

西双版纳热带季节雨林林冠上方湍流谱特征*

张明达^{1,5} 张一平^{1,3,*} 孙晓敏² 宋清海^{1,5} 杨 振¹ 高举明^{1,5} 谭正洪^{1,5} 赵双菊⁶ 于贵瑞²
(¹中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; ²中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ³中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站, 云南勐仑 666303; ⁴云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站, 云南勐仑 666303; ⁵中国科学院研究生院, 北京 100039; ⁶云南省建筑材料科学研究设计院, 昆明 650221)

摘 要 利用中国陆地生态系统通量观测网络 (ChinaFLUX) 西双版纳热带森林通量观测站涡度相关方法测定的热带季节雨林林冠上方三维方向风速 (u , v , w) 以及 CO_2 浓度、 H_2O 浓度、气温等变量的 10 Hz 观测资料, 选取 1、4、7 和 10 月 4 个代表性月份晴好天气, 在全天 5 个不同时段内 (8:00–11:30, 12:00–15:00, 15:30–19:00, 19:30–23:30, 0:00–7:30) 求算了各要素的功率谱和与垂直风速的协谱, 探讨了热带季节雨林林冠上方数据的高低频响应问题。结果表明: 在热带季节雨林林冠上方, 晴好天气且湍流条件良好状况下, 6 个变量的功率谱点阵曲线斜率在惯性副区内均满足 $-2/3$ 定律; 并且各要素与垂直风速的协谱点阵曲线斜率在惯性副区内满足 $-4/3$ 定律。说明大尺度运动对物质和能量传输的贡献在高频率和中等强度频率信号范围内的响应能力能够满足观测所要求, 可以认为在复杂地形条件下西双版纳热带季节雨林进行通量测定的采样频率合理, 所获得数据可以用来作为实际通量的结果加以使用。

关键词 谱分析; 涡度相关; 通量测定; 热带季节雨林; 西双版纳

中图分类号 S718.51 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)09-1779-08

Turbulence spectral characteristics above tropical seasonal rain forest canopy in Xishuangbanna. ZHANG Mingda^{1,5}, ZHANG Yiping^{1,3,4}, SUN Xiaomin², SONG Qinghai^{1,5}, YANG Zhen¹, GAO Junling^{1,5}, TAN Zhenghong^{1,5}, ZHAO Shuangju⁶, YU Guirui² (Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ²Institute of Geographic Sciences and National Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³Xishuangbanna Station for Tropical Rainforest Ecosystem Studies, Menglun, Xishuangbanna 666303, Yunnan, China; ⁴National Forest Ecosystem Research Station at Xishuangbanna, Menglun, Xishuangbanna 666303, Yunnan, China; ⁵Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; ⁶Yunnan Building Materials Academy, Kunming 650221, China). Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1779–1786

Abstract By using eddy covariance method and a open-path CO_2 analyzer placed on a tower in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna (ChinaFLUX), the 10 Hz observation data of six microclimate variables including three dimensional direction wind speed (u , v , w), CO_2 concentration, H_2O concentration, and air temperature above the canopy of the forest were obtained and the clear days in four typical months (January, April, July and October) were selected to calculate the power spectrum and cospectrum of the variables to vertical velocity (w) at five periods of time in a day (morning 08:00–11:30, noon 12:00–15:00, afternoon 15:30–19:00, night 19:30–23:30, before dawn 0:00–07:30), aimed to approach the high/lw frequency responsivity of the variables above the canopy of tropical seasonal rain forest. Under the conditions of clear weather and good turbulence above the canopy in the tropical seasonal rain forest, the power spectrum slopes of the six variables in their inertial subrange followed $-2/3$ power

* 国家自然科学基金项目 (40571163)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KJCX22YW243221 和 KJCX22YW241205204)、国家重点基础研究发展计划项目 (2002CB412501) 和中国科学院创新工程重大资助项目 (KJCX12SW201201A)。

** 通讯作者 E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

收稿日期: 200902107 接受日期: 2009205213

law and their cospectral slopes in inertial subrange followed to $-4/3$ power law indicating that the contribution of large scale motions to matter and energy transference above the canopy could satisfy the requirement of observing the responsivity in high and middle frequency signal areas. It was inferred that our sampling frequency of flux observation was reasonable and our data obtained from the complicated topographical condition were valid and could be used as the actual flux figures in the further study.

Key words spectrum analysis eddy covariance flux observation tropical seasonal rain forest Xishuangbanna

森林生态系统在全球碳循环中起着举足轻重的作用,准确测算森林生态系统碳通量及其分布是解释全球碳收支不平衡问题的一个关键突破口,也是满足 5 京都议定书 6 制定的 CO_2 排放目标的迫切需要 (方精云, 2000)。而热带森林生态系统又以其丰富多样的物种,复杂的群落,巨大的生物量等诸多特点,成为除众所周知的 / 海洋碳库 0 之外,支配全球碳平衡的最主要因素之一。陆地生态系统内碳水循环机理及收支的研究一直是生态系统内碳水循环研究中的关键科学问题。但是,由于观测仪器和观测方法的局限性,很长时间之内无法很好地进行更深入的研究。测量湍流通量的分析方法主要以涡度相关法、空气动力学法以及以能量平衡方程为基础的 Bowen 比法、H 扣除法和组合法 (总称为能量平衡法) (胡隐樵, 1990; 王介民等, 2007)。

