

植被内水平风速脉动特征

陈万隆 翁笃鸣 丁裕国

沈觉成 高家表 钱林清**

提 要

利用QDF型热线微风仪在农田植被内进行了水平风速脉动的观测。初步认为,植被内水平风速脉动具有比裸地湍流度大、脉动强度小、短周期振动强、湍流积分尺度小的特征,且随时间变化平稳,其时间结构函数基本符合“2/3”幂律($\tau \leq 16$ 秒)。

一、观测方法及符号说明

观测是在山西交城县安定和广兴二个大队进行的。观测场地分别选择在谷子田中央和附近较开阔的裸地上。所用仪器为QDF型热线微风仪,此仪器灵敏度很高,可以测定瞬时风速,且感应元件体积小,便于在植被内观测。仪器感应元件放置在谷子株高的2/3处和裸地同一高度处,观测前测定出盛行风向,使感应元件迎向盛行风向。按照指令,两处进行同步观测,每2秒钟记录一次。

虽然热线微风仪只能测量水平风速模,而不能分别测量纵向和横向的水平风速分量。但是,在湍流度 <0.4 时,顺风向速度分量脉动的方差、相关与结构函数等实际上可用水平风速模脉动的对应统计量来代替^[1]。因此,在通常湍流度不大的情况下,我们有可能利用热线微风仪在植被内对水平风速脉动的特征和微结构进行观测。

符号说明如下:

u	顺风向水平风速模
\overline{u}	平均风速
$u' = u - \overline{u}$	脉动风速
$\overline{u'^2}$ (或 σ^2)	脉动强度(或方差)

* 参加观测的还有金龙、王正泽等同志。

**山西气象局科研所。

$\sqrt{\overline{u'^2}}$	脉动风速均方差, 有时代表脉动风速
$\sqrt{\overline{u'^2}} / \bar{u}$	湍流度
γ	轮次数
α	置信度
S_u	标准化谱密度
$D(\tau) = \overline{[u(t+\tau) - u(t)]^2}$	时间结构函数
t, T	时间
τ	时间间隔
$D(\infty)$	时间结构函数的饱和值
$r(\tau)$	标准化相关函数
L, L_1 和 η	分别表示湍流积分尺度, 外尺度和微尺度
ϵ	湍流耗散率
l	横向距离
C_1, C_2, m	经验系数

二、结果分析

(一) 观测序列的平稳性

在图1中分别给出谷子田间2/3株高和裸露对照地的顺风向水平风速模的观测序列。这个同步观测结果有趣地说明了它们变化的形式并不是处处相似的。当空旷地上气流进入植被层中时, 气流不仅受到障碍物的削弱, 而且发生复杂的“畸变”。尽管如此, 两处的水平风速变化仍具有平稳的特性。为了说明其平稳性, 本文引用所谓的轮次检验法^[2]进行检验。轮次检验法是一种非参数检验法, 其方法为:

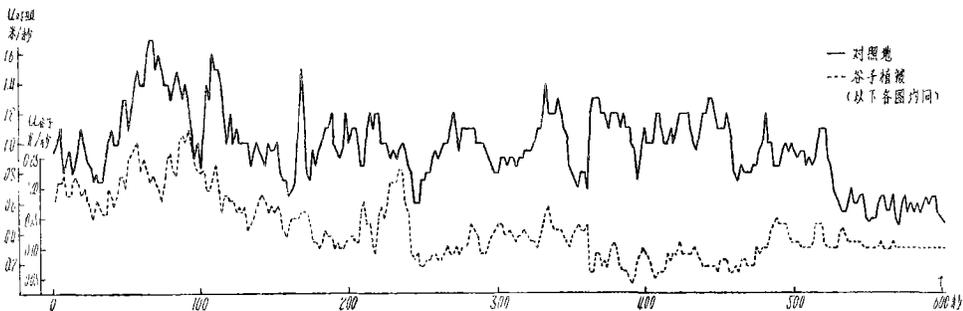


图1 谷子田号株高处和对照地上水平风速模的时间序列
(株高1.4米, 1978年8月27日下午)

对于某一时间序列等分若干段标准差距平轮次数 γ , 若落在区间 $(\gamma_n; 1-\alpha/2, \gamma_n; \alpha/2)$ 之外, 则在 α 显著水平下拒绝平稳性假设, 否则接受平稳性假设。

