

松林冠层大气湍流结构观测研究

麻益民 郜永祺 李德新 胡景琳

(中国科学院大气物理所,北京 100029)

提 要

为了更好地了解大气与森林的物质和能量交换,用二层三维超声风速温度仪测量了重庆市郊松林风速和温度脉动值。采样速率为每秒1次和11次,数字量记录。计算了湍流动量通量和热通量的日变化,以及湍流风速的统计量和功率谱。结果表明,冠层上动量通量向下传输,而冠层内大多向上传输;冠层内湍流风速 u 的三阶矩平均值大于零, w 的小于零;冠层上无因次湍流风速分量 u, w 标准差和无因次湍流动能耗散率与局地 Monin-Obukhov 长度相关,而在冠层内不存在这种相关性;满足“-2/3”幂次律的 u, w 功率谱惯性区在冠层上和冠层内都存在。

关键词: 湍流 测量 森林 超声风速仪

引 言

大气圈与生物圈的相互作用是近10几年来大气科学研究的一个重要方向,最基本的问题就是正确理解两者间物质和能量的交换,而这类交换大多是以湍流交换方式实现的。对森林冠层上部和内部大气湍流结构的测量受到越来越多的重视,主要原因是由于大气扩散模式的需要,比如植冠层对二氧化硫等的吸收,同时也有助于了解森林与大气间的水汽、二氧化碳交换导致的气候效应。

这方面的测量工作多在北美的森林中进行^[1,2,3],在我国西南部地区丘陵地带尚未有过这类观测。我们所希望了解的是松林冠层上下通量变化规律,以及湍流统计与谱结构是否还能满足一定的相似律。

在本文中,我们选取了1992年春季在西南地区森林中一观测场点的大气湍流观测数据,分析了森林冠层上下通量日变化、湍流标准差和三阶矩分布、湍流谱结构、湍流耗散率及它们随大气稳定度的变化规律。

1 实验概述和计算方法

观测于1992年4月进行,地点是在四川重

庆市郊南山森林地区,观测内容是风速三分量和声虚温湍流脉动值。采取两层观测,第一层在松林植冠层内离地面约2m,第二层在植冠层上部离地面约12m,离冠层顶部约1m。探头安装在用细铁杆(直径约5cm)临时架设的铁架1m长的伸臂上,探头的 z 轴尽量保持垂直。下层探头尽量选择与周围树木等距的空间位置。每组数据包括依次采集的上下两层风速分量和声虚温湍流脉动值,共8个数据。观测分为常规观测和加密观测,所谓常规观测系指每秒采样1组,每小时正点采集15分钟,即900组,这类观测每段能持续几天;而加密观测则为每秒钟采样11组,这类观测每段持续在几小时内。测点选在一个松林茂盛的小山包上,树木间的间距为2—3m,树木约自1.5m高处开始生长。该地区属丘陵地带,测点周围10km范围内都为松林所覆盖。除在该山包正南方向有一幢楼外,其他方向没有任何高过该山包的建筑物或其他山包,正南方向的楼房高度与高层探头高度相近,与探头的水平距离约为50m。除去通量日变化计算用常规观测数据外,其余统计量都用加密

观测数据。正南方向来流状态之数据均不采用。

观测仪器为国产 FA 超声风速温度仪^[4]。上下两层探头同时采样,数据经专用接口用汇编语言直接将数字信号采集到 IBM-PC 机中,从而免除了一般磁带记录写入读出误差及模数转换的量化误差。速度分量分辨率为 $0.01\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,声虚温分辨率为 0.017°C 。但由于计算机硬盘的容量小,高速采样样本长度只能在几小时以内。

计算湍流统计量和功率谱用加密观测数据。计算湍流统计量时取样本长度12分钟,并去除平均值。功率谱用周期图^[5]方法获得。就是在样本长度 L 上分割出 K 个长度为 M 的子样本作快速傅里叶变换(FFT), $K=2M/L-1$,即相邻子样本有一半是交叠的。将 K 个子样本的功率谱求平均即为整个样本长度上的功率谱。样本长度约30分钟,用于 FFT 的时间序列数据点为8192点(约12分钟)。在进行 FFT 之前,数据序列加设汉明窗以消除有限采样长度的旁瓣效应。谱结果进行了多点平滑。具体做法是,将频率范围在对数数轴上均分成50个区间,对每一个区间内的功率谱计算值求平均。

