

# 关于植被中湍流的研究\*

尹 协 远

中国科学技术大学近代力学系, 合肥 (邮政编码230026)

**提要** 本文从实验和模式理论两个方面介绍了近年来在植被湍流研究方面的进展。实验研究表明, 植被内湍流是高度间歇性的, 大尺度涡在湍流输运中起主导作用。植物枝、干、叶打碎了大尺度涡, 产生的迹湍流中的小尺度涡更容易耗散成热。因此, 植被内能量不按一般的能量级串理论预示的方式进行, 而要发生所谓“短路”现象, 使得功率谱曲线的斜率在惯性区比  $-2/3$  律更负。现有的高阶封闭模式虽然取得了很大成功, 但在模拟湍流强度上高估了其大小, 还需根据实验加以改进。

**关键词** 森林气象学; 植被; 湍流模式; 湍流

## 1 引言

森林和耕地约占地球表面积的15%, 形成宽广的植被。广大植被的存在对全球或地区性气候有重要影响。研究地-气相互作用不能不研究植被的重要作用, 植被蒸腾散热与水面放出的热量大致相同甚至更大, 植被还吸收  $\text{CO}_2$ , 向大气输送氧气。现在大家都很关心温室效应, 大气中  $\text{CO}_2$  增加的一个重要原因是森林遭受大量砍伐。了解大气和植被之间的动量、热量和质量交换过程是生态学、环境科学、水文气象学等共同关心的课题。而植被内部及其上方湍流结构对这些输运过程有着本质的重要性。因此, 植被湍流的研究是一项基础性工作。本文着重介绍自 Raupach & Thom (1981) 评述性文章发表以来植被湍流研究方面的进展。

## 2 实验研究

实验研究是研究植被湍流的一种基本手段。只有通过系统的测量才能得到丰富的数据, 加深对植被内湍流流动的了解, 在此基础上建立或改进理论模型才能成为可能。所以, 国外一直非常重视实验数据的积累。在60, 70年代实验多以测量水平风速的铅直剖面 and 水平剪应力为主, 不能满足验证或改进理论模型的需要。近年来发表的一些实验(表1), 可以提供的湍流信息大大丰富了, 除了平均风速外, 尚能给出湍谱和其他高阶矩的结果。

下面以 Baldocchi 等人 (1988) 最近发表的对落叶林和杏园测量的结果为主, 参照其他一些实验, 将植被湍流的一些主要特征叙述如下。由于植被种类千变万化, 从高大的森林到矮小的农作物, 测量结果也将各不相同。以下的叙述希望能反映出植被湍流的共性。

\* 国家自然科学基金资助项目。

表 1

研 究 者	植 被 种 类	备 注
Landsberg & James (1971)	云 杉	仅平均风速
Kalma & Stanhill (1972)	桔 林	仅平均风速
Shaw et al (1974a)	玉 米 地	
(1974b)	森 林	
Seginer et al (1976)	人 造 模 型	
Finnigan (1979)	麦 地	
Wilson et al (1982)	玉 米	
Raupach et al (1986)	人 造 模 型	
Anderson et al (1986)	落 叶 林	
Baldocchi & Hutchison (1987)	杏 园	功率谱, 相干性, 相角
Baldocchi & Meyers (1987)	落 叶 林	平均风, 水平剪应力, 湍流度, 偏离度和峭度, 象限条件抽样功率谱, 协谱, 相干性等
(1988)		
Amiro & Davis (1988)	黑 云 杉 林	风速, 湍流度, 功率谱, 偏离度峭度, 时间尺度, 长度尺度等

2.1 水平风速和剪应力 典型的流向风速的铅直变化如图 1 所示, 可以看出有 3 个显著特点。

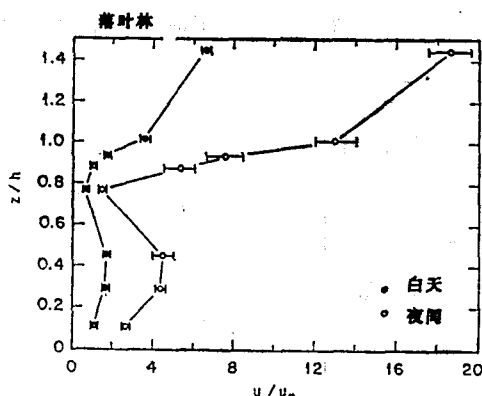


图 1 无量纲水平风速  $u/u_*$  的铅直变化,  $u_*$  为摩擦速度

①在森林上层 ( $0.8h$ 以上), 存在有强的水平剪切流动。由于这种森林在  $0.8h-h$  之间的叶面积占了总叶面积的约70%, 浓密的树叶强烈地吸收了平均风的切向动量。在  $1.45h$  处的动量约有 90% 在  $0.8h-h$  之间被吸收掉。尽管其他植被的叶面积分布可以不同, 但从冠层顶至叶最浓密处之间存在一个大的速度剪切却是共同的。

②在植被下层躯干处,  $0.5h-0.3h$  之间存在一个显著的风的第二极值, 这种逆梯度输运现象对标量和热的输运也存在, 是许多研究者关心的内容。

③风速剖面在白天和夜间很不一样, 这是由于夜间大气边界层稳定度增加, 抑制了森林内部和上方的湍流活动。夜间的稳定性也减小了剪应力, 使摩擦速度  $u_*$  减小, 在给定风速条件下使  $u/u_*$  增大。由此看来, 大气边界层的稳定性虽然对低矮农作物影响可能不大, 但对高大林木的影响却是重要的。

