, 当 $u(h) \leq 0.3m \cdot s^{-1}$ 时, α_2 值近似等于2.0, 当 $u(h)$ 为 $0.31-0.5m \cdot s^{-1}$ 时, α_2 值近似等于3.0, 而在 $u(h) > 0.5m \cdot s^{-1}$ 时, α_2 值近似等于4.0, 而在 $z > 0.5h$ 后, α_2 值迅速增大。在小麦灌浆时, 由于小麦叶子较稀疏, α_2 值随风速增大呈现从2.5—4.0范围内较均匀的增加。本文结果详见图7。

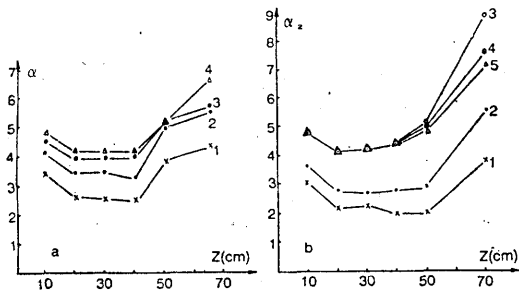


图7 植被层内平均湍流交换系数衰减指数的垂直分布

需要指出的是, 在晴朗风小的夜间, 20时到第二天06时, 经常观测到在 $0.2h < z < 0.5h$ 之间, α_2 值从低层至高层逐渐减小的现象。这是由于夜间, 冠层顶部由于长波辐射, 气温逐渐降低达到最低温度。此时, 冠层上面的空气是稳定的。但由于冠层以下土壤在白天是能量“汇区”, 贮存了大量的热量, 在风速小的夜间就成了能量的“源区”而向冠层中施放热量。故此, 冠层中是不稳定的, 从地面向冠层顶部稳定度逐渐加强, 即导致了 α_2 值随高度减小。

三、结论与讨论

综合以上结果可初步认为:

1. 在来流路径宽阔的麦田中, 植被内部风廓线和湍流交换系数可采用指数律公式描述:

$$u(z)/u(h) = \exp[\alpha_1(z/h) - 1]$$

$$K_m(z)/K_m(h) = \exp[\alpha_2(z/h) - 1]$$

2. α_1, α_2 值比Raupach(1), Cionco(2)等人在其他作物植被内所得值偏大, 但与Legg(6)同样在小麦植被中所得值一致性较好。

3. 从本文所得结果表明, 利用自制的热线微风仪, 测量作物冠层内的风速廓线是可行的, 其精度也达到要求。只是本次试验观测中未能配合观测冠层内的温、湿度及 CO_2 廓线, 因此, 对冠层内的热力结构及质量分配不能作进一步的研究。

4. 如何正确地建立植被内风速廓线和湍流交换系数模式, 本文推导过程中所做的假设是否合理, 有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Raupach, M. R., Thom, A. S., Turbulence in and above plant canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 13, pp 97-129, 1981.
- [2] Cionco, R.M., A wind profile index for canopy flow, *B. L. Meteor.*, 3, pp 255-263, 1972.
- [3] Cionco, R. M., A mathematical model for air flow in a vegetative canopy, *J. of Appl Meteor.*, 4, pp 517-522, 1965.
- [4] Druilhet, A. et al., Analysis of turbulent transfers in vegetation: use of theron for measuring the diffusivity profiles, *B. L. Meteor.*, 2, pp 173-187, 1971.
- [5] Cionco, R.M., Intensity of turbulence within canopies with simple and complex roughness elements, *B. L. Meteor.*, 2, pp 453-465, 1972.
- [6] Legg, B. J., Turbulent diffusion within a wheat canopy, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101, pp 597-610, 1975.
- [7] Thom, A. S., Momentum absorption by vegetation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 97, pp 414-428, 1971.
- [8] Oliver, H. R., Wind profiles in and above a forest canopy, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 97, pp 548-553, 1971.
- [9] Inoue, K and Uchijima, Z., Experimental study of microstructure of wind turbulence in rice and maize canopies, *Bull. Natl. Inst. Agric. sci. ser. A*, 26, pp 1-51, 1979.
- [10] Monteith, J. L., Principles of environmental physics, Edward Arnold, 1973.
- [11] 尹协远, J. D. Lin, 植被内部及其上方湍流场的数值模拟, *气象学报*, Vol.46, No. 2, pp 194-201, 1988.

Mean wind profiles and turbulent diffusivity profiles within a wheat canopy

Liu Shuhua

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

In this paper, the characteristics of mean wind profiles and mean turbulent diffusivity profiles within the wheat field are calculated and discussed. The results show that mean wind profiles and mean turbulent diffusivity profiles within the wheat field can be represented by an exponential function as follows:

$$u(z) = u(H) \exp[\alpha_1(z/H) - 1],$$

$$K_m(z) = K_m(H) \exp[\alpha_2(z/H) - 1].$$

The results of α_1 , α_2 are compared with that of another authors.