我们将上述的两个观测序列均划分成 k ($k=30$) 段。分别计算它们的标准差及其距平值, 连续出现正或负距平计为 1 次, 其总和即为轮次数, 由此得到

$$\text{谷子田} \quad \gamma = 13,$$

$$\text{对照地} \quad \gamma = 17.$$

根据文献[2]的轮次分布表, 当

$$\alpha = 0.05$$

和

$$n = \frac{1}{2} k = 15$$

时, 有

$$\gamma_{15; 0.975} = 10; \quad \gamma_{15; 0.025} = 21$$

因此谷子田和对照地的轮次数都落在区间 (10, 21) 之内, 表明在 10 分钟的时间间隔内两处水平风速模的变化是不大的, 各代表一个近似平稳的随机过程。瞬时风速的平稳性恰好说明它的脉动风速随时间变化同样是平稳的。

在微气象观测中引用轮次检验法判断气象要素时间序列的平稳特征具有实际意义。因为这种方法比参数检验法简便得多, 能及时提供信息。

(二) 湍流度特征

湍流度 $\sqrt{u'^2} / \bar{u}$ 表示水平脉动风速均方偏离程度。表 1 统计了谷子田和对照地时间长度为 20 秒的湍流度的频数分布。由表可见, 谷子田较大的湍流度出现的频数比对照地大, 而较小的湍流度出现的频数比对照地小。从湍流度的平均情况来看, 谷子田平均值为 0.122, 而对照地为 0.113。这些说明了谷子植被内湍流度比裸地要大的事实。

表 1 谷子田和对照地湍流度频数分布的比较

湍流度 测点	0.30~0.25	0.24~0.20	0.19~0.15	0.14~0.10	0.09~0.05	<0.05	总计
谷子田	1	3	7	11	5	3	30
对照地	0	1	5	15	7	2	30

植被内水平风速脉动的大小在一定程度上依赖于外界风场。图 2 表示 20 秒钟内谷子田脉动风速均方差 $\sqrt{u'^2}$ 与对照地 20 秒平均风速之间的关系, 二者相关系数达 0.67。由此看出外界动力性湍流是产生植被内水平风速脉动的一个比较重要的因素。另一方面, 图 2 中点子的离散情况反映出影响植被内水平风速脉动的还有其他原因, 如热力性

湍流作用的影响等。

我们不难发现，湍流度的大小还与统计的时间长度有关系。图3表示了谷子田和对照地在不同的时间长度下湍流度的变化情形。由图3可见，谷子田的湍流度随统计时间的增长而波动地增大，而对照地的湍流度随统计时间的增长很快地稳定下来，并且在200秒左右谷子田湍流度由开始比对照地小转为比对照地大。对于8分钟的平均时间间隔，谷子田湍流度为0.42，而对照地为0.21。植被内湍流度大是一普遍现象。斋藤等在玉米（平均株高为3米）田间1米高度处计算的湍流度比3.2米高度处约大0.19^[3]。但是脉动强度 $\overline{u'^2}$ 则相反，植被内比对照地要小得多。我们计算出谷子田的脉动强度只有

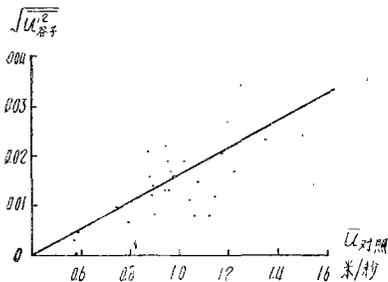


图2 谷子田水平脉动风速与对照地平均风速的相关联系

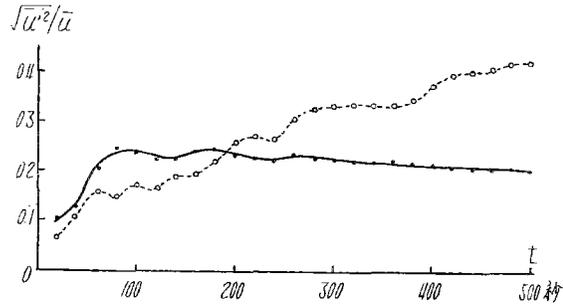


图3 湍流度与统计时间的关系

对照地的4.8%。另外我们在清种玉米地中也观测到类似的结果。图4表示深入玉米地4米处的脉动强度 $\overline{u'^2}$ 与裸地脉动强度 $\overline{u_0'^2}$ 比值的铅直分布，它反映了玉米地中相对脉动强度 $\overline{u'^2} / \overline{u_0'^2}$ 自植株顶部向下迅速递减的特征。这个铅直分布特征在很大程度上取决

