

# 湖南岳阳杨树人工林涡度相关系统数据高频特征分析<sup>\*</sup>

魏 远,张旭东,周金星,孙启祥

(中国林业科学研究院 林业研究所,国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091)

**摘 要:**气候变化和全球变暖使陆地生态的源/汇问题成为当前全球生态研究的热点问题之一。植被和大气之间 CO<sub>2</sub> 通量的长期观测有助于理解陆地生态系统的碳循环及其控制机理,评价生态系统碳循环及其对未来气候变化的响应。目前涡度相关技术已经成为这一领域的主要研究手段,对涡度相关系统观测的高频率数据进行谱分析可以确定仪器对于高频湍流信号的响应能力。以湖南岳阳杨树人工林生态系统为研究对象,其功率谱和协谱分析表明,开路涡度相关系统对高频湍流信号的响应能力可以满足该生态系统实际观测要求,涡度相关技术可以应用于杨树人工林生态系统碳通量的观测中。

**关键词:**涡度相关;高频特征;杨树人工林

**中图分类号:** S792.11;S718.45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2009)01-0131-05

## Analysis of High Frequency Characteristic About Eddy-Covariance Data over the Poplar Plantation in Yueyang City of Hu 'nan Province

WEI Yuan, ZHANG Xu-dong, ZHOU Jin-xing, SUN Qi-xiang

(Research Institute of Forestry, CAF, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Carbon Source/ Sink of terrestrial ecosystem has become an important issue in ecological research concerning about the climate change and global warming. Compared with other ecosystem, forest carbon storage plays a dominant role in the terrestrial carbon cycle and therefore many research are currently focusing on carbon sequestration and mechanisms of environmental control to this process. Based on long-term eddy covariance measured CO<sub>2</sub> fluxes at the poplar plantation ecosystem in Yueyang City of Hu 'nan province, the results show that the open path eddy covariance system to high frequency turbulence at poplar plantation sites could meet the requirement of eddy flux measurement and indicate that the open-path approach is an appropriate choice for the Yueyang poplar plantation eddy flux station.

**Key words:** eddy-covariance; high frequency characteristic; poplar plantation

涡度相关技术是一种非破坏性的微气象通量测定技术,近年来相关技术的进步使得涡度相关系统的长期观测成为可能<sup>[1-2]</sup>。目前,涡度相关技术已经广泛应用于陆地生态系统 CO<sub>2</sub> 吸收与排放的测定中<sup>[3-5]</sup>。涡度相关技术在生态系统尺度水平上研究碳收支的时间分布格局和变率具有其他观测方法无可比拟的优势。可以直接测定植被/大气间 CO<sub>2</sub> 通量密度,空间尺度上测定范围可以达到 100 m 到几公里,时间尺度上测定范围可以从小时、天、季节到

数年<sup>[6]</sup>,而短期的、独立分散的、探索性的研究,无法确定环境变量与气候变化是如何影响陆地生态系统吸收或释放 CO<sub>2</sub>。近年来,我国在 CO<sub>2</sub> 和水热通量的长期观测方面取得了较大进展,中国科学院、中国气象局等部门相继建立了一系列碳通量观测站,成立了相应的研究小组。在典型陆地生态系统进行了大量卓有成效的观测和研究<sup>[7-23]</sup>。涡度相关技术对于站点选择和仪器配置有特殊要求,本研究为站点选择和数据质量控制提供依据。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-06-02

基金项目:国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A15)

作者简介:魏远(1983-),男,安徽合肥人,博士生,主要从事生态系统生态学与全球气候变化相关研究。E-mail:weiyuan\_caf@126.com

通信作者:张旭东(1962-),男,研究员,主要从事生态学和天然林保护研究。E-mail:zhxd@caf.ac.cn

## 1 研究区与观测系统

### 1.1 研究区概况

观测样地设在湖南岳阳市君山区内(北纬 29°31'40", 东经 112°51'34")。本区位于中亚热带向北亚热带过渡气候区,具有典型的亚热带湿润季风气候特征,春季多雨、秋季多旱。年平均降水量 1 200.7 ~ 1 414.6 mm,年均相对湿度 80%。年平均气温 16.5 ~ 17.0,极端低温 - 13.7,极端高温 39.3。无霜期 264 ~ 277 d,年日照 1 644.3 ~ 1 813.8 h。