图 2 是水平剪应力  $\overline{u'w'}$  的变化, 对照图 1 可见, 在  $0.8h-1.0h$  之间存在大的水平剪

应力。再往森林下部，水平剪应力缓慢减小，数值很小。

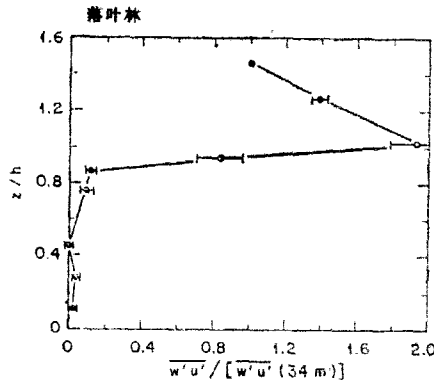


图2 水平剪应力  $\overline{w'u'}/[\overline{w'u'}(34m)]$  的铅直变化

2.2 湍流度 图3a是落叶林中铅直速度分量的湍流度( $i_w = \sigma_w/\bar{u}$ )， $\sigma_w$ 是标准偏差。从冠层顶往下，湍流强度增大，在0.8h处有极大值；在0.8h—0.4h之间湍流强度减小；0.4h以下，白天增大而夜间减小。两个水平分速的湍流强度 $i_u$ 和 $i_v$ 与 $i_w$ 类似，但强度要比 $i_w$ 大些，这是因为接近地面时铅直涡的尺度受到了限制。湍流强度的最大值白天为1左右，夜间为0.5—0.8，这与夜间大气稳定度增加抑制了湍流活动的结论是一致的。

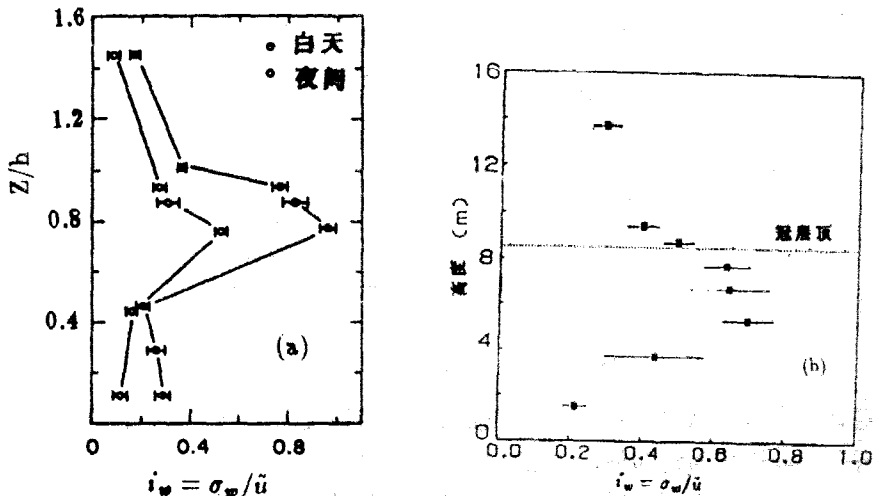


图3 湍流度 ( $i_w = \sigma_w/\bar{u}$ ) 的铅直变化

(a) 落叶林 (b) 云杉

图3b是云杉林中的 $i_w$ 分布，形状与图3a类似，但极值出现在0.6h附近，这与云杉林叶面积分布最浓密处在0.5h—0.6h之间有关。在下层躯干部也未测出湍流强度增加的情形。其他一些实验表明图3的剖面形状是有代表性的，只是在强度数值上有差异，例如对玉米(Shaw et al 1974)，麦子(Finnigan 1979)和落叶松(Allen 1968)测得的极值在0.2—0.8之间，但是Wilson et al (1982)对玉米地竟测到了高达4.0的值。

2.3 湍谱 研究各类湍谱有重要意义，它一直是湍流实验研究关心的一个基本内容。通

过研究速度分量的功率谱和互谱 (cospectra) 可以了解植被内湍流尺度的有关信息以及它们对湍流运输的贡献, 从而可以指导人们去改善现有的高阶封闭模式, 因为封闭性假设或参数化常要依赖于对有关湍谱性质的了解。此外,  $\text{CO}_2$ , 水蒸气、污染、孢子和花粉等的传播, 以及热量运输等所有这些热质交换过程都同湍流扩散和耗散密切相关。研究植株所受的风载, 与研究建筑物风载一样, 也需要知道湍谱的特性。

研究植被中的湍谱最好是与普通裸地上方的表面层内的湍谱比较。表面层内的湍谱特性相对而言已了解得比较清楚了。图 4 是典型的表面层内功率谱曲线, 谱密度  $S_{ii}$  定义为

$$S_{ii}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ii}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (2.1)$$

其中  $R$  是自关联函数  $R_{ii}(\tau) = \overline{u_i(t)u_i(t+\tau)}$ 。由量纲分析和相似性论证, 表面层内谱曲线  $nS(n)/\sigma^2$  可表示成  $nz/\bar{u}$  的唯一函数, 其中  $n$  为自然频率。表面层内速度分量方差 ( $\overline{u^2}$ ,  $\overline{v^2}$  和  $\overline{w^2}$ ) 的功率谱和互谱 ( $\overline{uw}$ ) 曲线均呈土丘形, 曲线可明显看出含能区和惯性子区。在低频含能区,  $nS(n) \sim n$ 。在惯性子区, 根据 Kolmogorov 尺度律有  $nS(n) \sim n^{-2/3}$ 。  $\overline{w^2}$  的谱曲线在无量纲频率为 1 附近有一极大峰值, 它处于含能涡区内。由此根据 Taylor 冻结涡假设, 表面层内含能涡的长度尺度的典型大小为 10—2000 m。水平分速功率谱峰值的频率量级为  $O(10^{-3}—10^{-2})$ 。谱密度峰值对应的频率大小顺序为  $w > u \geq v$ 。