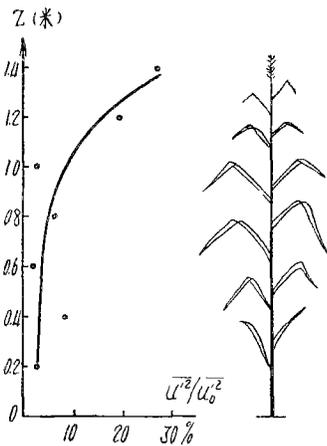


图4 清种玉米地相对脉动强度 $\overline{u'^2} / \overline{u_0'^2}$ 的铅直分布

($\overline{u'^2}$ ——玉米地脉动强度， $\overline{u_0'^2}$ ——裸地脉动强度，株高1.45米，株行距为0.3米×0.5米，交城广兴大队，1978.7.5.上午)

于植物群落的结构。可以认为，凡是叶面积密度大的层次相对脉动强度就小，反之叶面积密度小的层次相对脉动强度就大。

(三) 谱特征

作者根据吐开(Tukey)的谱估计方法^[4](并作了矩形滑动平均)对谷子植被内和对照地的水平风速模进行了谱分析。图5描绘了谷子田和对照地两处功率谱的高频部分曲线。计算时采用的数据是原始的,并未加以滤波处理。这样做的好处是可以看到能量随波长衰减的情况。计算结果说明,湍流能量随着脉动波长的减小而迅速变小。谷子田的湍能小于对照地,尤其在低频(长周期)部分。

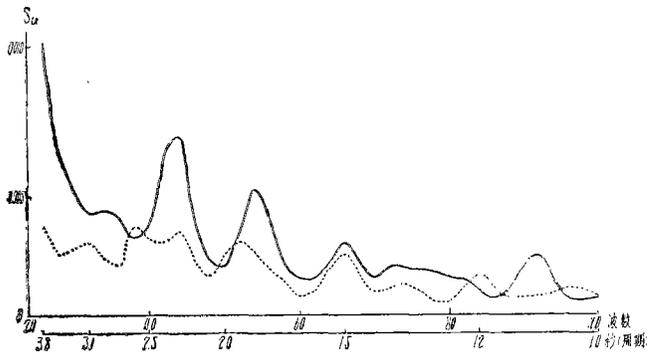


图5 谷子植被内和对照地水平风速的标准化谱密度随波数(或周期)的分布(短周期部份)曲线

图5揭示出一个有意义的现象,即在短周期(约2~3秒)振动部份植被内出现三个波峰,分别在波数为32、38和44处(相当周期约3.1、2.6和2.3秒),而对照地只有一个明显的波峰,出现在波数为44处(相当周期约2.3秒)。这就是说,当外界较大尺度的湍涡输送到植被中时,由于植物茎叶的割裂作用,将被破碎成尺度更小的湍涡,从而引起高频(短周期)脉动增强的现象。这可能就是植被内湍流度增大的物理成因之一。至于2秒以内的峰值是不够可靠的,因为这些时间间隔已经小于观测的时间间隔。

(四) 湍流积分尺度

湍流积分尺度的定义为

$$L = \overline{u} \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau \quad (1)$$

$\int_0^{\infty} r(\tau) d\tau$ 采用面积积分法计算。

根据(1)式计算得到谷子植被内湍流积分尺度为9.91米,裸地上为24.84米。前者的湍流积分尺度约为后者的0.4倍。

(五) 时间结构

按局地各向同性湍流理论,当雷诺数充分大时,不可压缩流场存在一个惯性区间,其运动特征只取决于湍流能量耗散率 ϵ ,速度场的横向结构函数遵从“2/3”幂律:

$$D(1) = 1.59(\epsilon l)^{\frac{2}{3}} \quad L_1 \gg l \gg \eta \quad (2)$$

并且在湍流度不太大的平稳流场中，近似地可用时间结构函数代替空间结构函数（即在（2）中用 $\overline{u \cdot \tau}$ 代替 l ）^[5]。换言之，此时的时间结构函数也应服从“2/3”幂律。

时间结构函数可以表示为^[6]

$$D(\tau) = D(\infty) [1 - r(\tau)] \quad (3)$$

在平稳流场里有

$$D(\infty) = 2\sigma^2 \quad (4)$$

这里 σ^2 应为总体方差。计算时以10分钟间隔的样本方差近似代替。

根据时间结构函数的定义，不难证明：

$$\overline{[u(t+\tau) - u(t)]^2} = \overline{[u(t+\tau) - \overline{u(t)}]^2} + \overline{[u'(t+\tau) - u'(t)]^2}$$

而在实际的平稳流场里， $\overline{[u(t+\tau) - \overline{u(t)}]^2}$ 应等于0或近似为0，所以在平稳流场而且湍流度较小的情况下，水平风速的时间结构函数代表了水平风速脉动的时间结构函数。