微气象学理论中,对于地势平坦,冠层均质,面积广阔的通量观测站所获得的涡度相关湍流通量测定数据是最值得信赖的 (Lee 1998; Massman & Lee 2002)。但全球通量观测网络 (FLUXNET) 内基本上所有的森林站点都设置在高大森林、非平坦地形、斑块状冠层、自由对流等非理想或更现实条件下。这是 FLUXNET 基于涡度相关技术测定陆地生态系统 CO_2 和 H_2O 通量过程中不确定性的重要来源。特别是在森林生态系统,尤其是主要分布在复杂的高山地形条件下的森林生态系统 (如西双版纳热带季节雨林),地理情况难以完全满足涡度相关技术的基本假设条件,从而导致三维风速、 CO_2 、 H_2O 以及气温等测定值存在着一定的不确定性,势必造成观测数据的失真,存在着复杂地形条件下通量测定的有效性问题 (Aubinet et al., 2001; Foken & Wüchrich 1996; Mahr 1998)。另外,由于各种复杂环境条件下,林冠上方出现平流 (水平,垂直),一般情况下,这些非湍流信号观测仪器是无法捕捉到的 (Massman & Lee 2002),此乃涡度相关法通量测定中不确定性的主要原因 (Lee 1998; Baldocchi et

al., 2000; Griffis et al., 2003)。

湍流谱特征分析可以用来确定涡度相关系统对高频率和低频率信号的响应能力。确定不同变量的功率谱在惯性副区内的斜率,对确定涡度相关系统仪器的响应能力具有重要意义。这是因为在近地边界层内小尺度湍流是各向同性的,在惯性副区内能量既不能产生也不能消失,而是遵循 $-2/3$ 定律向更小的尺度传递。协谱分析确定的是不同频率或不同波数对 2 个变量协方差或有关输送通量的贡献 (杨礼荣和任阵海, 1990),也就是对湍流通量贡献。并且,协谱的点阵曲线斜率在对数坐标下的惯性副区内是基本满足 $-4/3$ 斜率。风速的垂直分量 w 与水平速度分量以及其他特征参数的协谱特征研究,有助于了解有关输送的湍流尺度分配情况,进而可以确定这些通量测量中所需要的频率响应和平均时间 (王介民, 1992)。

此外,由于仪器的噪声会引起通量数据的误差,所以认为仪器的摆放是否水平,感应器是否足够灵敏等原因都要进行一定的考虑。通过对功率谱和协谱离散大小进行分析,可以把握观测仪器对误差的响应情况。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

选取的样地位于云南省西南部,西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区的热带季节雨林永久样地内,观测铁塔位置为 101b12c E, 21b57c N, 海拔高度为 756 m, 该地的地理位置处于滇西横断山系南部,属无量山脉和怒山余脉的山原、山地地区。

由于西双版纳热带季节雨林主要分布在山间沟谷中,通量观测铁塔设置在沟谷中 (海拔高度约 756 m), 周围的山峰海拔高度为 830~1020 m, 铁塔与山峰顶的直线距离在 400~680 m。

研究区域的气象条件比较复杂,该地区终年受西南季风 (印度季风) 控制,一年内干、湿季比较分

明。一般 11 月) 翌年 4 月为干季, 5) 10 月为雨季。其中干季又可分为雾凉季(11 月) 翌年 2 月) 和干热季(3) 4 月) (张克映, 1966)。西双版纳地区的全年辐射日变化趋势是: 总辐射和净辐射在中午时分(13: 30) 14 00) 出现最大值(61012. 48211 W # m⁻²); 反射辐射最大值(7013 W # m⁻²) 出现在 12 30 有效辐射最大值(6515 W # m⁻²) 出现在 13 00, 透射辐射的最大值出现最早(12 00 6311 W # m⁻²)。辐射强度的年变化趋势是, 干热季最高, 雨季最低, 雾凉季居中(张一平等, 2005a)。

该地区由于处于静风区(年均风速约为 014 m # s⁻¹), 且降水量大, 因而形成了雾日较多的独特天气现象。多年统计资料显示, 该地区年平均雾日可达 18614 d 在雾凉季(11 月) 翌年 2 月) 期间, 月平均雾日均超过 23 d 最多的 1 月可达 2611 d 一般在 22: 00 左右开始起雾, 直到第 2 天 12 00 以后才逐渐消散。与雾凉季相比, 干热季的雾生成时刻较迟, 维持时间较短, 一般在 23 00 之后就开始起雾, 而在 11: 00 左右才逐渐消散(刘文杰等, 2004)。该区域风速年变化显著, 水平变化稍小, 干热季(3) 4 月) 风速最大, 雨季(5) 10 月) 次之, 雾凉季(11 月) 翌年 2 月) 最小(张一平等, 2006)。

112 研究方法

通量采用开路涡度相关系统进行观测。三维风速和温度及其脉动是由安装在观测铁塔 4818 m 处(高于林冠层 15~ 16 m) 和 418 m(林内近地层) 的三维超声风速测定仪(CSAT3 美国 Campbell 公司) 进行测量。探头固定于与正北的夹角为 210b 的 3 m 长的铁臂支架上。采用开路红外气体分析仪(L2 7500 美国 Li2Cor 公司) 测定 CO₂、H₂O 的脉动。CSAT3 和 L27500 的取样频率均为 10 Hz 即每秒钟获得 10 组通量观测数据。原始数据由数据采集器(CR5000 美国 Campbell 公司) 进行采集, 输出到计算机存储(张一平等, 2005b)。