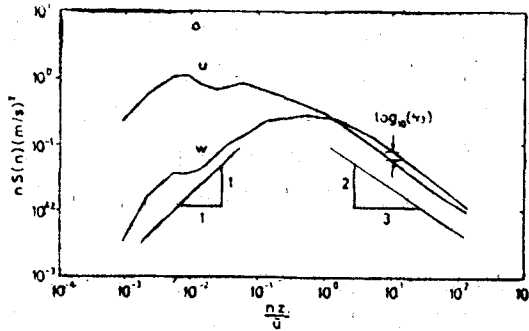


图 4 裸地上方表面层近中性时水平和铅直风速脉动的谱曲线。

植被上方测得的功率谱在曲线形状和谱峰值频率的大小顺序上都与表面层的类似。谱曲线也呈土丘形。谱峰值的波数 ( $n/\bar{u}$ ) 范围在  $0.005—0.02 \text{ m}^{-1}$  之间。由 Taylor 冻结涡假设, 相应的长度尺度在 50—200 m 之间。在惯性子区, 也基本符合  $-2/3$  次律。

但是, 在植被内部的湍谱与表面层中的却有很大差别。在植被内部无量纲频率  $nz/\bar{u}$  不是一个相似参数, 即在植被内部不同高度上测出的谱曲线, 以  $nz/\bar{u}$  为变量整理不能塌缩成一条曲线。此外, 在惯性子区内谱曲线斜率不服从由 Kolmogorov 尺度律所预示的  $-2/3$  次方, 斜率要比  $-2/3$  更负, 曲线虽然仍呈土丘形, 但显得更陡峭。图 5a 是在落叶林叶最稠密部分的铅直功率谱曲线, 横轴是波数 ( $n/\bar{u}$ )。谱密度峰值的波数在  $0.1—0.2 \text{ m}^{-1}$  之间。斜率在叶稠密度区最负, 约为  $-0.78—-1.3$ 。谱峰的对波数的大小顺序为  $w \geq u > v$ 。图 5b 是下层躯干部的谱曲线, 它的形状更复杂, 在波数  $0.01—0.02 \text{ m}^{-1}$  之间谱密度有一峰值, 大于这个波数, 谱密度迅速下降, 但在  $0.2—1 \text{ m}^{-1}$  之间, 曲线出现一个平台, 然后又急剧减小, 此区的曲线斜率仍比  $-2/3$  更负。其他植被内部(如杏园和黑云杉林)测出的谱曲线表

明, 图 5 a, b 的形状是有代表性的。在黑云杉林躯干部测得的功率谱曲线, 平台部分甚至显得稍有隆起, 形成第 2 峰值。

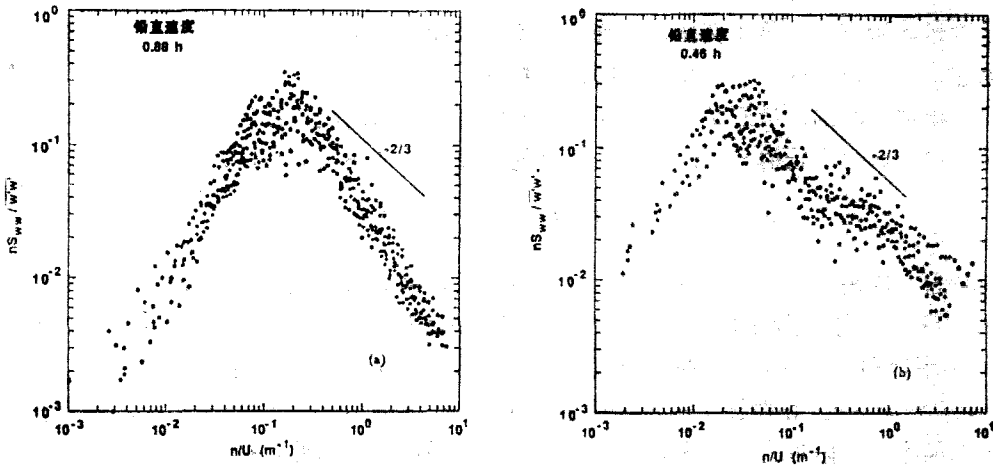
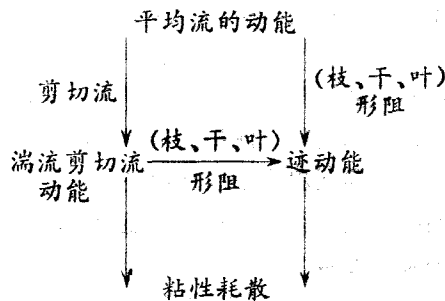


图 5 落叶林中铅直速度分量的功率谱曲线, 图中实线是由科氏局部各向同性理论预示的斜率

根据谱分析理论, 若在惯性子区  $S_{vv}/S_{uu}$  与  $S_{ww}/S_{uu}$  的比值等于  $4/3$ , 则认为湍流是局部各向同性的。已有的研究表明, 表面层内当湍流尺度减小到接近耗散区时, 湍流是局部各向同性的。但在落叶林内测得的比值在  $0.7-1.3$  之间, 一般比  $4/3$  小。其他一些测量, 如 Shaw 在玉米地中测得  $S_{ww}/S_{uu} = 0.9$ ,  $S_{vv}/S_{uu} = 0.94$ 。Baldocchi 在杏园中测得  $S_{vv}/S_{uu} = 1.27 \pm 0.04$ ,  $S_{ww}/S_{uu} = 0.77 \pm 0.03$  (在叶稠密部) 和  $S_{vv}/S_{uu} = 1.20 \pm 0.04$ ,  $S_{ww}/S_{uu} = 0.64 \pm 0.04$  (在躯干部)。这些都表明植被内部湍流是各向异性, 至少在水平分量和铅直分量之间是绝对各向异性的。

