

## 植物冠层动量交换特征的实验研究\*

雷孝恩 田瑞明 韩志伟 袁素珍 邓玉珍

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

骆启仁 李 勤 李 真\*\*

(重庆市环境监测科研所, 重庆 630020)

### 提 要

使用湍流梯度测试资料, 对植物冠层动量交换特征进行了详细研究, 结果表明: 森林冠层内惯性副区能谱曲线仍可用幂指数描述, 但斜率比 $-2/3$ 更负; 森林冠层内湍流尺度有变小的趋势; 森林上层的耗散系数比下层大; 由植被吸收引起动量及动量通量随冠层深度增加而明显减小; 冠层下层的动量通量和耗散系数分别与上层的量有好的正相关; 森林冠层内耗散系数和动量通量随大气稳定度有明显变化。

关键词: 动量通量; 植物冠层; 湍谱; 湍流尺度; 耗散系数。

### 一、引 言

森林、草原和耕地占全球表面积的15%, 大面积植被的存在对区域或全球气候起着重要的调节作用, 研究地-气相互作用不能不考虑植被的重要影响。大气和植被之间的动量、热量、物质(含水汽)交换过程是动力气候、生态学、环境科学和水文气象学等共同关心的问题, 而植被内部及其上方湍流结构对各种交换过程有着本质的重要性。因此, 植被湍流研究是一项基础性的工作。

使用二阶闭合、Lagrange模式和具有附加大尺度扩散项的一阶闭合等理论研究植物冠层内湍流交换, 取得的重要进展是发现梯度扩散理论不适用于冠层<sup>[1-4]</sup>。不幸的是, 用来检验和改进模式的有效资料却很少, 模式所采用的假设和观测事实尚存在一些矛盾。例如, 湍流耗散通量通常是使用长度尺度参数化并采用地面边界层原理导出的, 而一些野外资料则指出植物的作用是缩短涡旋的串级过程, 它可改变湍流的耗散率; 一些模式将冠层内湍流场处理成均匀分布, 而实测结果则表明是非均匀的; Lagrange时间尺度和湍流统计量的垂直分布对模式是需要的, 不同的实验尚未得到统一的垂直交换系数公式。因此, 大量野外测试, 尤其浮力效应, 山地植物冠层内的流动等研究更是需要加强。

本文正是利用在重庆地区针叶林和麦地中取得的湍流梯度资料, 对植被与大气之间

1994年9月19日收到, 1995年3月29日收到修改稿。

\* 本研究系国家自然科学基金和大气边界层物理和大气化学国家重点实验室资助课题。

\*\* 朱晋钊、李德新、邵永琪和田亚静参加资料获取的野外试验。

有关的动量交换特征进行详细分析,以期揭示植被冠层湍流交换机理,为冠层湍流交换过程参数化和模式化研究提供实验基础。

## 二、野外测试

1992年春天,我们分别在重庆地区的南山(针叶林,3月31日到4月17日)和长生(抽穗期的麦地,4月18日到25日)两处作湍流量的两层梯度连续观测。其仪器探头架设在一木结构空心架子的平台上,森林冠层厚度( $H$ )平均为15 m,观测高度分别为12(代表冠层上层)和2.5 m(代表冠层下层),麦地冠层厚度平均为0.8 m,探测高度分别为5 m(冠层顶以上)和0.8 m(冠层顶处)。

南山观测点地处长江南岸高山的台地上,沿江面有明显的陡坡,其余方向以小丘开阔地形为主,2 km范围内没有明显的高地起伏。长生观测点是在重庆市远郊的麦地上进行的,2 km范围内属平坦均匀地形。两个测点处在四川盆地底部的小风区内,小风和静风频率很高。因此,本次测试资料为研究小风条件下冠层动量交换特征提供了一个好的机会。

湍流梯度观测采用两台超声风速温度仪,作24小时连续自动取样,分快慢两档,取样时段为30分钟,快档是每秒取11.4个样品,慢档是每秒一个样品,样品包括湍流速度的三分量( $u$ 、 $v$ 和 $w$ )及温度脉动4个信息。快档资料作湍谱、高频响应及物质通量的相关研究。同时,还进行了大气辐射的自动化连续观测。