观测站平均海拔 31 m。土壤为江湖滩地特有的潮土类型,土层深度达 2 m 以上,矿质养分丰富,有机质含量较高。观测场地平整,所观测林地沿长江河道近 10 km,宽平均有 1000 m 多,构成大范围均一的下垫面,满足了实验要求盛行风向的风浪区长度。观测站所在的杨树林生态系统,属于黑杨派系列的欧美杨。现有林分是 2000 年营造,密度为 495 株/hm<sup>2</sup>,株行距 4 m × 5 m,平均树高约 16 m。林下由于季节性的水淹,只有草本植物,而且有很强的季节性生长和分布,林下草本总盖度 70% ~ 80%。

### 1.2 观测系统

开路式涡度相关系统主要由开路快速响应红外 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 分析仪(Li-7500, Lincoln Nebraska, USA)、超声风速仪(CSAT-3, Campbell, Utah, USA)和数据采集器(CR5000, Campbell, Utah, USA)组成。观测仪器安装在 25 m 高度,测量植被与大气间的通量交换。采用超声风速仪测量三维风速和虚温,开路红外分析仪测量二氧化碳和水汽浓度变化,采样频率为 10 Hz,实时观测的数据记录在数据采集器,同时在线计算 30 min 的通量及其它各种必要的协方差并把结果存储在 PC 卡内。为尽量减小通量塔身对来流方向空气运动的扭曲,将红外 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 分析仪和三维超声风速仪安装在一定长度的支臂上,指向盛行风向。观测系统(EC 系统)安装在高 35 m 的铁塔上,并于 2005 年顺利运转,每 15 d 读取数据一次。电力供应采用 220 V 交流电,并且使用蓄电池作为连续非间断电源。主要有涡度相关观测系统和微气象观测系统两部分组成。

## 2 数据采集

为了提高获取数据协方差的统计精度,增加高频信息,涡度观测系统(EC)观测频率为 10 Hz,系统储存计算通量所用的变量,三维风速( $u, v, w$ )、超声温度、CO<sub>2</sub> 和水汽密度,系统的数据采集器在采集数据的同时在线计算并储存 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 和能量通

量等数据。通量数据采集使用 CR5000 数据采集器,在采集数据时,用户通过计算机与 CR5000 进行通信,CR5000 有 CS/IO 与 RS232 两个通信接口,本站采用 RS232 与计算机的串口直接连接。连接 CR5000 时电脑采用数据采集器支持软件 Logger-net 3.3.1。由于实时数据,数据量太大,才用从数据采集器中内置的数据记忆卡直接拷贝。

## 3 结果与讨论

对涡度相关系统观测的高频率数据进行谱分析可以确定仪器对于高频湍流信号的响应能力。分别选取 2006 年冬季(1 月)和夏季(8 月)夜间原始数据,计算三维风速、虚温以及 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 的功率谱  $S_x(f)$  和协谱  $C_{wx}(f)$ 。功率谱和协谱与频率  $f$  的乘积在半对数坐标中谱函数曲线下的面积与总方差或协方差成正比。如果采用双对数坐标,那么在谱的惯性副区功率  $fS_x(f)$ ,  $fC_{wx}(f)$  与  $(f)$  的幂定律关系都表现为直线,但是曲线线面的面积不再与方差或者协方差成正比<sup>[24]</sup>。双对数坐标是最常用的表示方法,因此下面所有的谱分析都采用双对数坐标。为了避免红噪声的影响,对原始数据(10 Hz 数据)作去倾处理,使用 Matlab 7.0 软件对本站冬季(1 月)和夏季(8 月)功率谱和协谱主要特征进行分析。

功率谱在惯性副区的斜率是评价涡度相关仪器响应能力的重要指标。中等大小的涡既不“感觉”粘滞效应,也不“感觉”湍流动能的生成。这些涡从较大尺度的涡获得其能量,又以同样的方式将其能量传递给较小的涡,能量向谱下游传递的串级率通常是 - 2/3 或者更小<sup>[24]</sup>。图 1, 2 分别为冬季(1 月)和夏季(8 月)杨树人工林风速仪测定的垂直风速、虚温以及红外气体分析仪测定的 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 的功率谱特征曲线。可以看出,垂直风速、虚温、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的功率谱在惯性副区基本符合 - 2/3 斜率,说明本研究所用的三维超声风速仪和红外气体分析仪 Li-7500 具有良好的高频响应能力,能够满足观测的要求。值得注意的是,观测量在接近 10 Hz 的高频段都有显著的突起现象,这是高频噪音,或完全随机的杂乱信号引起的白噪声所导致的,所对应的面积很小,对于湍流通量的测定没有明显影响。此外,CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 以及虚温谱在低频处上翘,可以看出 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 以及虚温谱受到的扰动较大,而垂直风速功率谱几乎没有上翘的趋势。垂直风速谱没有上翘的原因是在稳定边界层内的内波和湍流能量同时存在,此低频域为浮力副区,其涡旋为中等尺度涡旋,由于垂直运动受到稳定性影响,涡是准二维的。