在植被内部之所以有在惯性子区不符合  $-2/3$  次律并且是各向异性的, 是因为植被内部空气与植物之间的相互作用使得湍流能量的传递不是按通常能量级串理论预示的那种方式进行。由于植株的枝、干、叶等把大涡打碎, 产生尺度较小的涡, 小涡更容易耗散成热。在叶最稠密部分, 涡的长度尺度最小。植被内部, 动能的传递方式大致可表示如下:



上表左边是表面层内通常的能量传递方式, 右边是植被内特有的动能传递方式, 在植被内部这两种方式并存。于是出现了能量传递的某种“短路”现象, 它表现为谱曲线在惯性子区有更负的斜率。

测量植被内湍谱是在同一地点不同时间序列上测量得到的, 然后再根据 Taylor 冻结涡假设换算成流向的空间谱特性, 但当湍流强度大及剪切流梯度大时, Taylor 假设不能适用。这些情况在植被湍流中都会发生。所以, 在植被内应用 Taylor 假设是成问题的。

$u'$  和  $w'$  的速度互谱定义为

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (2.2)$$

它可以分裂成两个实函数  $Co(\omega)$  和  $Q(\omega)$

$$S_{xy}(\omega) = Co_{xy}(\omega) + iQ_{xy}(\omega) \quad (2.3)$$

其中互谱  $Co_{xy}(\omega)$  是偶函数, 正交谱  $Q_{xy}(\omega)$  是奇函数。

植被内部  $u'w'$  的互谱曲线形状类似于速度分量的功率谱。植被上方谱峰值的波数约为  $0.01\text{m}^{-1}$ , 叶稠密部谱峰对应的波数为  $0.1\text{m}^{-1}$  左右。波数大于  $0.3\text{m}^{-1}$  的湍流, 虽然仍含有相当大的动能, 但对剪应力的贡献已很小。

2.4 长度和时间尺度 湍流长度尺度是湍流大小的特征量度, 时间尺度是湍流“生命”存在时间的特征量度。铅直运输的 Euler 时间尺度为

$$T_w = \int_0^{\infty} R_{ww}(\tau) d\tau / \sigma_w^2 \quad (2.4)$$

由此可计算流向和铅直长度尺度

$$L_u = \bar{u} T_w \quad (2.5)$$

$$L_w = \sigma_w T_w \quad (2.6)$$

落叶林中测得的时间和长度尺度在叶稠密处最小, 下部躯干部尺度增大(图6)。平均时间尺度为  $0.7-5.75\text{s}$ 。这要比同高度下表面层内的小得多。中性表面层内有  $T_w \sim k(z-d)/1.25 u_*$ , 若取  $u_* \sim 0.3\text{m/s}$ ,  $(z-d) \sim 20\text{m}$ , 则  $T_w \sim 26.6\text{s}$ 。植被内长度尺度约在  $0.02h-0.2h$  之间, 且  $L_u > L_w$ 。另外一些测量(Wilson 玉米, Seginer 人造模型, Amiro 云杉)表明长度尺度随  $z$  线性增大, 与落叶林中测得的规律不同, 这种差别可能与植被高矮、叶面积分布有关。

2.5 相干性 通过两点测量的速度分量的相干性研究可以了解湍流的空间结构的信息。相干性定义为

$$Coh(\omega, d, i, j) = \frac{Co(\omega)^2 + Q(\omega)^2}{S_1(\omega)S_2(\omega)} \quad (2.7)$$

其中  $i$  是速度分量指标 ( $u, i=1; v, i=2; w, i=3$ ),  $j$  是空间方位指标 ( $x, y, z$  分别对应  $1, 2, 3$ ),  $d$  是两点分开的距离,  $S_1, S_2$  是在位置 1 和 2 处相应的速度分量功率谱。图 7 是杏园中测得的相干值。在低频 ( $n < 0.01\text{Hz}$ ) 段, 相干性  $v > u \geq w$ , 但没有一个值达到 1。其中  $v$  的相干性最好, 等于  $0.6-1$ 。 $w$  的相干性最差, 仅为  $0.1-0.3$ 。这些值要比表面层中的值低得多。这是因为植被内部大尺度涡被枝干叶打碎, 使得长度尺度要比同高度上表面层

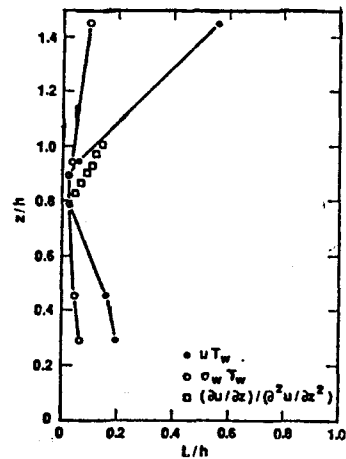


图6 水平和铅直长度尺度  $L_u = \bar{u}T_w$ ,  $L_w = \sigma_w T_w$  随高度的变化

的长度尺度小得多。致使在植被中测量的两点分开的距离与 Euler 积分长度尺度是同一量级，而表面层内两点分开的距离远小于 Euler 长度尺度。从图中可看出，分开距离增加，相干性减弱。在高频 ( $>0.1$  Hz) 时，相干性迅速降为零。