计算所用数据为 1、4、7、10 月典型有代表性的晴好天气下, 热带季节雨林林冠上方的三维超声风速仪测定的风速和气温以及红外气体分析仪测定的 CO₂ 浓度和水汽浓度的 10 Hz 数据, 资料区间为全天 24 h 数据, 划分为 5 个时段(8 00) 11: 30, 12 00) 15 00, 15: 30) 19 00, 19 30) 23: 30, 0 00) 7 30) 分析要素有 u 方向水平风速(u)、v 方向水平风速(v)、垂直风速(w)、CO₂ 浓度、水汽浓度(H₂O) 和气温(T)。

113 数据处理

使用 Welch 方法求解三维方向风速(u, v, w), CO₂ 浓度, 水汽浓度(H₂O) 以及气温(T) 的功率谱 S_x(f) 和协谱 C_{wx}(f), 对功率谱 S_x(f) 和协谱 C_{wx}(f) 都分别利用变量 x 的方差以及垂直风速 w 和 x 的协方差进行了归一化处理, 横坐标为习惯的无量纲频率。再通过对数坐标下的功率谱及协谱点阵曲线的分析, 比较点阵曲线斜率是否满足 - 2/3 和 - 4/3 以确定不同变量的功率谱在惯性副区内的斜率, 就可以把握涡度相关系统仪器对高低频信号的响应能力。

2 结果与分析

211 1 月湍流谱特征分析

从表 1 可以看出, 中午和下午 2 个时段内的斜率拟合值更接近 - 2/3 和 - 1, CO₂、H₂O 和垂直风速 w 的斜率值更为接近。由图 1 可见, 在中午时段内和下午时段内功率谱和协谱的点阵均有比较明显的惯性副区出现, 其他时间段内斜率值偏差较大。

1 月属于西双版纳地区雾凉季, 平均 23 00 时开始起雾, 隔日 11: 00 时左右消散, 上午时段内湍流强度较弱。该季太阳高度角较低, 太阳辐射较弱, 最高气温较低, 最低气温较高。另外, 上午期间内, 平均风速最小, 逆温现象明显, 湍流产生能力也较小。热带季节雨林林冠上方 6 个要素的功率谱和协谱在

表 1 1 月晴好天气下全天各时段功率谱和协谱曲线斜率
Tab. 1 Slope of power spectrum and cospectrum for all parts of time in one clear day in January

时段	功率谱斜率拟合值						协谱斜率拟合值					
	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w
上午	- 0156	- 0155	- 0148	- 0154	- 0151	- 0152	- 0160	- 0157	- 0166	- 0163	- 0164	- 0154
中午	- 0158	- 0162	- 0166	- 0159	- 0168	- 0167	- 0195	- 1100	- 0198	- 0196	- 0192	- 0196
下午	- 0166	- 0169	- 0174	- 0166	- 0163	- 0164	- 0186	- 0186	- 0184	- 0190	- 0188	- 0192
前半夜	- 0169	- 0162	- 0162	- 0153	- 0147	- 0140	- 0170	- 0166	- 0160	- 0171	- 0154	- 0156
后半夜	- 0190	- 1159	- 0169	- 0154	- 0165	- 0150	- 0163	- 0158	- 0161	- 0163	- 0161	- 0156