图6 绘制出植被内外 $\frac{D(\tau)}{D(\infty)}$ 的计算结果。两处的时间结构函数只有在16秒内才能较好地满足“2/3”幂律，即

$$\left. \begin{aligned} D(\tau) &= C_1 \tau^m \\ r(\tau) &= 1 - C_2 \tau^m \end{aligned} \right\} \tau \leq 16 \text{ 秒} \quad (5)$$

其中 $m = \frac{2}{3}$ ，谷子植被内 $C_1 = 0.00029$ 及 $C_2 = 0.05$ ，裸地上 $C_1 = 0.0101$ 及 $C_2 = 0.084$ 。对于 $\tau > 16$ 秒的情况，两处的 m 值与“2/3”发生一定的偏离。斋藤等在确定（5）式中的 $r(\tau)$ 时得到的平均 m 值也是有趣的（表2），说明可能在株高的2/3以上水平风速的时间结构符合“2/3”幂律。这个现象值得进一步通过大量观测作出验证。

表 2 m 和 T 的平均值(据文献[3])

高度(米)	\overline{m}	\overline{T} (秒)
3.2	2.2/3	37
2.0	1.8/3	18
1.0	2.9/3	15

注： \overline{T} 为自相关函数变为0的平均最小时间

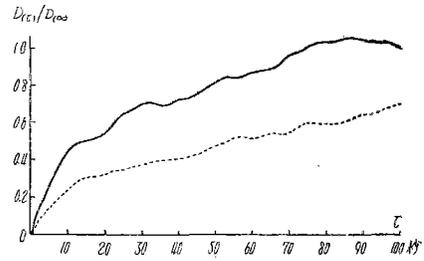


图6 谷子植被内和对照地水平风速的 $\frac{D(\tau)}{D(\infty)}$ 随 τ 的分布曲线

根据(2)式并代入 $l = \overline{u} \cdot \tau$ 以及(5)式的结果,可以粗略估算湍流耗散率 ε 。计算结果,谷子植被内的 ε 为裸地上的3.5%。

三、小 结

通过以上初步观测,发现植被内水平风速脉动在10分钟间隔内与裸地上一样是平稳的,同时植被内水平风速的时间结构在 $\tau \leq 16$ 秒内符合“2/3”幂律,也与裸地上相似。

但是,植被内水平风速脉动还具有一些与裸地上不同的特征,即湍流度大(8分钟间隔的湍流度达0.42,为对照地的2倍),湍流强度小(脉动强度为对照地的4.8%),湍流积分尺度小(为对照地的0.4倍)以及短周期脉动增强等现象。

植被内 $\sqrt{\overline{u'^2}}$ 与裸地平均风速具有一定正相关。

另外需要指出,采用热线微风仪在植被中进行水平风速脉动观测虽然有一定可取之处,然而目前这种仪器仍需要很多人工操作,而且记录很不方便,因此需要大加改进。

参 考 文 献

- [1] 陈家宜,湍流大气中水平风速涨落的相关,气象学报,第33卷第4期,1963。
- [2] J. S. Bendat 等著,凌福根译,随机数据分析方法,国防工业出版社,1976。
- [3] Saito, T. etc., Investigation of Turbulence within a Crop Canopy, J. Agri. Meteor., Japan, Vol. 25, No. 4, 1970.
- [4] Byrom P. Harper, Energy spectra of 500mb meridional circulation indices, J. Meteor., Vol. 18, No. 4, 1961.
- [5] 陈家宜等,对流层下部的湍流微结构,气象学报,第33卷第2期,1963。
- [6] [苏]卡扎凯维奇著,章基嘉译,随机函数论原理及其在水文气象学中的应用,科学出版社,1974。

Characters of the Pulsation of Horizontal Wind in a Crop Field

Chen Wanglong, Weng Duming, Ding Yuguo
Shen Juecheng, Gao Jiabiao, Qian Linqing*

ABSTRACT

Observation has been made of horizontal wind pulsation beneath the canopy of crop by using the QDF hot-wire microanemometer. It is shown that the pulsation has greater turbulivity, more intense short-period oscillation, less pulsation intensity and smaller turbulent integral scale than that in a field without vegetation. It is also found that the pulsation observed varies steadily with time and its structure function of time may approximately be expressed as

$$D(\tau) = 2.9 \times 10^{-4} \tau^{2/3}, \quad \tau \leq 16 \text{sec}$$

*The Weather Bureau of Shaanxi Province.