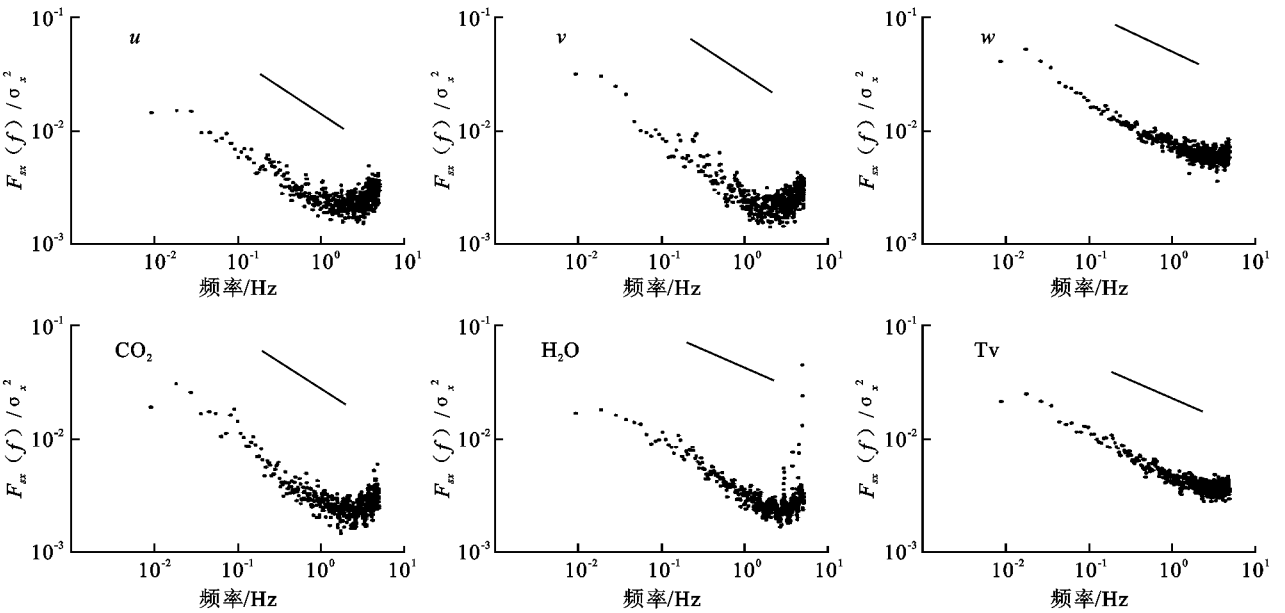


图 1 冬季(1 月)三维风速(  $u$ ,  $v$ ,  $w$  )、虚温(  $T_v$  )、 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  浓度的功率谱