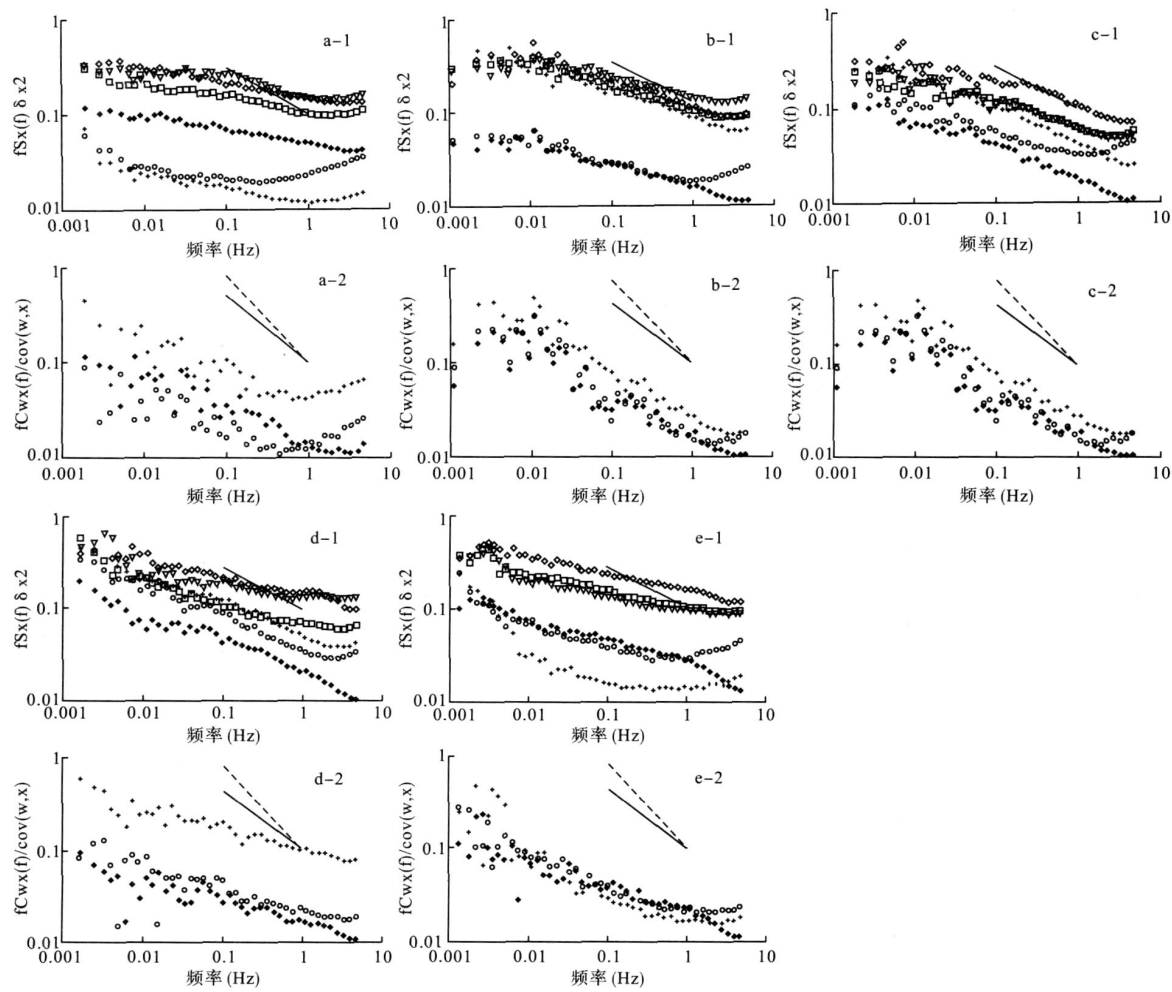


图 1 1月 6个要素功率谱和协谱特征

Fig 1 Character of power spectrum and cospectrum for six components in January

a为上午, b为中午, c为下午, d为前半夜, e为后半夜; 1为功率谱图像, 2为协谱图像; 1图中实线斜率为 - 2/3, 2图中实线为斜率为 - 1, 虚线为 - 4/3, 各图中, o代表 CO₂, +代表 H₂O, @代表温度 T, t 代表水平风速 u, ▽代表水平风速 v, r 代表垂直风速 w, 协谱图像分别是各量与垂直风速的协谱点线。下同。

雾凉季的上午均表现为高低频端能量耗散严重, 曲线斜率有较大偏差。中午和下午这 2 个时段的天气状况良好, 数据点阵曲线在惯性副区内基本无耗散, 后半夜开始起雾, 数据曲线离散较严重。

接近 - 2/3和 - 1, 尤其 CO₂ 和 H₂O 以及温度 T 结果更为接近。由图 2 可见, 中午时段和下午时段内, 功率谱和协谱的点阵惯性副区明显, 协谱曲线在前半夜时间段内也较接近。

212 4月湍流谱特征

4月属于西双版纳地区干热季, 雾日数明显减少, 雾时明显缩短, 10:00前即消散, 上午时段内

表 2 4月晴好天气下全天各时段功率谱和协谱曲线斜率

Tab 2 Slope of power spectrum and cospectrum for all parts of time in one clear day in April

时段	功率谱斜率拟合值						协谱斜率拟合值					
	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w
上午	- 0160	- 0165	- 0150	- 0146	- 0148	- 0148	- 0178	- 0190	- 0183	- 0181	- 0156	- 0168
中午	- 0161	- 0159	- 0166	- 0158	- 0164	- 0159	- 0189	- 0189	- 0194	- 0188	- 0191	- 0199
下午	- 0172	- 0183	- 0175	- 0163	- 0156	- 0158	- 0182	- 0184	- 0186	- 0186	- 0194	- 0185
前半夜	- 0198	- 1102	- 0166	- 0198	- 0176	- 0166	- 0186	- 0189	- 0189	- 0185	- 0189	- 0180
后半夜	- 0189	- 0190	- 0189	- 0178	- 0173	- 0154	- 0182	- 0181	- 0181	- 0188	- 0190	- 0187