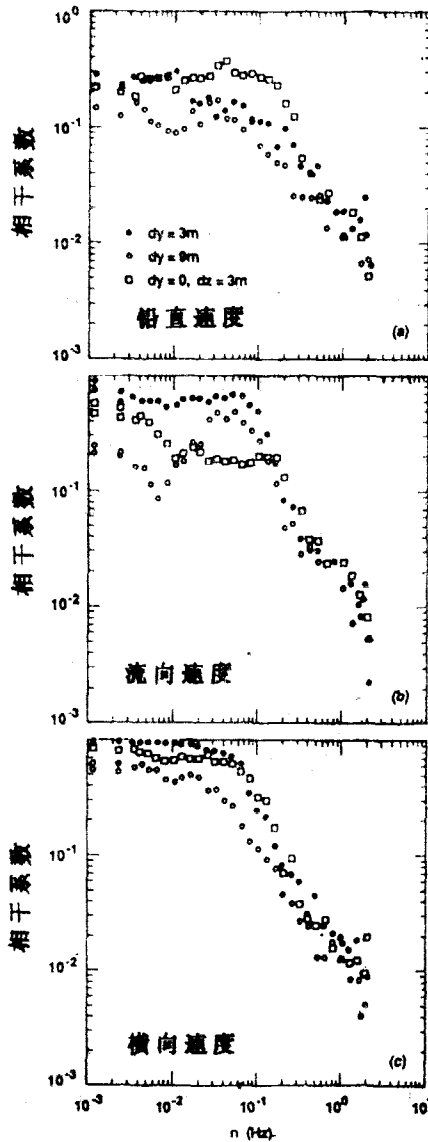


图7 三个速度分量的横向和铅直相干性

2.6 偏离度和峭度 偏离度 (skewness) 和峭度 (kurtosis) 可用来研究阵风大小对湍流的贡献。它们定义为

$$S_{k_x} = \overline{x^3} / \sigma_x^3 \quad (2.8)$$

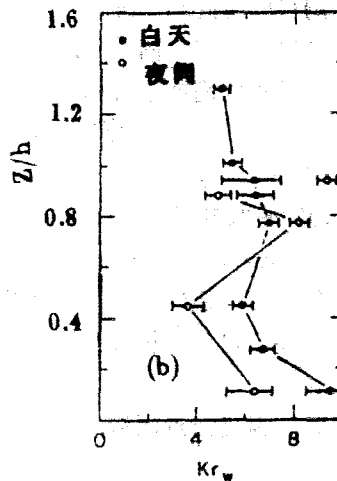
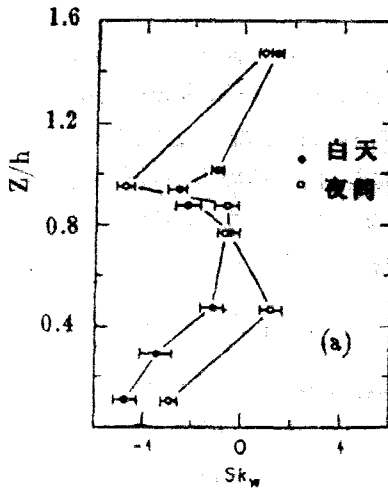


图8 铅直分速度的偏离度和峭度

$$K_{r_x} = \overline{x^4} / \sigma_x^4 \quad (2.9)$$

偏离度反映了概率密度分布的非对称性程度。测量表明，植被内部一般有  $S_{k_u} > 0$ ,  $S_{k_w} < 0$  和  $S_{k_v} \sim 0$ 。正偏离的  $S_{k_u}$  值是因为间歇阵风以大于平均风速穿透过植被往下括。负的  $S_{k_w}$  值表明，对于某一层植被而言，它的上方和下方对该层湍流贡献是不对称的。它上方的大尺度运动可以把更大的湍流强度由负的铅直涨落速度 ( $w' < 0$ ) 带给下层植被。而它下方的植

被中, 当接近地面时, 湍流强度受到抑制, 缺少相对强的向上的 ( $w' > 0$ ) 湍运动。

峭度反映了概率密度分布的平坦程度。图 8b 表明  $K_{w'}$  在下层躯干部有一极值, 这是由于大的间歇涡具有足够大的能量穿透过植被, 在  $w'$  的频率分布上大的间歇涡更占优势。

2.7 水平剪应力的象限条件抽样 近些年发展起来的条件抽样测量技术可以对湍流性质作更详尽的研究。水平剪应力的象限条件抽样是分析  $u'$  和  $w'$  乘积对总平均剪应力  $\overline{u'w'}$  的相对贡献。在  $u'-w'$  平面上 4 个象限可分为

象限 1  $u' > 0, w' > 0$ , 向外的相互作用 (outward interaction)

象限 2  $u' < 0, w' > 0$ , 喷发 (ejection)

象限 3  $u' < 0, w' < 0$ , 向内的相互作用 (inward interaction)

象限 4  $u' > 0, w' < 0$ , 扫掠或阵风 (sweep or gust)

定义一个应力比例分数

$$S_i = (\overline{u'w'})^{-1} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t)w'(t)I_i dt \quad (2.10)$$

其中  $I_i = \begin{cases} 1, & u', w' \text{ 同在 } i \text{ 象限} \\ 0, & \text{其他情形} \end{cases}$

于是  $S_1 > 0, S_2 < 0, S_3 > 0, S_4 < 0$ 。

从图 9 可见, 在植被内部和上方, 动量运输主要受大尺度运动的向下的扫掠和向上的喷发事件所支配。而且在大多数情形下, 扫掠超过喷发。切向动量的运输总是向下的,  $\overline{u'w'} < 0$ 。

除了研究各个象限内  $u'w'$  对  $\overline{u'w'}$  贡献外, 研究极端事件对  $\overline{u'w'}$  的贡献也很重要。为此, 可定义一个“网眼”值  $H$ , 当  $|u'w'|/|\overline{u'w'}| \geq H$