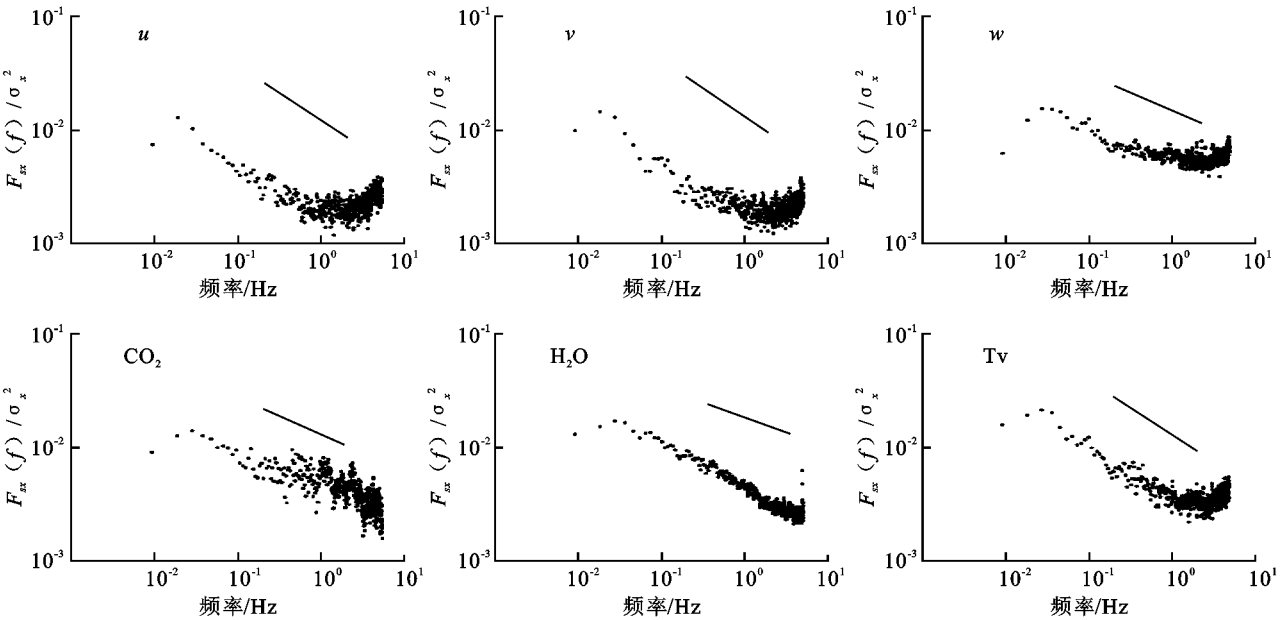


图 2 夏季(8 月)三维风速(  $u$ ,  $v$ ,  $w$  )、虚温(  $T_v$  )、 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  浓度的功率谱

对于湍流通量而言,协谱密度与协方差密切相关,这是因为对协谱振幅的全部频率求和,其值等于两个变量的协方差。将协谱  $C_{wx}(f)$  仍利用两个变量的协方差进行归一化处理,这样就可以确定不同频率的垂直风速和其他变量的对协方差,亦即湍流通量的总体贡献<sup>[24]</sup>。

图 3 和图 4 表明,冬季(1 月)和夏季(8 月)杨树人工林生态系统各湍流通量的协谱在惯性副区的斜率基本都符合  $-4/3$  斜率。功率谱和协谱乘以频率  $f$  可以使谱函数曲线下的面积在半对数坐标下与总方差或协方差成正比,因而可以确定不同频率对湍

流通量的相对贡献。以垂直风速与  $\text{CO}_2$  的协谱为例(图 3,4),图中将数据按等频率  $[\lg(f)]$  平均,可以看出频率大于 1 的高频部分对湍流通量的贡献很小。这说明三维超声风速仪和红外气体分析仪传感器对高频信号响应能力的不足和传感器在空间上的分离没有造成明显的高频通量的损失<sup>[25]</sup>。通常在冠层上方湍流通量测定高度越高,大尺度运动对能量和物质转移的贡献越大,而在较低的测定高度下,高频成分对湍流通量贡献较大,高频损失相对严重<sup>[26]</sup>。但谱分析表明,涡度相关仪器对高频的响应能力是能够满足本观测的要求。