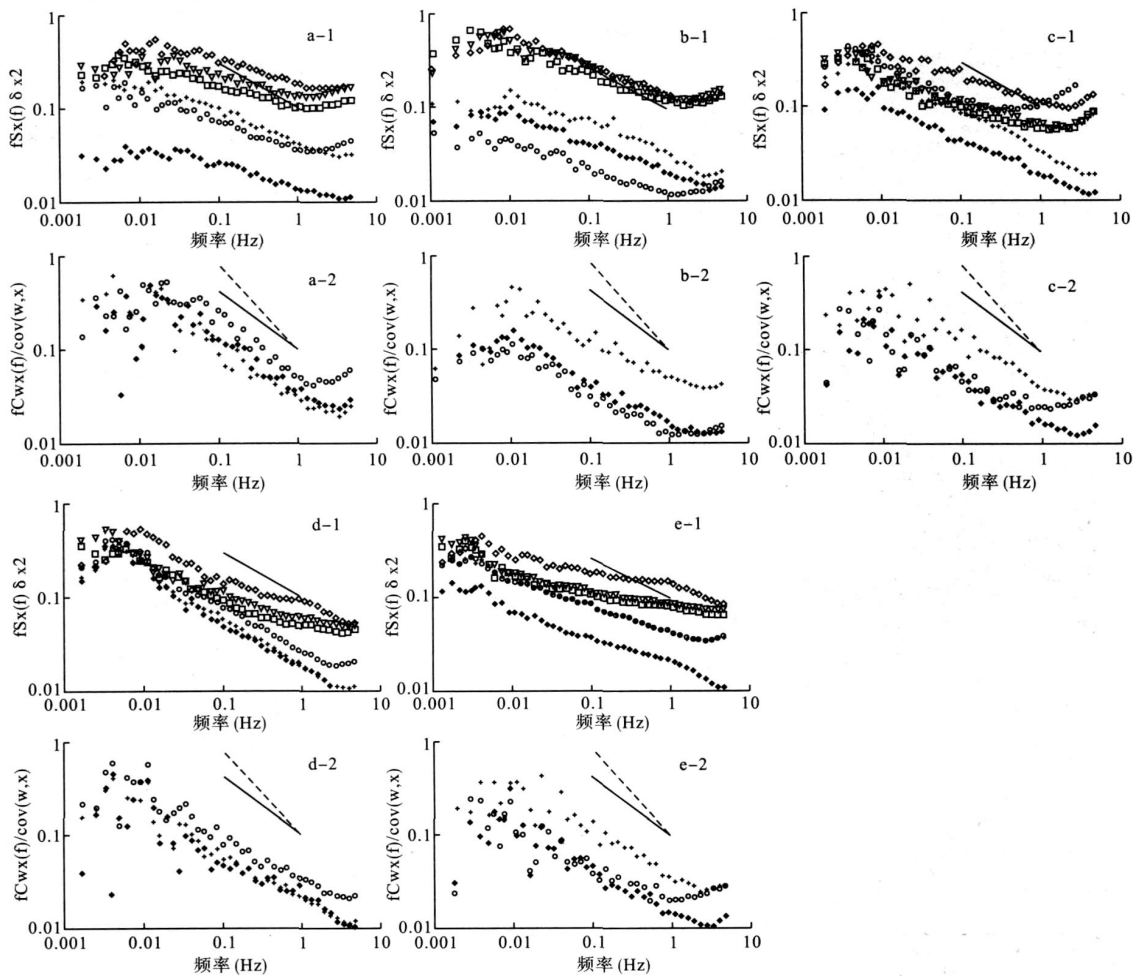


图 2 4月6个要素功率谱和协谱特征
Fig 2 Character of power spectrum and cospectrum for six components in April

数据功率谱分析和协谱分析图像斜率明显比 1 月期间内数据图像更理想。该季太阳高度角较高, 太阳辐射较强, 气温变化较大。在全年时间内为风速最高期, 日照增强, 雨量极低, 空气干燥, 本季为雨林植物集中换叶期间, 郁闭度减小, 摩擦系数降低。因此, 各变量在各时段内均能较好的在惯性区间内表现为能量无耗散, 高低频端的散乱也不明显。但昼间数据明显好于夜间。

213 7月湍流谱特征

从表 3 可以看出, 白天时段内的斜率拟合值更接近 - 2/3 和 - 1, 尤其 CO₂ 和 H₂O 结果很接近, 夜晚各要素均不理想。由图 3 可见, 中午时段和下午时段内, 功率谱和协谱的点阵惯性副区较明显, 夜晚时段内偏差较大。

7 月属于西双版纳地区雨季中期, 雨量增大, 风速全年最小, 太阳辐射强度在全年居中, 雾日增多,

表 3 7月晴好天气下全天各时段功率谱和协谱曲线斜率
Tab 3 Slope of power spectrum and cospectrum for all parts of time in one clear day in July

时段	功率谱斜率拟合值						协谱斜率拟合值					
	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w
上午	- 0172	- 0167	- 0152	- 0145	- 0150	- 0160	- 0173	- 0188	- 0180	- 0161	- 0163	- 0153
中午	- 0162	- 0166	- 0161	- 0160	- 0165	- 0161	- 1100	- 1100	- 0192	- 0195	- 0192	- 0190
下午	- 0180	- 0180	- 0164	- 0165	- 0165	- 0161	- 0182	- 0183	- 0176	- 0173	- 0171	- 0161
前半夜	- 0186	- 0189	- 0193	- 0161	- 0190	- 0173	- 0183	- 0189	- 0190	- 0176	- 0157	- 0168
后半夜	- 0168	- 1101	- 0115	- 0115	- 0164	- 0131	- 0171	- 0175	- 1105	- 0176	- 0142	- 0133