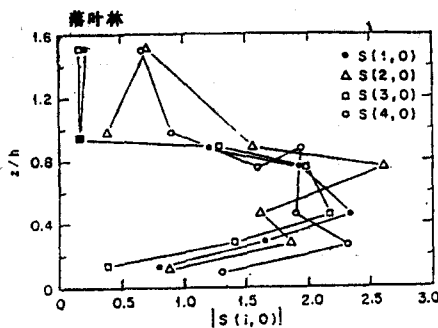


图 9 与水平剪应力有关的四个应力分数绝对值的铅直变化

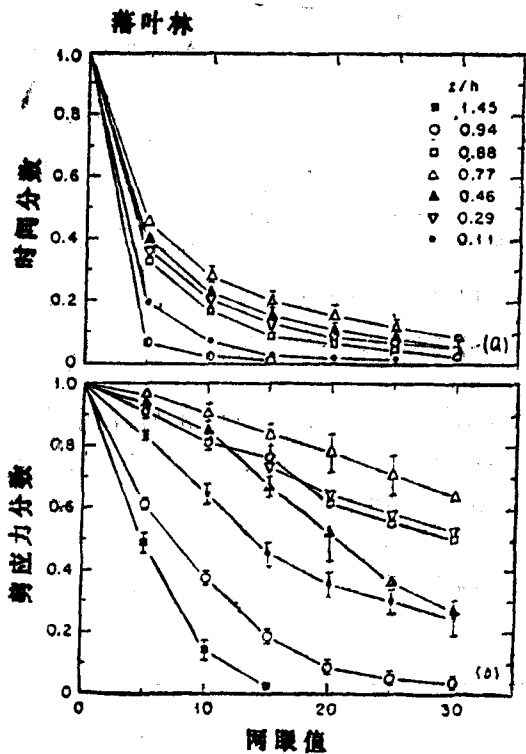


图 10 (a) 不同网眼大小时与水平剪应力有关的时间分数 (b) 不同网眼大小时与水平剪应力有关的剪应力分数

时, 表示超过某  $H$  值的剪应力与总剪应力之比。从图 10b 可发现, 在植被上方, 超过平均剪应力 5 倍的湍流事件承担了一半的动量运输。而从图 10a 可见, 超过平均剪应力 5 倍的



事件发生的时间只占总湍流事件的不到10%。在植被内部, 极端事件的贡献更大。在0.77h处, 极端事件对动量运输的贡献最大。超过平均剪应力30倍的事件发生的机会大约小于10%, 却承担了65%的动量运输。超过平均剪应力5倍的事件约占总事件的不到50%, 输运了90%以上的切向动量。这充分说明湍流运输过程大的间歇涡起着主导作用。

### 3 理论研究

在实验研究不断深入的同时, 理论研究也在继续发展。理论研究的任务主要是建立符合植被特点的湍流模式理论。在60年代, 谈镐生 (H S Tan) 等 (1963) 在开创植被湍流研究时, 为了反映气流与植被之间的相互作用, 把植被的作用看成是一个吸收平均流动量的连续分布的汇, 在平均运动方程中增加了一个所谓植被阻力项, 即相当于方程中多了一个体积力项。在定常、水平均匀、中性条件下, 平均运动方程简化为

$$-\frac{d}{dz}(u'w') = D_f, \quad D_f = C_d A_f(z) \bar{u}^2 \quad (3.1)$$

其中  $D_f$  为阻力,  $C_d$  为植被阻力系数,  $A_f(z)$  为叶面积密度 ( $m^{-1}$ )。这个方程仍旧为现在的研究者们一直使用着。虽然近来 Raupach & Shaw 和 Finign 等人企图从数学上论证, 通过对 N-S 方程先做时间平均再做空间平均, 再考虑到植被的多孔介质特性, 可以得到这个阻力项。

早期研究者多用低阶湍流模式即局部梯度假设。由 Boussinesq 涡粘性假设, 水平剪应力

$$-\overline{u'w'} = \nu_t \frac{d\bar{u}}{dz} \quad (3.2)$$

利用 (3.1), (3.2) 再加上对  $\nu_t$  和  $C_d A_f$  的已有假设, 就可解出植被内部风速  $\bar{u}(z)$  和剪应力  $-\overline{u'w'}$  的铅直分布。例如 Inoue, Cionco, Cowan 和 Landsberg 等人的表达式。但是, 如前节所述, 实验结果表明在植被内部应用局部梯度假设是有问题的。Corrsin (1974) 曾对局部梯度假设适用范围提出过一个准则。他认为如果湍流长度尺度比由速度 (或其他标量) 剖面的曲率算得的长度尺度小得多, 即  $L \ll \left(\frac{d\bar{u}}{dz}\right) / \left(\frac{d^2\bar{u}}{dz^2}\right)$ , 以及  $\left(\frac{dL}{dz}\right) / L \ll \left(\frac{d\bar{u}}{dz}\right) / \bar{u}$  成立, 则局部梯度假设适用。但在植被湍流中动量及其他标量 ( $CO_2$ , 热等) 主要受大尺度间歇涡控制, 这些量的剖面曲线的曲率是大的, 甚至会产生逆梯度输运现象。图6也表明, 在0.8h以上, 速度曲率长度尺度仅比 Euler 长度尺度大2—3倍, 而不是大1个数量级以上。因此, 植被内局部梯度假设不适用。

随着湍流高阶模式理论的发展, 植被湍流中利用高阶模式也越加普遍。目前在植被湍流

表 2

研 究 者	变 量
Wilson & Shaw (1977)	$u'^2, v'^2, w'^2, u'w', \bar{u}$
尹协远, J D Lin (1985)	$k, \epsilon, \overline{u'w'}, \bar{u}$
J Wilson (1987)	$u'^2, v'^2, w'^2, u'w', u$
Meyers & U Paw (1986)	$u'^2, v'^2, w'^2, \overline{u'w'}, \overline{w'u'^2}, \overline{w'v'^2}, w'^3, \overline{u'w'w'}, \bar{u}$