2 日变化

选取4月12日18时至13日23时一般常规观测的资料,计算了松林植冠层上下平均风速、温度、湍流切应力和热通量的日变化。在此我们用声虚温的均值或脉动近似代替温度值^[4]。从图1可以看出:冠层上部热通量变化较大,日变化较明显,而冠层内部热通量变化较小,日变化也不如上部明显;冠层上部湍流切应力较大,动量大多向上传输,这与平坦地形下垫面是一致的。而冠层内部切应力较小,动量大多向上传输。Wilson 在玉米群落^[1]冠层下部测到过动量的向上传输。Baldocchi^[6]在杏树园(almond orchard)冠层内0.14h(h为平均树高)高度测点上测得的动量大多数是向上传输的。尽管这种现象应该审慎地看

待,但以下两个因素可能是导致这种现象的原因:①树木的间隙使气流可以穿透至冠层内部,树木在1.5m以下没有树枝,从而使得2m处测点上部冠层对气流阻滞作用大于地面对气流的阻滞作用;②测点在小山包上,这使这种气流穿透更容易些。这种现象有待于进一步研究。

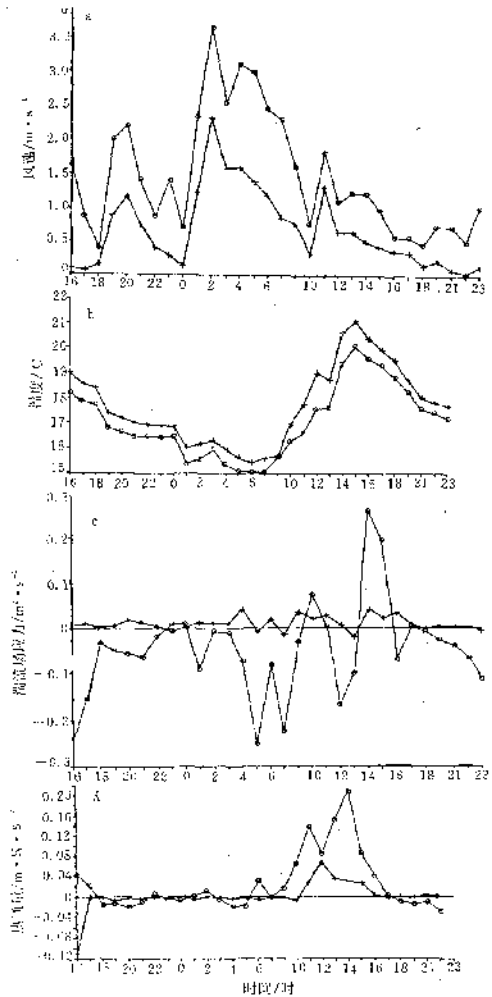


图1 松林冠层上部、内部平均量与通量日变化示例(1992年4月12日16时—13日23时)
a. 风速 u b. 温度 T c. 湍流切应力 τ_w
d. 热通量 $\tau_w T$ - 植冠层上部 + 植冠层内部