## 三、动量吸收及动量通量

动量通量是边界层动量交换过程的一个重要特征,通常用以下关系由实测湍流量导出<sup>[5]</sup>:

$$V_* = (\overline{uw^2} + \overline{vw^2})^{0.25}, \quad (1)$$

式中 $V_*$ 通常也称为近地面层摩擦速度或速度尺度,“ $\cdot$ ”为总体平均值。

利用实测的样品,对上下两层平均风( $V$ )、动量通量的统计特征(表1)及其统计相关作了仔细分析。结果表明,上下层 $V_*$ (m/s)、 $V$ (m/s)以及它们之间的相关满足以下关系:

$$\text{南山} \quad V_{*d} = 0.311 V_{*u}^{0.442} \quad r = 0.995, \quad (2a)$$

$$V_d = 0.394 V_u^{0.607} \quad r = 0.986, \quad (2b)$$

$$V_{*u} = 0.214 + 0.075 V_u \quad r = 0.996, \quad (2c)$$

$$V_{*d} = 0.154 + 0.083 V_d \quad r = 0.994, \quad (2d)$$

$$\text{长生} \quad V_{*d} = 0.601 V_{*u}^{0.765} \quad r = 0.999, \quad (3a)$$

$$V_d = 0.585 V_u^{0.756} \quad r = 0.976, \quad (3b)$$

$$V_{*u} = 0.165 + 0.085 V_u \quad r = 0.976, \quad (3c)$$

$$V_{*d} = 0.137 + 0.127V_{*u} \quad r = 0.945. \quad (3d)$$

其中下标  $u$  和  $d$  分别表示上层和下层的量,  $r$  为相关系数,  $N$  为样品数。

表 1 动量及动量通量统计特征

| 测站 | 稳定度类 | $N$ | $V_u$           | $V_{*d}/V_{*u}$ | $V_d/V_{*d}$ | $V_u/V_{*u}$ |
|----|------|-----|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| 南山 | 不稳定  | 73  | $1.33 \pm 0.89$ | 0.51            | 2.05         | 3.41         |
|    | 中性   | 60  | $2.02 \pm 1.04$ | 0.59            | 2.90         | 5.94         |
|    | 稳定   | 96  | $1.77 \pm 0.57$ | 0.63            | 2.87         | 5.39         |
|    | 总体   | 229 | $1.70 \pm 0.79$ | 0.58            | 2.58         | 4.91         |
| 长生 | 不稳定  | 22  | $0.86 \pm 0.32$ | 0.83            | 2.74         | 3.74         |
|    | 中性   | 36  | $0.92 \pm 0.38$ | 0.87            | 3.00         | 4.00         |
|    | 稳定   | 35  | $0.81 \pm 0.57$ | 0.87            | 2.40         | 3.3          |
|    | 总体   | 93  | $0.87 \pm 0.42$ | 0.87            | 2.70         | 3.78         |

从表达式 (2)、(3) 及表 1, 可得到如下结果: 上层动量及其通量明显大于下层 ( $V_{*d} < V_{*u}$ ,  $V_d < V_u$ ), 动量及其通量随冠层深度加大而减少, 充分反映植被对动量及其通量的吸收作用, 这与文献[3]的数值研究结果一致; 冠层内动量通量与冠层内或以上的平均动量之间有相当好的正相关性, 其相关系数平均大于 0.94, 表明冠层内湍流交换的大小与冠层内和以上的平均风场关系密切, 或者说冠层内湍流交换的大小由未受植被影响的平均动量决定;  $V$  和  $V_{*}$  的平均比值与文献[6]在各种植被条件下导出的  $V(H)/V_{*} = 3.69 \pm 1.58$  ( $N=18$ ) 很接近, 但比一般平原正常风速情况下比值为 10 要小很多, 这主要是由于植被的影响, 使湍流动量通量增加, 消耗流体的动量更多, 使  $V/V_{*}$  变得更小;  $V$  与  $V_{*}$  之比, 森林的不稳定和稳定条件相差较大, 这表明大气边界层稳定性的变化对森林冠层内动量交换特征的影响是不能忽略的。