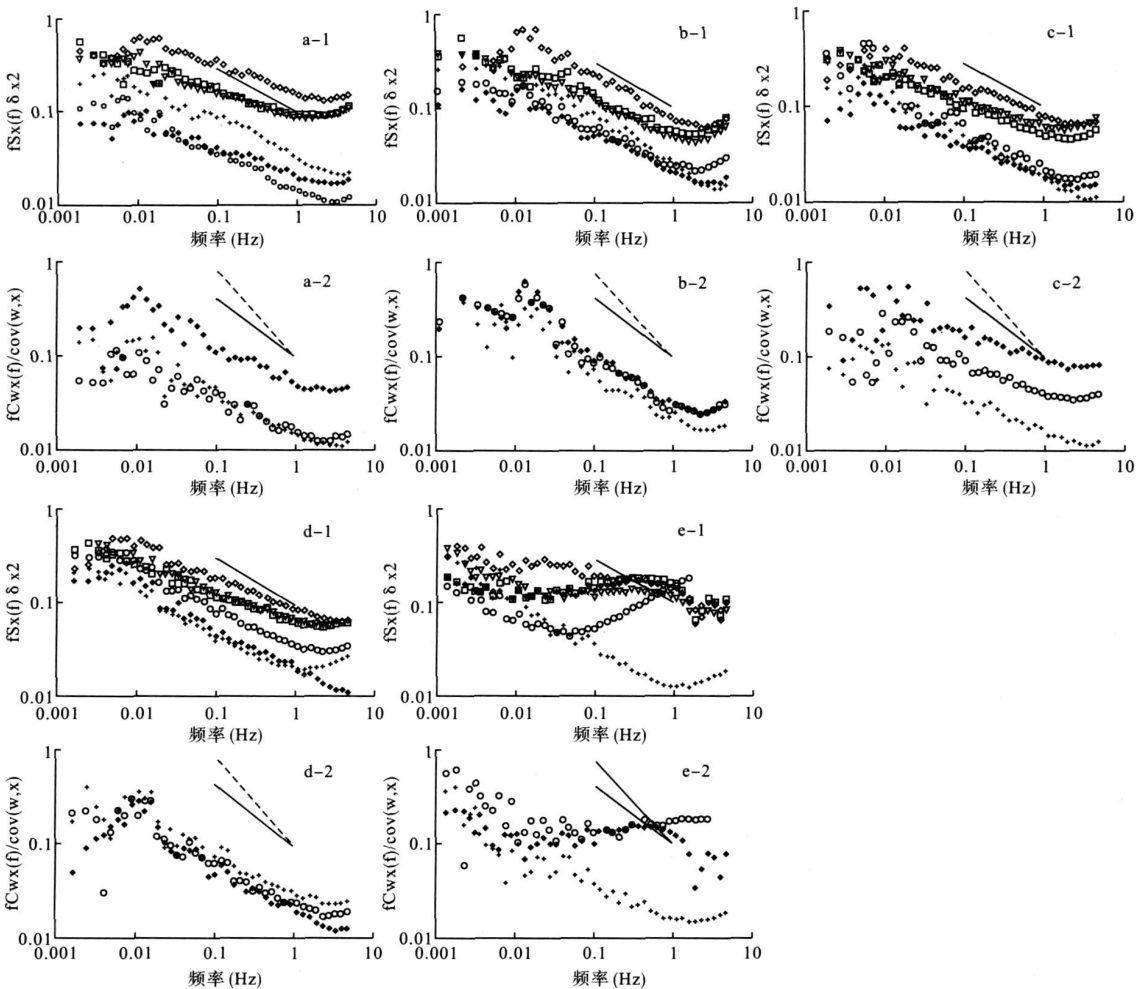


图 3 7月6个要素功率谱和协谱特征
Fig 3 Character of power spectrum and cospectrum for six components in July

雾时增强,产生湍流的能力较弱。该季节植物生长繁盛,光合和呼吸作用均强烈,摩擦系数增大,湍流能力降低。因此,该段时间内湍流数据在夜间数据偏差大,白天数据有比较明显的惯性副区出现。

214 10月湍流谱特征

从表 4 可以看出,白天时段内的斜率拟合值更接近 - 2/3 和 - 1,尤其 CO₂ 和 H₂O 以及温度 T 值的结果很接近,夜晚各要素均存在较大偏差。由图

4 可见,在上午、中午和下午时段内,功率谱和协谱的点阵惯性副区明显,夜晚时间段内有偏差。

10月属于西双版纳地区雨季后期,雨量逐渐减小,雾日增多,风速逐渐增加,太阳辐射强度比雨季中期稍降低,雾时也逐渐延长,气温变化也较大。该季植物生长仍然繁盛,光合和呼吸能力稍降,摩擦系数较大,湍流能力居中。昼间惯性副区比较明显,而在湍流能力减弱的时间段内较差。

表 4 7月晴好天气下全天各时段功率谱和协谱曲线斜率
Tab 4 Slope of power spectrum and cospectrum for all parts of time in one clear day in October