3 统计量

扩散模式大多与湍流统计量建立联系,因此,实测这些统计量并找出它们间的内在

联系是很有意义的。表1是冠层上部、内部实 测统计量一览表。

表1 冠层上部内部实测统计量

	日期	时间	\bar{u}	\bar{D}	σ_u	σ_w	$\overline{u^3}/\sigma_u^3$	$\overline{w^3}/\sigma_w^3$	$-\overline{u'w'}$	$-\overline{w'T'}$	ϵ
冠 层 上 部	0414	19:15	.65	21	.17	.12	.85	.12	.0022	-.0010	.19E-03
		19:28	.58	356	.16	.12	1.35	-.14	.0003	.0009	.54E-04
		23:19	.90	322	.40	.29	1.34	-.53	.0271	-.0082	.18E-02
		23:38	1.26	322	.57	.39	.91	-.45	.0812	-.0135	.66E-02
	0415	02:11	1.93	274	.40	.36	.22	.03	.0044	-.0280	.27E-02
		02:24	2.70	262	.40	.31	-.38	-.31	-.0076	.0133	.11E-02
	0417	06:19	3.31	275	1.04	.80	.08	-.14	.2410	-.0302	.66E-01
		06:31	3.33	268	1.21	.80	-.07	-.08	.3200	-.0275	.79E-01
	部	09:38	.39	103	.26	.20	-.54	-.23	-.0040	.0185	.81E-03
			.14	124	.50	.32	-.61	-.25	-.0495	.0303	.16E-02
		10:03	.56	304	.90	.41	-.25	.04	.1510	.0212	.86E-02
		10:15	.69	321	.84	.42	-.03	-.69	.1380	.0224	.10E-01
10:39		.86	41	.57	.42	-.47	-1.02	-.0036	.1700	.30E-02	
10:52		.65	50	.63	.46	-.45	-.67	.0013	.1540	.51E-02	
冠 层 内 部	0414	19:15	.22	347	.06	.05	.31	.01	.0012	.0009	.80E-05
		19:28	.21	342	.05	.05	.63	-.18	.0008	.0031	.20E-05
		23:19	.38	298	.21	.11	.30	-.03	-.0129	.0036	.27E-03
		23:38	.41	294	.24	.10	.12	-.26	-.0084	.0025	.14E-02
	0415	02:11	.77	241	.25	.12	1.08	-.03	-.0095	-.0068	.34E-03
		02:24	1.41	228	.36	.18	.32	.58	-.0209	-.0010	.16E-02
	0417	06:19	1.61	228	.67	.39	.67	-.37	-.0570	-.0064	.11E-01
		06:31	1.54	229	.71	.38	.73	-.15	-.0422	-.0055	.76E-02
	部	09:38	.33	122	.11	.10	.26	-.18	-.0050	-.0006	.39E-04
			.38	162	.19	.18	.79	-1.08	-.0129	-.0081	.77E-03
		10:03	.36	200	.39	.19	.50	-.68	-.0071	-.0008	.19E-02
		10:15	.40	208	.38	.18	.57	-.12	-.0065	.0027	.89E-03
10:39		.34	130	.33	.19	-1.07	-.88	-.0281	.0536	.54E-03	
10:52		.43	125	.34	.20	-.68	-.38	-.0448	.0533	.46E-03	
11:04	.42	162	.28	.22	.52	-.56	-.0153	.0230	.73E-03		
	.34	165	.24	.16	.56	-.27	-.0130	.0019	.63E-03		

注： \bar{u} 平均风速/m. s⁻¹, \bar{D} 平均风向/度, σ_u, σ_w 湍流风速标准差/m. s⁻¹, $\overline{u^3}/\sigma_u^3$ 和 $\overline{w^3}/\sigma_w^3$ 湍流风速三阶矩, $-\overline{u'w'}$ 动量通量/m². s⁻², $-\overline{w'T'}$ 热通量/m. K. s⁻², ϵ 湍能耗散率/m². s⁻³.

3.1 湍流风速标准差

σ_u/u^* 和 σ_w/u^* 是扩散模式中常需确定的量^[7], (其中, u^* 为摩擦速度)。在不均匀地形条件下, 近地层 Monin-Obukhov 局地相似理论^[8]认为, σ_u/u^* 和 σ_w/u^* 也应是稳定度参数 Z/L_i 的函数。从图2我们可以看出, 在植冠层上部 σ_u/u^* 和 σ_w/u^* 与 Z/L_i 有很好的相关性, 在中性趋于常值, 随稳定度或不稳定度增加而增大。图中曲线是 Panofsky 等(1977)^[9]

对不稳定条件下推荐的关系式。我们实测点与该曲线相近。我们定 $Z/L_i < 0.2$ 为近中性, 表2为本实验统计值与其他研究者的比较^[9]。在植冠层下部 σ_u/u^* , σ_w/u^* 随稳定度变化不明显, 可能是冠层内局地 Monin-Obukhov 相似理论不成立, 但也可能是实验过程中稳定度变化小的缘故。在冠层下部均值和方差是 $\sigma_u/u^* = 2.5 \pm 0.4$, $\sigma_w/u^* = 1.5 \pm 0.4$ 。

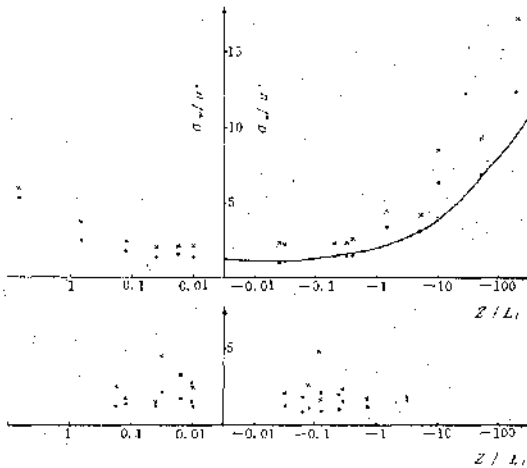


图2 风速标准差与局地稳定度参数的关系

上图:上层 下图:下层

曲线为 Panofsky 等推荐式

×表示 σ_u/u^* *表示 σ_w/u^*

表2 中性状态下湍流风速标准差

实验项目	σ_u/u^*	σ_w/u^*
本实验 冠层上部	2.24	1.38
平均地形均值	2.39 ± 0.03	1.25 ± 0.03
Erie,co,复杂地形	2.65	1.20