#### 四、耗散系数

耗散系数是描述湍流交换的重要参数, 它可由以下关系导出:

$$\varepsilon = \sigma_w^3 / (0.32\lambda_m) \quad (\text{cm}^2/\text{s}^3), \quad (4)$$

其中  $\sigma_w$  是湍流脉动速度垂直分量的标准差,  $\lambda_m$  是垂直湍流尺度, 它是惯性副区湍谱峰值所对应的波长, 很容易由能谱曲线导出。使用和上节同样的资料, 对  $\varepsilon$  的统计特征作了仔细分析 (表 2)。

表 2  $\varepsilon$  的统计结果

| 测点 | 稳定度             | $\varepsilon$     |                   |                   |                   |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|    |                 | 不稳定度              | 中性                | 稳定                | 总体                |
| 南山 | $\varepsilon_u$ | $91.92 \pm 50.65$ | $39.55 \pm 24.56$ | $27.55 \pm 14.58$ | $51.39 \pm 29.93$ |
|    | $\varepsilon_d$ | $48.90 \pm 26.26$ | $17.10 \pm 12.67$ | $10.84 \pm 7.37$  | $24.72 \pm 13.43$ |
| 长生 | $\varepsilon_u$ | $37.45 \pm 22.18$ | $18.78 \pm 14.85$ | $11.77 \pm 7.78$  | $20.56 \pm 14.94$ |
|    | $\varepsilon_d$ | $52.75 \pm 25.28$ | $28.72 \pm 19.38$ | $21.27 \pm 12.88$ | $31.60 \pm 19.18$ |

除了对  $\varepsilon_d$  和  $\varepsilon_u$  作统计分析外, 对它们之间的相关也作了研究, 其结果为

$$\text{南山} \quad \varepsilon_d = 0.537\varepsilon_u^{0.987} \quad r = 0.992, \quad (5)$$

$$\text{长生} \quad \varepsilon_d = 4.88\varepsilon_u^{0.645} \quad r = 0.990, \quad (6)$$

从表 2 及表达式 (5) 和 (6) 可看出:  $\varepsilon$  随稳定度增加而明显减小, 表明大气稳定度的影响对植被情况不能忽略; 对长生,  $\varepsilon_d > \varepsilon_u$ , 这与大量平原地区得到的  $\varepsilon$  随高度增加而减少规律一致, 在  $Z=25\text{ m}$  时, 平均为  $32\text{ cm}^2/\text{s}^3$ , 也与长生观测的结果接近, 但森林情况,  $\varepsilon_u > \varepsilon_d$ , 表明由于森林上层很密的树叶将大涡打碎, 产生尺度较小的涡, 小涡更具有大的耗散性, 因而使冠层上层的耗散系数大大加强;  $\varepsilon_d$  与  $\varepsilon_u$  有好的相关性, 它们之间成正变关系; 虽然  $\varepsilon$  大小离散度较大, 但它们的标准差仍小于平均值。

## 五、湍 谱

植被中的谱特性最好是与平坦均匀地形条件的湍谱作比较研究。平坦均匀条件下的湍谱通常满足以下关系:

$$S(k) = Ak^{-B} \quad (\text{m}^2/\text{s}), \quad (7)$$

其中  $B=5/3$ ,  $A = \alpha\varepsilon^{2/3}/V$ ,  $\alpha$  是一普适常数,  $k$  是波数 ( $1/\text{m}$ ), (7) 式就是通常讲的  $2/3$  定律。