时段	功率谱斜率拟合值						协谱斜率拟合值					
	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w	CO ₂	H ₂ O	T	u	v	w
上午	- 01 62	- 01 68	- 01 58	- 01 52	- 01 46	- 01 58	- 11 02	- 01 92	- 01 98	- 01 95	- 01 89	- 01 91
中午	- 01 67	- 01 63	- 01 63	- 06 8	- 01 63	- 01 68	- 01 94	- 01 91	- 01 91	- 01 89	- 01 94	- 01 97
下午	- 01 70	- 01 77	- 01 74	- 01 69	- 01 69	- 01 62	- 01 94	- 01 97	- 01 98	- 09 5	- 01 97	- 01 93
前半夜	- 01 76	- 01 82	- 01 83	- 01 68	- 01 47	- 01 60	- 01 78	- 01 77	- 01 76	- 01 74	- 01 63	- 01 62
后半夜	- 01 73	- 01 73	- 01 71	- 01 58	- 01 53	- 01 57	- 01 68	- 01 80	- 01 62	- 01 70	- 01 56	- 01 58

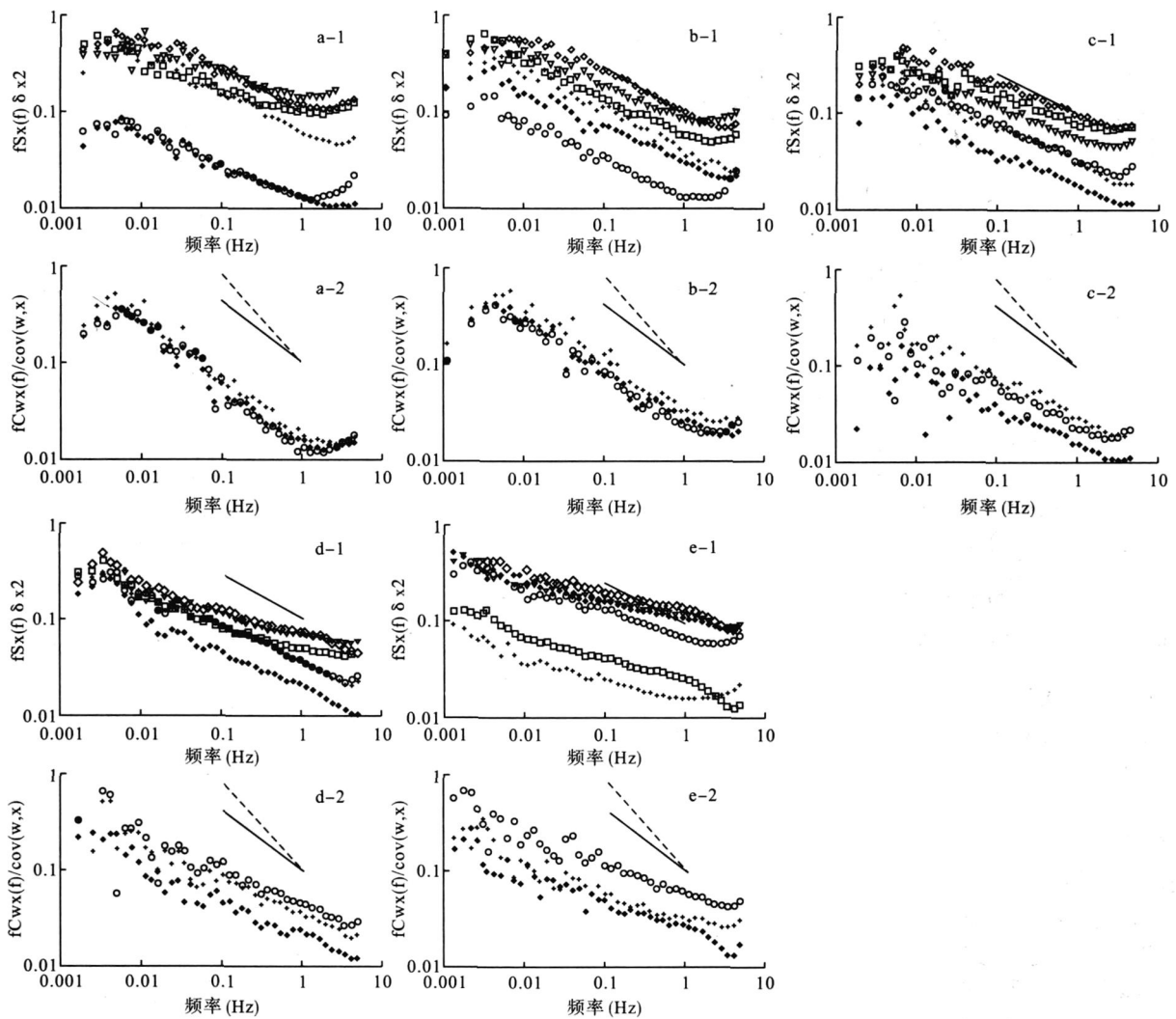


图 4 10月 6个要素功率谱和协谱特征
Fig 4 Character of power spectrum and cospectrum for six components in October

3 讨 论

6个变量在各月的特征天气下的协谱图像的斜率拟合值均接近于 - 1 而非 - 4/3 虽然与国内外相关研究成果相一致 (Amir 1990, Blanken et al, 1998, 温学发等, 2004, 杨胜朋等, 2008), 但其原因需要进一步探讨。

6个变量在近中性大气条件下的功率谱点阵曲线, 频率范围在 0.01~ 10 Hz 的斜率在惯性副区内均满足 - 2/3 定律; 并且各要素与垂直风速的协谱点阵曲线斜率在惯性副区内满足 - 4/3 定律, 认为在高频段存在明显的惯性副区, 说明仪器观测数据对各变量高频脉动信号的响应能力能够满足西双版纳站复杂地形下林冠上方湍流观测的要求。大部分的观测数据峰值频率出现在 0.1 Hz 附近, 这与国内