注:二、三栏数据是 Panofsky 等^[3]对以往研究者不同测量结果的综合。

3.2 三阶矩

我们研究三阶矩的目的是希望了解阵风(gust)对湍流的贡献^{[3][16]},这对湍流扩散高阶矩模式是有用的。我们计算了 u 和 w 的三阶矩(skewness) $\overline{u^3}/\sigma_u^3, \overline{w^3}/\sigma_w^3$ (表1)及它们的均值和方差(表3)。三阶矩表征风速脉动分量的非对称性。在冠层内 $\overline{u^3}/\sigma_u^3$ 大多为正值,表示阵发性速度大的气团湍涡从冠层上方穿透下来,而在冠层内,不存在产生比平均风速更低(更负)的速度的源; $\overline{w^3}/\sigma_w^3$ 大多为负值,表示上层湍能强的湍涡向下传输,而在冠层内部,没有产生大的向上传输湍涡的源。这与风洞实验和平坦地形森林内的情形是一致的^{[16][3]}。在冠层上部, $\overline{u^3}/\sigma_u^3$ 在稳定情形下大多大于零,在不稳定情形下大多小于零。假如冠层上部满足局地 Monin-Obukhov 相似理论的条件,三阶矩也应该是 Z/L_i 的函数。虽

然有一定相关,但可能是高阶矩计算误差大的原因,相关性并不好; $\overline{w^3}/\sigma_w^3$ 大多仍小于零。说明在这个高度上湍涡仍由上往下传输。

表3 湍流风速分量三阶矩平均值和方差

部位	$\overline{u^3}/\sigma_u^3$	$\overline{w^3}/\sigma_w^3$
冠层上部	0.06 ± 0.66	-0.28 ± 0.31
冠层内部	0.35 ± 0.52	-0.29 ± 0.38

4 谱结构

图3是近中性条件下湍流风速 u 分量功率谱的示例,图4是湍流风速 w 分量功率谱示例,其统计参量可参见表1。对于 u 谱,无论是上层还是下层,高频方向都存在满足“ $-2/3$ ”幂次律的区域,其延伸达2个量级。对于 w 谱,含能涡区向高频区偏移,高频区与“ $-2/3$ ”律基本符合,但稍有偏离,可能是采样速率(每秒11次)仍不足展示足够的惯性区。我们认为在冠层上或冠层内,惯性区都存在。冠层上的情形与其他研究者在平坦森林上方^[1]或复杂地形边界层内实测的结果^[4]是一致的。在冠层里, Wilson 等^[1]也给出了满足“ $-2/3$ ”幂次律的功率谱。同时,本文中高频部分并没发现一个谱的突起(“shoulder”)^[2],即在高频区不存在一个次生涡区(wake)。Amiro^[2]分析认为,这种次生涡区是由于测点附近宽大平展的树叉引起的。本实验场点的树枝较为收拢,这可能是没有观测到次生涡区的原因。由于高速数字化采样样本长度有限,我们没能对低频谱作有意义的探讨。

冠层上部的谱值都大于冠层内的值。在某些频率上,上下两层谱结构有相同的起伏,说明有一定的相关性。

湍流动能耗散率 ϵ 是扩散模式中常需确定的参量^[7]。研究 ϵ 与近地层其它统计参数的关系,对于扩散模式中,经验性地确定 ϵ 是很有帮助的。假设风速分量功率谱存在惯性副区,那么依照 Kolmogorov 相似理论,在这一区域有下列关系式存在(以纵向 u 风速谱为例,这里 α 取 0.59 ^[11])

$$fSu(f) = \alpha \epsilon^{2/3} (u/2\pi) f^{-2/3} \quad (1)$$

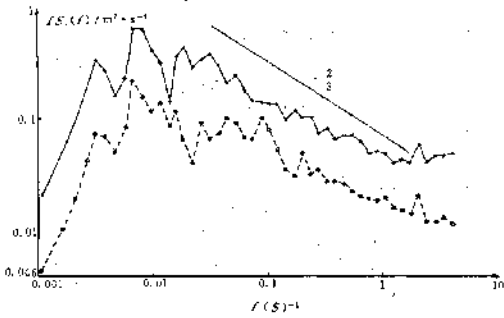


图3 湍流风速 \$u\$ 分量功率谱(1992年4月15日6时19分至6时50分)