表 3 森林情况 (7) 式的  $A$  和  $B$  统计结果

| 分量 | 层次 | $A \times 10^{-3}$ | $B$             | $r$             |
|----|----|--------------------|-----------------|-----------------|
| u  | 上  | $4.27 \pm 2.98$    | $1.90 \pm 0.14$ | $0.98 \pm 0.17$ |
|    | 下  | $7.33 \pm 5.23$    | $2.06 \pm 0.21$ | $0.98 \pm 0.02$ |
| v  | 上  | $2.49 \pm 2.11$    | $1.97 \pm 0.14$ | $0.96 \pm 0.03$ |
|    | 下  | $5.64 \pm 3.17$    | $2.07 \pm 0.17$ | $0.98 \pm 0.02$ |
| w  | 上  | $1.38 \pm 1.08$    | $1.96 \pm 0.14$ | $0.97 \pm 0.04$ |
|    | 下  | $4.61 \pm 3.25$    | $2.01 \pm 0.16$ | $0.97 \pm 0.03$ |

为比较, 我们将森林测得的 44 次 3 个湍流分量分别作了湍谱详细分析。不同分量上下两层的典型能谱曲线分别给在图 1a—1c 中, (7) 的参数  $A$  和  $B$  的统计结果给在表 3 中。

从图 1a—1c 和表 3 的结果看出, 虽然能谱曲线呈土丘形, 且在惯性副区谱也可用类似 (7) 的幂指数来描述, 其平均相关系数均在此 0.96 以上, 但它们与平坦均匀地形条件下的谱分布有明显不同, 惯性副区内的谱曲线斜率比  $2/3$  更负, 平均讲下层比上层更偏离  $-2/3$  定律。

植被冠层内之所以惯性副区谱偏离  $-2/3$  定律, 是因为植被内部空气与植物之间的相互作用使湍流能量和传递不是按通常的能量串级理论所示的那样方式进行, 即涡旋的动能不能按局地各向同性湍流所要求的那样毫无损失地向小涡传递, 其结果是惯性副区的能量平衡遭到破坏。在上节讨论  $\varepsilon$  时, 森林情况  $\varepsilon_u$  大于  $\varepsilon_d$  也说明了这一点。

对长生麦地冠层顶和以上的湍流谱特性也作了分析, 其典型结果如图 2a—2c 所示, 能谱与  $k$  的关系基本上满足  $-2/3$  定律, 与平坦均匀地形条件下的结果一致, 与森林冠层内的湍流明显不同, 不论是  $u$ 、 $v$  还是  $w$  分量, 表达式 (7) 的幂指数  $B$  均在 1.63—1.71 之间变化, 接近  $5/3$ , 拟合的相关系数均在 0.993 以上。