其中  $\lambda_2$  是长度尺度,  $C$  是经验常数. 粘性耗散率被认为是各向同性的, 引入第 3 个长度尺度  $\lambda_3$ ,

$$\varepsilon_{ij} = -2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{2}{3} \frac{q^3}{\lambda_3} \delta_{ia} \quad (3.7)$$

Mellor 虽然引入了 3 个长度尺度, 但他认为它们随高度变化是相似的, 这样,  $\lambda_i = \delta_i l$  ( $i = 1, 2, 3$ ),  $\delta_i$  是 3 个常数,  $l$  是同高度有关的长度尺度. Wilson & Shaw 在植被中仍旧沿用了 Mellor 的假设和 Mellor 在非植被情形下得到的常数. 仅仅在长度  $l$  的决定上利用了一个经验公式

$$\left. \begin{aligned} l &= 0, \quad \text{在 } z=0 \text{ 处} \\ \max \left\{ \left| \frac{dl}{dz} \right| \leq k, \quad l \leq \frac{\alpha}{C_d A_f} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

$\alpha$  为常数.

尹协远和林 (J D Lin) (1988) 的模型把 Hanjalic & Launder (1972) 模型应用于植被湍流. HL 模型在一个广泛的范围内表明是成功的. 它用耗散率  $\varepsilon$  的控制方程代替了 WS 模型中关于  $l$  的经验公式. 因而可望更具一般性. 在 HL 模型中压力-应变项与 Mellor 的类似, 但时间尺度  $\tau$  用  $k/\varepsilon$  表示,

$$\left. \begin{aligned} \phi_{ij} &= \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2}, \quad \phi_{ij,1} = -C_1 \varepsilon / k \left( u_i u_j - \frac{2}{3} \delta_{ijk} \right) \\ \phi_{ij,2} &= -C_2 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right), \quad P = u' w' \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

3 阶速度关联项写成 2 阶关联梯度形式

$$-u_i u_j u_k = \tau_2 \left[ \overline{u_i u_l} \frac{\partial u_j u_k}{\partial x_l} + \overline{u_j u_l} \frac{\partial u_i u_k}{\partial x_l} + \overline{u_k u_l} \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_l} \right] \quad (3.10)$$

其中时间尺度类似于 (3.5) 中压力-应变项的  $\tau_1$ ,  $\tau_2 = C_2 (K/\varepsilon)$ . 在 3 阶速度关联模化中对 4 阶速度关联项引入了高斯概率分布的假设. 粘性耗散率写成

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_a} \frac{\partial u_j}{\partial x_a} = \frac{2}{3} \delta_{ia} \varepsilon, \quad \varepsilon = \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_a} \right)^2$$

湍流小尺度涡看成是各向同性的.

从尹-林模型可看出, 他们也仅仅是直接应用了 HL 模型, 植被的作用反映在动能方程中增加了阻力做功项  $C_d A_f \bar{u}^3$  在耗散率方程中增加湍流对耗散率贡献  $C_2 \frac{K^2}{\varepsilon} \frac{dU}{dz} \frac{d}{dz} (C_d A_f \bar{u}^2)$  而已.

J D Wilson 模型沿用的也是 Launder 的模型. 但他把湍流动能 (TKE) 分裂成两个频带; 剪切湍流动能 (SKE, 低频带) 和迹湍流动能 (WKE, 高频带). 在植被湍流中这是一个很好的思想. 因为从第 2 节可知, 植被阻力不但从平均流动能 (MKE) 中抽吸能量转换成湍流动能, 而且从湍流大尺度涡中抽吸动能转换成小尺度的迹动能, 造成能量传递的短路, 模型方程理应反映这个事实. J D Wilson 在从剪切湍流动能向迹湍流动能转换中利用了

一个经验公式, 用  $\varepsilon_{fd}$  表示从 SKE 到 WKE 的损失率,  $\varepsilon_{ee}$  表示 SKE 的粘性耗散率,  $\varepsilon = \varepsilon_{fd} + \varepsilon_{ee}$  是 SKE 的总耗散率,

$$\varepsilon_{fd} = \frac{1}{2} C_d a \bar{u} (4\overline{u'^2} + 2\overline{v'^2} + 2\overline{w'^2}), \quad \varepsilon_{ee} = \frac{(C_3 K)^{3/4}}{k_\nu z} \quad (3.11)$$

这里  $K$  是 SKE 的动能,  $k_\nu$  是卡门系数。

在 Meyers & Paw 模型中, 为了更好地表示 3 阶速度关联项, 他们没有直接对它参数化, 而是进一步用了 3 阶速度关联项的控制方程, 并对 4 阶矩使用了准高斯分布假设。粘性耗散率同 Mellor 方式 (3.7),

$$\varepsilon = q^3 / Al$$

$l$  分布同 WS 模型 (3.8)。

从以上对 4 个植被模型的分析中可以看出, 现有的这些模型还有不少不足之处。在 3 阶矩模化中用了 4 阶矩遵守高斯分布假设, 而实验表明, 植被湍流是高度间歇的。偏离度和峭度数据表明不满足高斯分布假设。更重要的是现有模型不能很好反映能量传递的短路现象。短路现象改变了湍流动能耗散率, 在植被内不能用一个长度尺度表示。因此, J D Wilson 把湍流动能分成两个频带的思想是可取的。可惜他的工作不彻底, 用了一个经验公式表示了剪切湍流动能向迹湍流动能的转换。在植被内湍流在惯性子区和耗散区都是局部各向异性的, 这在现有封闭模式中也不能反映。蔡树棠等 (1987) 最近提出将大涡与小涡分开, 分别模化的模式理论, 希望能尽快实用化, 能在植被湍流研究中应用和验证。