实线:冠层上部 虚线:冠层内部

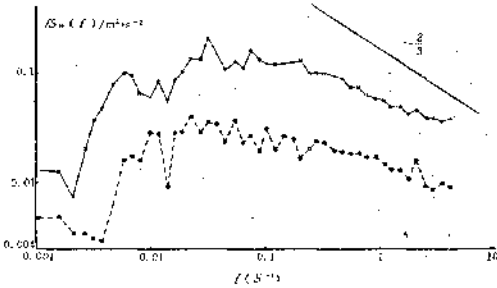


图4 湍流风速 \$w\$ 分量与功率谱(时间同图3)

实线:冠层上部 虚线:冠层内部

从而我们可以根据 \$u\$ 谱和水平风速 \$u\$ 求出 \$\epsilon_u\$。表1所列是由每个样本计算得出的动能耗散率 \$\epsilon\$。

现在我们讨论 \$\epsilon\$ 与局地稳定度参数 \$Z/L_t\$ 的相关性。如果局地 Monin-Obukhov 相似性存在,则:

$$\Phi_m - Z/L_t - \Phi_\epsilon = 0 \quad (2)$$

这里 \$\Phi_m\$ 是无因次风切变及 \$\Phi_\epsilon = \kappa Z \epsilon / u_*^3\$ 为无因次动能耗散率。

我们推广均匀近地面 \$\Phi_m\$ 的 Dyer-Hicks 形式^[12]

$$\Phi_m \begin{cases} (1 - 16Z/L_t)^{-1/4} & Z/L_t < 0 \\ 1 + 5Z/L_t & Z/L_t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(2),可得

$$\Phi_\epsilon \begin{cases} (1 - 16Z/L_t)^{-1/4} - Z/L_t & Z/L_t < 0 \\ 1 + 4Z/L_t & Z/L_t > 0 \end{cases} \quad (4)$$

图5展示了实验所得 \$\Phi_\epsilon\$ 与 \$Z/L_t\$ 的相关性。在冠层上, \$\Phi_\epsilon\$ 与 \$Z/L_t\$ 的相关性是非常明

显的,与式(4)的趋势趋于一致,在非近中性条件下,计算 \$\Phi_\epsilon\$ 与式(4)给出的曲线较接近,在近中性条件,计算值偏小于曲线值。王立治等^[4]在城郊大气近地层也测得与接近式(4)的相关性,但实测点少一些。由观测结果我们认为,在丘陵地区冠层上,非中性条件下湍能耗散率可以用式(4)求取。近中性条件下 \$\Phi_\epsilon\$ 计算值与曲线值的偏离有待于进一步的研究。在冠层内 \$\Phi_\epsilon\$ 与 \$Z/L_t\$ 没有明显相关。由于在冠层内功率谱亦满足“\$-2/3\$”幂律。式(2)也成立。由此,则 \$\Phi_m\$ 不满足式(3)。

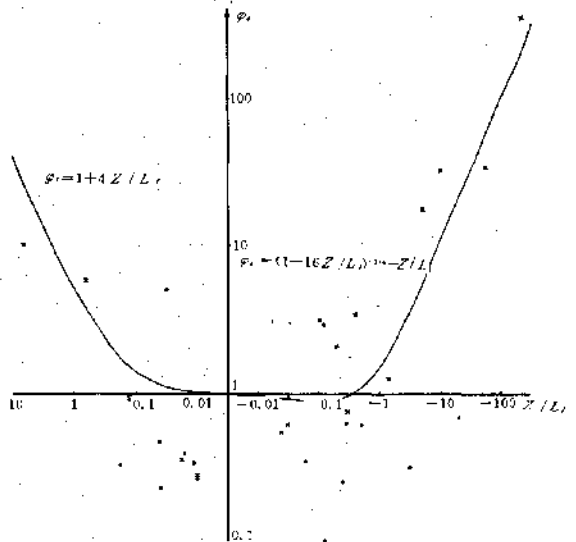


图5 无因次湍流动能耗散率 \$\Phi_\epsilon\$ 与局地稳定度参数的关系

×冠层上部 ·冠层内部

5 结语

(1)在本实验场点,大多数情形下,冠层上方湍流动量向上传输;冠层下方湍流动量向上传输。冠层上热通量变化要大于冠层内情形。

(2)风速标准差分析表明, \$\sigma_w/u_*\$ 和 \$\sigma_w/u_*\$ 在冠层上与局地稳定度参数 \$Z/L_t\$ 函数有很好的相关性;在冠层内 \$\sigma_w/u_* = 2.5 + 0.4\$, \$\sigma_w/u_* = 1.5 + 0.4\$。