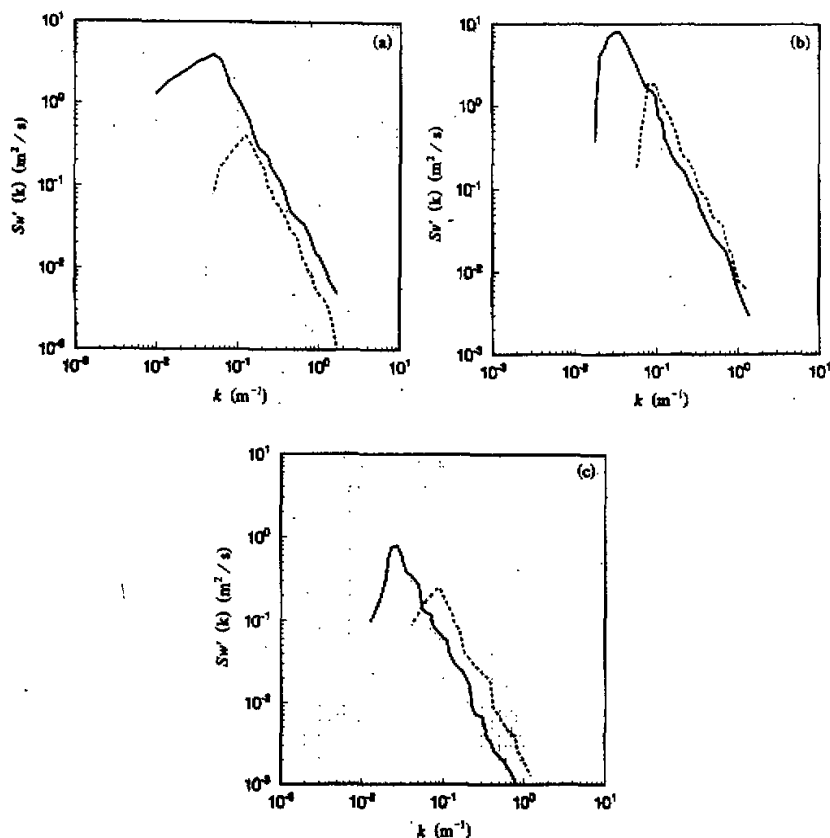


图1 森林情况下(实线)下(虚线)两层的典型能谱曲线  
(a), (b), (c) 分别代表  $u$ 、 $v$  和  $w$  分量的结果

从图1和2还看出,对森林下层3个分量的谱峰值均向高频方向移动,而麦地则是上层向高频方向移动,这反映了植被影响下的谱特性。

## 六、湍流尺度

本研究以能量峰值所对应的波长 $\lambda_i$ 定义为湍流尺度。对南山和长生所有个例的 $\lambda_i$ 进行了统计分析,其结果如表4所示,其中 $i$ 分别代表风速3个湍流分量 $u$ 、 $v$ 和 $w$ 。

从表4可得到如下结果:无因次湍流尺度 $\lambda_i/H$ 离散性很大,上层尺度的频率分布最高值不在平均尺度附近,而是在 $\lambda_i/H \leq 1$ 处,表明在冠层上层,密的叶面对切变流的破碎作用很明显,长度尺度在叶稠密处有变小的趋势,而下部躯干处,尺度最高频率出现在平均尺度附近,同时 $\lambda_i/H > 3$ 或 $\lambda_i/H \geq 0.50$ 的较大尺度湍流的频率也可超过12%,而且也是上层频率大于下层;从不同速度分量的 $\lambda_i/H \leq 1$ 或 $\lambda_i/H < 0.2$ 的频

表 4 湍流尺度分布频率 (%) 及平均特征

| $\lambda_i / H$ | $i$ | $\leq 1$ | 1.1—2.0   | 2.1—3.0   | $> 3.0$     | $\bar{\lambda}_i / H$ |
|-----------------|-----|----------|-----------|-----------|-------------|-----------------------|
| 长生下层            | $u$ | 6.3      | 32.4      | 29.7      | 31.5        | $2.57 \pm 1.29$       |
|                 | $v$ | 7.2      | 36.9      | 27.0      | 28.8        | $2.46 \pm 1.20$       |
|                 | $w$ | 13.5     | 37.8      | 30.6      | 18.0        | $2.21 \pm 1.17$       |
| 南山上层            | $u$ | 29.1     | 28.2      | 20.7      | 21.9        | $1.89 \pm 1.21$       |
|                 | $v$ | 31.2     | 30.4      | 16.8      | 21.5        | $1.79 \pm 1.18$       |
|                 | $w$ | 32.0     | 30.8      | 20.3      | 16.9        | $1.70 \pm 1.08$       |
| $\lambda_j / H$ | $j$ | $< 0.20$ | 0.20—0.29 | 0.30—0.49 | $\geq 0.50$ | $\bar{\lambda}_j / H$ |
| 南山下层            | $u$ | 27.8     | 21.1      | 31.6      | 19.4        | $0.34 \pm 0.19$       |
|                 | $v$ | 24.5     | 21.9      | 32.9      | 20.7        | $0.34 \pm 0.18$       |
|                 | $w$ | 32.5     | 17.7      | 37.6      | 12.2        | $0.32 \pm 0.17$       |