用这 4 种植被湍流模型计算平均风速和水平剪应力剖面, 与实验相比都能得到很好的结果。但是对速度方差 ( $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}$ ) 的计算表明, 在植被顶部, 与实验相比, 被明显地高估了。这是由于湍流迹很快耗散成热, 对速度方差贡献不大 (图 11)。

#### 4 小结

实验和理论研究表明, 植被内部及其上方的湍流场与表面层内的湍流主要有以下明显不同的特点。

- ① 植被湍流谱分析表明, 在惯性子区不符合 Kolmogorov  $-2/3$  次律。由于植被把剪切流中的大涡打碎, 迹湍流更容易耗散成热, 在植被内表现为能量传递的短路现象, 在惯性子区谱曲线斜率比科氏理论预示的  $-2/3$  更负;
- ② 植被湍流在惯性子区和耗散区是局部各向异性的;
- ③ 水平剪应力象限条件抽样表明, 植被湍流主要受大的间歇涡控制;
- ④ 现有的植被湍流模型在计算平均风速和水平剪应力时符合得很好, 但高估了速度方差剖面, 现有模式应该根据实验结果加以改进, 特别是对湍流动能耗散率的处理。

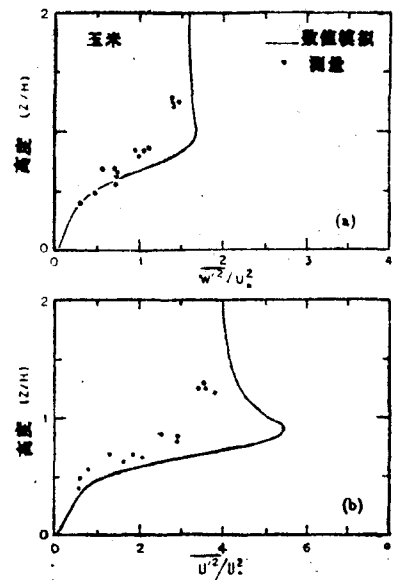


图 11 湍流动能的 (a) 铅直分量 (b) 水平分量数值模拟值与测量值比较

## 参 考 文 献

- Amiro B D, Davis P A. *B. L. Meteorol.*, **44** (1988) : 267—283  
Anderson D E, et al. *Agric. For. Meteorol.*, **38** (1986) : 81—99  
Baldocchi D D, Hutchison B A. *B. L. Meteorol.*, **42** (1988) : 293—311  
——, Meyers T P. *ibid.*, **43** (1988) : 345—364  
蔡树棠, 麻柏坤. 应用数学和力学, **8**, 10 (1987) : 849—858  
Cionco R M. *J. Appl. Meteorol.*, **4** (1965) : 517—522  
Corrsia S. *Adv. Geophys.*, **18A** (1974) : 25—60  
Finnigan T T. *B. L. Meteorol.*, **16** (1979) : 181—212  
——. *ibid.*, **16** (1979b) : 213—236  
Hanjalic K, Launder B E. *J. F. M.*, **52** (1972) : 609—638  
Inoue E. *J. Meteorol. Soc. (Jpn)*, **41** (1963) : 317—326  
Kalma J D, Stanhill G. *Agric. Meteorol.*, **10** (1972) : 185—201  
Landsberg J J, James G B. *J. Appl. Ecology*, **8** (1971) : 729—741  
Mellor G. *J. Atmos. Sci.*, **30** (1973) : 1061—69  
Meyers T, Paw U K T. *B. L. Meteorol.*, **37** (1986) : 297—311  
Raupach M R, Thom A S. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **13** (1981) : 97—129  
——, et al. *B. L. Meteorol.*, **35** (1986) : 21—52  
Seginer I, et al. *ibid.*, **10** (1976) : 423—453  
Shaw R H, et al. *ibid.*, **5** (1974) : 429—449  
Tan H S (谈毓生), Ling S C. in *The Energy Budget at the Earths Surface* (E. R. Lemon ed.), ARS, USDA Projection Res. Rept. No.72 (1963) : 7—25  
Wilson N R, Shaw R H. *J. Appl. Meteorol.*, **16** (1977) : 1197—1205  
Wilson J D, et al. *B. L. Meteorol.*, **24** (1982) : 495—519  
——. *ibid.*, **42** (1988) : 371—392  
尹协远, Lin J D. 气象学报, **46**, 2 (1988)

## STUDIES ON TURBULENCE IN VEGETATION

Yin Xie-yuan

Department of Modern Mechanics, The University of Science and Technology of China

**Abstract** The present paper surveys advances in experimental and theoretical studies on turbulence in vegetation in recent years. The experimental results show that the turbulence in vegetation is high skewed, kurtotic and intermittent, and that turbulence transport processes in vegetation are dominated by large intermittent eddies. The plant elements, such as leaves, stems and branches generate turbulent wake with length scales smaller than those produced by meanwind shear. The smaller-sized, wake-generated turbulence dissipates rapidly into internal energy. Consequently, it is believed that the plant elements act to short-circuit the normal eddy cascade process. The spectral slopes in the inertial subrange are more negative than those predicted with Kolmogorov's  $-2/3$  theory. Although high order closure models of turbulence have been used to study turbulence in plant canopies, the modeled  $\overline{u'^2}$  and  $\overline{v'^2}$  profiles are generally overestimated, some improvements are needed according to experimental results.

**Keywords** forest meteorology, vegetation, turbulence model, turbulence