(3)三阶矩分析表明,在冠层内 \$\overline{w^3}/\sigma_w^3\$ 大多大于零; \$\overline{w^3}/\sigma_w^3\$ 大多小于零。这与平坦地

形结论一致。在冠层上 $\overline{u'^3}/\sigma_u^3$ 稳定条件下大于零,不稳定条件下大多小于零。

(4)冠层上下风速分量功率谱都存在接近“ $-2/3$ ”幂次律的功率谱。无因次湍流耗散率在冠层上方是局地稳定度参数的函数。

总体而言,我们认为:在冠层上方局地相似性普遍成立,湍流二阶矩和湍能耗散率是局地稳定度参数的函数;在冠层内部 Kolmogorov 相似性成立,局地 Monin-Obukhov 相似性不成立。

由于该地区经常处于静风状态,大风条件下样本数太少,而且来流方向不全面,结果的广泛适应性有待于进一步研究。

致谢:雷孝恩教授,田瑞明同志对本文结果计算提供了许多方便和帮助,并与作者进行了许多有益的探讨,深表谢意。

参考文献

- 1 Wilson, J. D., et al. Statistics of atmospheric turbulence within and above a corn canopy. *Boundary-Layer Meteorology* 24, 1982, 495—519.
- 2 Amiro, B. D., et al. Statistics of atmospheric turbulence within a natural black spruce forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology* 44, 1988, 267—283.

- 3 Amiro, B. D., et al. Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopies, *Boundary-Layer Meteorology*, 51, 1990, 99—121.
- 4 王立治等. 城郊大气近地面层湍流特征的初步研究. *大气科学*, 9(1), 1985.
- 5 贝达特 J. S. 等著. 随机数据分析方法. 北京: 国防工业出版社, 1976: P350.
- 6 Baldocchi, D. D. and Hutchison, B. A. Turbulence in a Almond Orchard: Vertical Variations in Turbulence Statistics. *Boundary-Layer Meteorology*, 40, 1987, 127—146.
- 7 雷孝恩. 行星边界层中湍流统计量 and 风速随高度变化的参数化. 中国科学院大气物理研究所集刊, 第14号, 1990.
- 8 Hogstroin, U., et al. Turbulence characteristics in a near neutrally stratified urban atmosphere. *B. L. M.* 23, 1982, 449—472.
- 9 Panofsky H, Dutton J. *Atmospheric turbulence*, 1984, P161.
- 10 Shaw, R. H. and Seginer, L. Calculation of velocity skewness in real and artificial plant canopies. *B. L. M.*, 39, 1987, 15—332.
- 11 Dyer, A. J., and Hicks, B. B. Kolmogoroff constants at the 1976 ITCE. *B. L. M.*, 22, 1982, 137—150.
- 12 Dyer, A. J. A view of flux-profile relationship. *B. L. M.*, 7, 1974, 363—372.

Observational Study of Atmospheric Turbulence above and within a Pine Forest

Ma Yimin Gao Yongqi Li Dexin Hu Jinglin

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

Abstract

Two three-dimensional sonic thermo-anemometer probes were used to measure velocities and temperatures above and within a pine forest near Chongqing city, Sichuan Province, in order to comprehend mass and energy exchange between atmosphere and forest. The turbulent fluxes of momentum and heat, and statistics and spectra of wind speed fluctuations were calculated from the digital data sampled at rate of both $1s^{-1}$ and $11s^{-1}$, using eddy correlation and FFT method. The results show that above the canopy kinetic momentum was transported downwards, while within the canopy it was transported upwards. Within the canopy mean skewness of u was positive and that of w negative. Above the canopy both the dimensionless standard deviation of u and w and dimensionless turbulence dissipation rate were functions of local Monin-Obukhov length, while within the canopy those variables did not show the correlations. The “ $-2/3$ ” power rules, however, were existed at the inertial subrange of power spectra of wind speed either above the canopy or within it.

Key Words: turbulence measurement forest sonic thermoanemometer