相关研究结果相同 (吴家兵等, 2007; 杨胜朋等, 2008)。说明大尺度运动对物质和能量传输的贡献在高频和中等强度频率范围内的响应能力已能够满足观测所需要求。各变量在不同季节内的斜率有一定的差别, 这些斜率变化不影响具体科学实验和分析, 当时的天气状况和那个期间的气候状况是其原因, 有待在今后分析实际通量状况中加以考虑。

6个变量的功率谱和协谱图像中均出现在高低频区域的点阵离散较大的现象, 各个变量的差异不同。低频部分存在一定的离散混下, 高频部分有时出现上翘现象。但所在区域曲线喜爱对应的面积较小对湍流观测不会有明显的影响。究其原因, 一般认为是由仪器自身噪声所产生的, 也可能与天气状况、部分不正确的仪器安装和使用有关。

总体上, 西双版纳热带季节雨林林冠上方 6个

变量的功率谱和协谱的分析结果显示, 对于热带季节雨林林冠上方, 不同月份不同时段内, 三维超声风速仪和红外线 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪的 6 个变量对高频信号和低频信号的响应能力已能够满足实际观测的要求。虽然个别月份, 部分变量的谱线图形会在斜率上稍微有一点差异, 可以认为与观测区域的天气状况以及气候因素有一定程度的联系。这些数据的斜率的偏差正是对这些生态系统内的自然条件的正确反映。冠层上层高度的湍流测定数据的功率谱和协谱分析表明, 观测站的仪器响应特性和采样频率均可以满足湍流通量观测的基本要求。而且, 在现实中并不存在大量理想的通量观测站点情况下, 复杂地形条件下站点的通量测定也可以用于量化和分析群落尺度碳通量对环境要素的响应以及造成碳通量年际间变异性的控制因素, 从而为确定碳通量与生物气候学间的关系提供有价值的信息。

致谢 本研究得到中国科学院西双版纳热带森林生态系统定位研究站的大力支持, 刘梦楠参加了观测工作, 在此表示感谢!

参考文献

- 方精云. 2000 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算. 植物生态学报, 24(5): 635-638
- 胡隐樵. 1990 论近地面层湍流通量观测的一些问题. 高原气象, 1(9): 74-87
- 刘文杰, 张一平, 李红梅, 等. 2004 西双版纳热带季节雨林内雾特征研究. 植物生态学报, 28(2): 264-270
- 王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 2007 复杂条件下湍流通量的观测与分析. 地球科学进展, 22(8): 791-797
- 王介民. 1992 山谷城市的近地层大气湍流谱特征. 大气科学, 16(1): 11-17
- 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 2004 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34(增刊 0): 57-66
- 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 2007 长白山阔叶红松林二氧化碳湍流交换特征. 应用生态学报, 18(5): 951-956
- 杨礼荣, 任阵海. 1990 稳定条件下盆地上空大气边界层湍谱特征. 高原气象, 9(4): 382-387
- 杨胜朋, 吕世华, 陈玉春, 等. 2008 山地复杂下垫面湍流特征观测分析. 高原气象, 27(2): 272-278

- 张克映. 1966 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析. 气象学报, 33(2): 210-23
- 张一平, 窦军霞, 于贵瑞, 等. 2005a 西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究. 北京林业大学学报, 27(5): 18-25
- 张一平, 宋清海, 于贵瑞, 等. 2006 西双版纳热带季节雨林风时空变化特征初步分析. 应用生态学报, 17(1): 11-16
- 张一平, 赵双菊, 于贵瑞, 等. 2005b 西双版纳热带季节雨林干季林冠上小气候特征及 CO_2 通量的观测. 生态学报, 25(10): 2540-2549
- Amiro BD. 1990 Drag coefficients and turbulence spectra with in three boreal forest canopies. Boundary Layer Meteorology, 40: 227-246
- Aubinet M, Chemesse B, Vandenhaute M, et al. 2001 Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. Agricultural and Forest Meteorology, 108: 293-315
- Baldocchi D, Kelliher FM, Black TA, et al. 2000 Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. Global Change Biology, 6(suppl 1): 69-83
- Blanken PD, Black TA, Neumann HH, et al. 1998 Turbulence flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest. Boundary Layer Meteorology, 89: 109-140
- Foken T, Wichura B. 1996 Tools for quality assessment of surface based flux measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 78: 83-105
- Griffis TJ, Black TA, Morgenstern K, et al. 2003 Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. Agricultural and Forest Meteorology, 117: 53-71
- Lee X. 1998 On micrometeorological observations of surface air exchange over tall vegetation. Agricultural and Forest Meteorology, 91: 39-50
- Mahrt L. 1998 Flux sampling errors for aircraft and towers. Journal of Atmosphere and Ocean Technology, 15: 416-429
- Massman WJ, Lee X. 2002 Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long term studies of carbon and energy exchanges. Agricultural and Forest Meteorology, 113: 121-144

作者简介 张明达, 男, 1982 年, 硕士研究生。主要从事生态气候方向研究。E-mail: zhangmd@xtbg.ac.cn

责任编辑 王伟