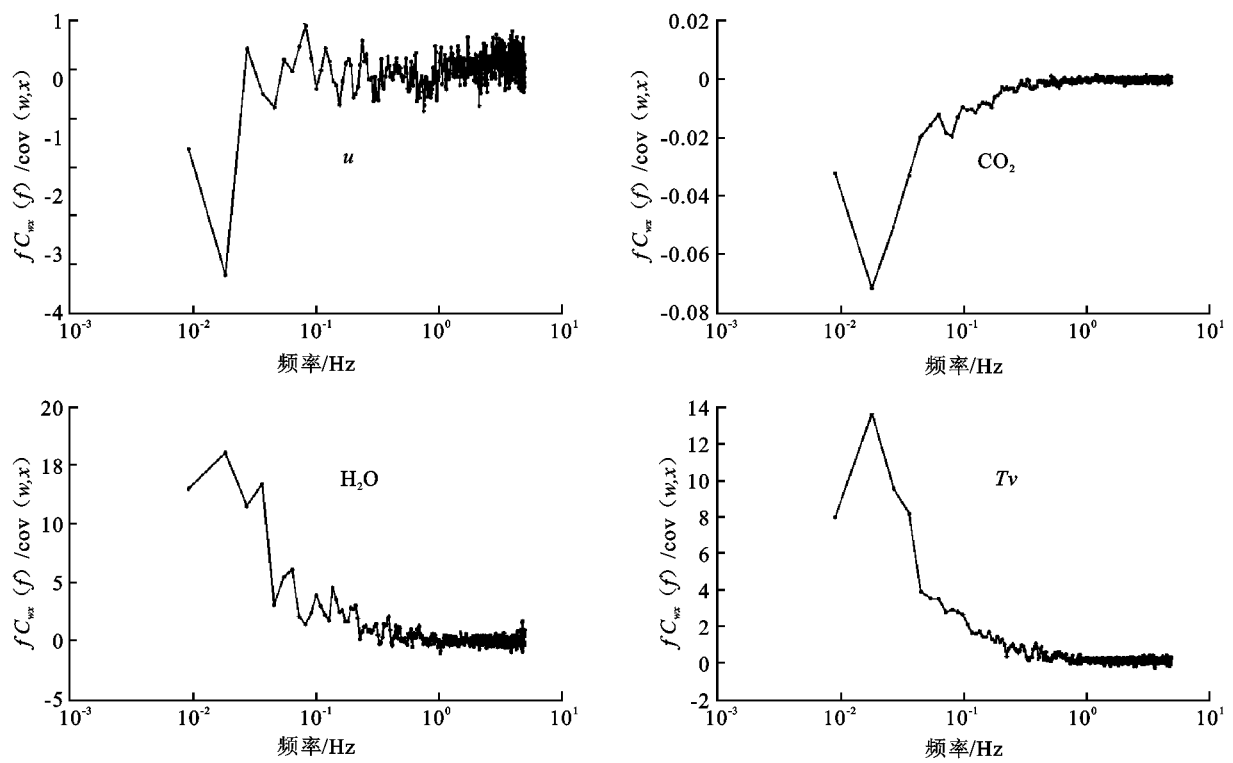


图 3 冬季(1月)半对数坐标下,垂直风速( $w$ )和水平风速( $u$ ),虚温( $T_v$ ), $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 浓度的协谱