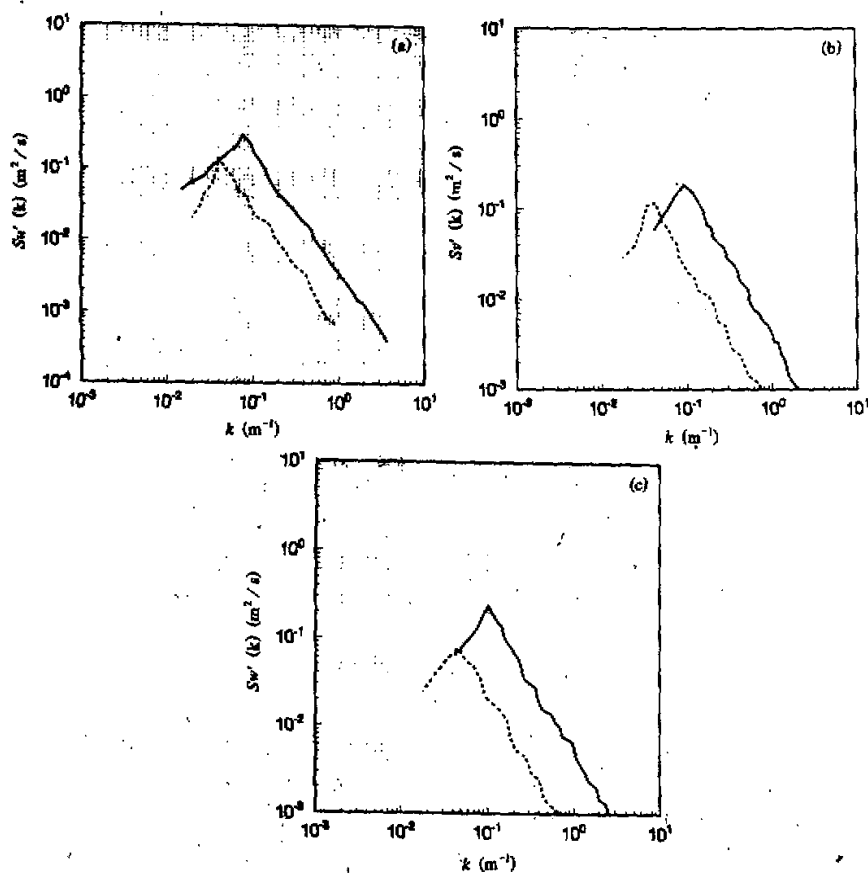


图 2 麦地情况下 (实线) 下 (虚线) 两层的典型能谱曲线  
(a), (b), (c) 分别代表  $u$ ,  $v$  和  $w$  分量的结果

率分布看,  $\lambda_w$  的频率高于  $\lambda_u$  和  $\lambda_v$ , 而  $\lambda_i / H > 3$  或  $\lambda_i / H \geq 0.5$  的频率分布则相反, 这表明垂直方向的湍流比水平方向湍流更容易被树叶所破碎; 麦地冠层顶的无因次湍流尺度与森林冠层内相比明显的差别是, 平均  $\lambda_i / H$  麦地大于森林, 长度尺度离散程度麦地比森林冠层小, 对  $\lambda_i / H \leq 1$  的频率, 麦地明显小于森林冠层, 这三点均说明麦地冠层顶处的尺度特征与平坦均匀地形近地面层湍流尺度特征接近。

Lagrange 时间尺度  $T_L$  采用如下关系导出:

$$T_L^i = 0.096 \lambda_i / \sigma_i. \quad (8)$$

使用关系式 (8), 对南山和长生 Lagrange 时间尺度进行了详细计算和分析, 其统计结果如表 5 所示。

表 5  $T_L^i$  的平均特征

| 测点 | u           |             | v           |             | w           |             |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|    | 上层          | 下层          | 上层          | 下层          | 上层          | 下层          |
| 南山 | 4.17 ± 2.53 | 2.06 ± 1.43 | 4.12 ± 2.46 | 2.39 ± 1.73 | 5.44 ± 2.74 | 3.29 ± 1.85 |
| 长生 | 3.21 ± 1.75 | 1.14 ± 0.22 | 3.77 ± 1.58 | 1.18 ± 0.35 | 5.09 ± 1.88 | 1.69 ± 0.68 |