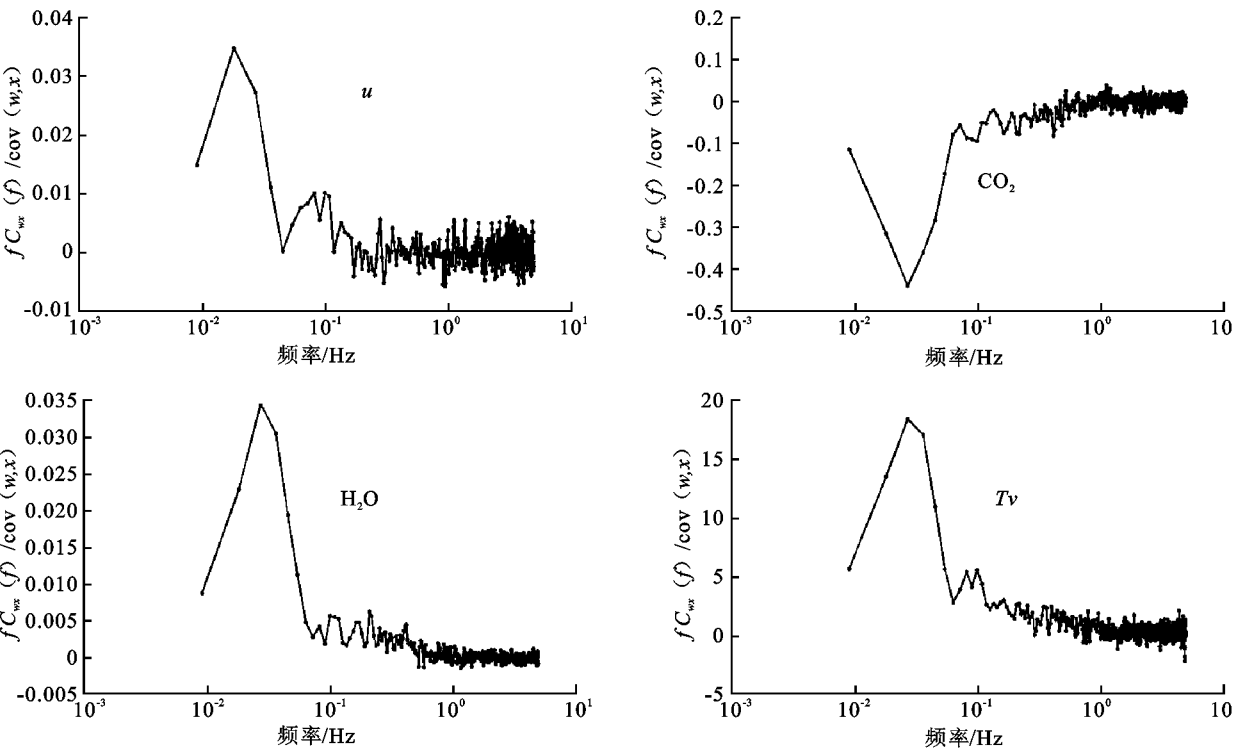


图 4 夏季(8月)半对数坐标下,垂直风速( $w$ )和水平风速( $u$ ),虚温( $T_v$ ), $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 浓度的协谱

综上,涡度相关技术可以应用在湖南岳阳杨树人工林通量观测研究,观测仪器的响应能力满足观测要求,这为进一步长期观测提供理论依据,也为通量数据分析提供了参照标准。

参考文献:

[1] Falge E, Tenhunen J, Baldocchi D, et al. Phase and amplitude of ecosystem carbon release and uptake potentials as derived from FLUXNET measurements[J].

- Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 75-95.
- [2] Gilmanov T G, Soussana J E, Aires L, et al. Partitioning European grassland net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, 121(1/2): 93-120.
- [3] Fu Y L, Yu G R, Wang Y F, et al. Effect of water stress on ecosystem photosynthesis and respiration of a *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49: 196-206.
- [4] Grace J S, Jose J, Meir P, et al. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas [J]. Journal of Biogeography, 2006, 33: 387-400.
- [5] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [6] Baldocchi D D, Finnigan J, Wilson K, et al. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain [J]. Boundary Layer Meteorology, 2000, 96: 257-291.
- [7] 孙晓敏, 温学发, 于贵瑞, 等. 中亚热带季节性干旱对干烟洲人工林生态系统碳吸收的影响[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2006, 36(增刊): 103-110.
- [8] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 等. 干烟洲中亚热带人工林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的季节变异特征[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2006, 36(增刊): 91-102.
- [9] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林 CO<sub>2</sub> 交换的涡动通量修订[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 95-102.
- [10] 王秋凤, 牛栋, 于贵瑞, 等. 长白山森林生态系统 CO<sub>2</sub> 和水热通量的模拟研究[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 131-140.
- [11] 周存宇, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山森林地表 CO<sub>2</sub> 通量及其影响因子的研究[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 175-182.
- [12] 张军辉, 韩士杰, 孙晓敏, 等. 冬季强风条件下森林冠层/大气界面开路涡动相关 CO<sub>2</sub> 净交换通量的 UU 修正[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 77-83.
- [13] 朱治林, 孙晓敏, 袁国富, 等. 非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 37-45.
- [14] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 57-66.
- [15] 任传友, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 冠层尺度的生态系统光合-蒸腾耦合模型研究[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 141-151.
- [16] 宋霞, 于贵瑞, 刘允芬, 等. 开路与闭路涡度相关系统通量观测比较研究[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 67-76.
- [17] 曹明奎, 于贵瑞, 刘纪远, 等. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 1-14.
- [18] 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 气象条件对长白山阔叶红松林 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 103-108.
- [19] 孙晓敏, 朱治林, 许金萍, 等. 涡度相关测定中平均周期参数的确定及其影响分析[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 30-36.
- [20] 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 167-174.
- [21] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 15-29.
- [22] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(China FLUX)能量平衡闭合状况的评价[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 46-56.
- [23] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征[J]. 中国科学: 地球科学(D 辑), 2004, 34(增刊): 84-94.
- [24] Stull R B. 边界层气象学导论[M]. 青岛: 海洋大学出版社, 1988.
- [25] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology [J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 113-175.
- [26] Lee X H, Massman W J, Clement R. Uncertainty in eddy covariance flux estimates resulting from spectral attenuation [C]// Handbook of Micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis. Kluwer Academic Publisher, 2004.