从表 5 看出,  $T_L^w > T_L^u$  和  $T_L^v$  与  $\lambda_i$  关系相反, 这主要是由于  $\sigma_w < \sigma_u$  和  $\sigma_v$  有关; 上层  $T_L$  大于下层; 森林的  $T_L$  比同高度的近地面层相比小得多, 而长生情况则接近。

## 七、小结和结论

通过上面实测资料的仔细分析及其对比研究, 有关大气和植被之间的动量交换特征可得到以下重要结果。

(1) 植被冠层内动量和动量通量随冠层深度加大而减小, 这是植被对动量和动量通量吸收的结果。

(2) 冠层上下层的动量, 动量通量和耗散系数之间有相当好的正相关性。

(3)  $V/V_s$  和  $\varepsilon$  对森林情况随大气稳定度有明显变化, 表明大气边界层稳定性变化, 对森林湍流交换特性的影响是重要的。

(4) 森林冠层内, 上层的耗散系数比下层大, 与平坦均匀地形情况相反。

(5) 在森林冠层内, 虽然惯性副区能谱曲线呈土丘形, 且可用幂指数关系描述, 但偏离  $-2/3$  定律, 斜率比  $-2/3$  更负, 平均讲, 下层比上层偏离更大。而麦地冠层顶处和平坦均匀地形结果接近, 基本满足  $-2/3$  定律。

(6) 在森林冠层内长度尺度在叶稠密处有变小的趋势, 密的叶面对切变流的破碎作用上层明显大于下层, 垂直方向的湍流比水平方向更容易被树叶所破碎, 麦地冠层顶处的湍流尺度更接近平坦均匀地形条件下的近地面层特征。

(7) 森林冠层的 Lagrange 尺度和同高度平坦均匀地形的近地面层相比小得多, 而且时间尺度的离散性也较大。

## 参 考 文 献

- [1] Baldocchi D. D. et al., 1988, Turbulence structure in a deciduous forest, *Boundary Layer Meteorology*, **43**, 345—364.
- [2] 伊协远, 1990, 关于植被中湍流的研究, 第2届环境与灾害力学研讨会论文集, 77—91.
- [3] Lei Xiaoen and J.S. Chang, 1992, Numerical study on absorptive characteristics of mass and momentum in canopy layer, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **16**, 101—110.
- [4] Meyer T. et al., 1986, Testing of a higher order closure model for modeling airflow within and above plant canopies, *Boundary Layer Meteorology*, **37**, 297—311.
- [5] Stull R.B., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Academic Press Inc., New York, 649pp.
- [6] Back D.H., 1986, Momentum transfer to plant canopies: influence of structure and variable drag, *Atmospheric Environment*, **20**, 1369—1378.

### An Experimental Study on Exchange Characteristics of Momentum in the Plant Canopy Layer

Lei Xiaoen, Tian Ruiming, Han Zhiwei, Yuan Suzhen, Deng Yuzhen

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Luo Qiren, Li Qin and Li Zhen

(Chongqing Institute of Environmental Science and Monitoring, Chongqing 630020)

#### Abstract

Using observational data of the turbulent gradient, exchange characteristics of the momentum in the plant canopy layer (CL) are studied in detail. The results reveal that the power spectrum curve in the inertial subrange for the forest CL can be expressed by a power law, but the power exponential is less than  $-2/3$ ; turbulent scale in the forest CL tends to decrease; the dissipation coefficient in the upper forest CL is greater than that in the lower forest CL; momentum and momentum flux decrease with the increase of the CL depth due to absorption of momentum by the plant; the momentum flux and dissipation coefficient in the lower CL are positive correlated obviously with the corresponding variables in the upper CL. Variations of the dissipation coefficient and momentum flux with atmospheric stability are found within forest CL.

**Key words:** momentum flux; canopy layer; turbulent spectrum; turbulent scale; dissipation coefficient.