

# 长白山阔叶红松林二氧化碳湍流交换特征\*

吴家兵<sup>1</sup> 关德新<sup>1\*\*</sup> 孙晓敏<sup>2</sup> 施婷婷<sup>1</sup> 韩士杰<sup>1</sup> 金昌杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup> 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 采用开路式涡度相关技术,研究了长白山阔叶红松林森林-大气界面的 CO<sub>2</sub> 湍流交换特征. 结果表明,在近中性大气层结条件下,冠层上方垂直风速和 CO<sub>2</sub> 浓度功率谱在惯性子区基本符合 -2/3 定律,垂直方向主导湍涡尺度约为 40 m. 湍流通量贡献区主要在 0.01 ~ 2 Hz 频率范围内,冠层上方低频传输的湍涡贡献了更多的 CO<sub>2</sub> 通量. 这说明开路式涡度相关仪器系统可以满足冠层上方湍流通量观测的基本要求. 但通过涡度相关法实测获得的森林-大气 CO<sub>2</sub> 通量仍存在夜间低估现象,非湍流过程的增加是涡度相关技术应用的主要制约因素. 因此,需要对弱湍流条件下的 CO<sub>2</sub> 通量做相应的修订.

**关键词** 阔叶红松林 涡度相关法 CO<sub>2</sub> 通量 湍流交换

**文章编号** 1001-9332(2007)05-0951-06 **中图分类号** S716 **文献标识码** A

**CO<sub>2</sub> turbulent exchange in a broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains.** WU Jia-bing<sup>1</sup>, GUAN De-xin<sup>1</sup>, SUN Xiao-min<sup>2</sup>, SHI Ting-ting<sup>1</sup>, HAN Shi-jie<sup>1</sup>, JIN Chang-jie<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(5): 951-956.

**Abstract:** The measurement of CO<sub>2</sub> turbulent exchange in a broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains by an open-path eddy covariance system showed that with near neutral atmospheric stratification, the CO<sub>2</sub> and vertical wind components over canopy in inertial subrange followed the expected -2/3 power law, and the dominant vertical eddy scale was about 40 m. The frequency ranges of eddy contributions to CO<sub>2</sub> fluxes were mostly within 0.01-2.0 Hz, and the eddy translated by low frequency over canopy contributed more of CO<sub>2</sub> fluxes. The open-path eddy covariance system could satisfy the estimation of turbulent fluxes over canopy, but the CO<sub>2</sub> fluxes between forest and atmosphere were generally underestimated at night because the increment of non turbulent processes, suggesting that the CO<sub>2</sub> fluxes estimated under weak turbulence needed to revise correspondingly.

**Key words:** broadleaved and Korean pine forest; eddy covariance method; CO<sub>2</sub> flux; turbulent exchange.

## 1 引言

越来越多的证据表明,人类活动导致的以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体浓度快速增加是全球气候持续变暖的一个重要原因<sup>[2]</sup>. 因此,陆地生态系统碳循环与收支一直是全球变化研究领域关注的焦点问题,相关研究在国内外均已广泛开展<sup>[4,17]</sup>. 以此为背景,作为不同时空尺度上碳交换研究的技术手段,遥感/反

演模型、微气象法、生物与土壤调查法、箱式法和同位素示踪等方法都有应用报道. 而在生态系统尺度,以湍流传输理论为基础的涡度相关技术以其对观测对象扰动小、可直接获得净碳交换信息,以及具有较高精度等优点,成为微气象学家和生态学家普遍认可的一种碳收支研究标准方法,并广为应用. 近年来,该技术开始引入我国,并很快地应用到森林、农田和草地等典型生态系统碳交换研究中,目前相关研究台站/基地已增加到 40 多个,基于涡度相关技术研究的报道大量出现. 但这些报道多关注生态系统在季节或年际尺度上的 CO<sub>2</sub> 通量变化特征及碳收支的量化<sup>[3,19]</sup>,对植被-大气界面处 CO<sub>2</sub> 的湍流

\* 国家自然科学基金项目(30370293, 40675069)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01)和中国科学院沈阳应用生态研究所领域前沿项目共同资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: [guan\\_dexin@126.com](mailto:guan_dexin@126.com)  
2006-06-15 收稿,2007-02-15 接受.

交换过程信息少有涉及。

涡度相关法作为一种微气象学方法,在具体应用时,除了要求满足下垫面均质、平坦,且风浪区长度足够长的条件外<sup>[12]</sup>,还要求上下层大气混合充分.在大气层结稳定甚至为逆温状态时,测量传感器上下方的气体交换主要通过高频湍流甚至分子扩散实现.大气中最小的湍流尺寸不到1 mm,假设垂直风速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相应的仪器频响要达到500 Hz才有可能捕获到这一湍流脉动信号.而目前涡动相关系统的主体设备——红外气体分析仪和三维超声风速仪的频率响应都达不到这一水平,必然有部分高频信号损失.因此,在湍流活动较弱的夜间,通量主要由高频小涡贡献时,实测的涡度相关数据可能存在系统性低估.认识植被-大气界面,特别是具有高大植被的森林-大气界面处 $\text{CO}_2$ 湍流交换特征,对于分析和评价涡度相关实测数据质量,深入理解植被-大气碳交换的过程机制具有重要的参考价值.基于ChinaFLUX通量观测平台的长白山森林通量站具有相对平坦、均质的下垫面,为我们在尽可能小的环境干扰下认识森林-大气 $\text{CO}_2$ 交换特征提供了良好的条件.本文利用开路式涡度相关系统实测资料,分析了长白山阔叶红松林 $\text{CO}_2$ 湍流交换过程,在丰富森林碳循环过程认识的同时,对于森林通量站 $\text{CO}_2$ 数据质量评价也具有一定的借鉴价值.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

本研究在中国科学院长白山森林生态系统定位站1号标准地阔叶红松林内进行( $42^\circ 24' \text{N}$ ,  $128^\circ 6' \text{E}$ , 海拔738 m).观测场附近下垫面均质、平坦,主风方向(西南方向)风浪区长度 $> 5000 \text{ m}$ .土壤为山地暗棕色森林土,主要乔木为红松(*Pinus koraiensis*)、椴树(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木(*Acer mono*)等.林分为复层结构,平均株高26 m,最大叶面积指数约为 $6.0 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ,立木密度约 $560 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ .

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 涡度通量观测

观测场建有高62 m的微气象观测塔,在观测塔40 m(1.5倍林冠高)高处的主风方向铰接一支臂,安装三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Inc., USA)测量垂直风速与空气虚温脉动. $\text{CO}_2$ 与水汽浓度脉动采用开路式红外气体分析仪(Li7500, Li-Cor, USA)测量,脉动信号采样频率为10 Hz.所有数据通过CR5000数据采集器(Campbell

Inc., USA)采集.观测塔配备小气候梯度观测系统,同步进行气象要素观测.数据采集频率为2 Hz,通过CR10X-TD数据采集器(Campbell Inc., USA)每30 min自动记录平均风速、温度、气压、光合有效辐射等常规气象信息.另外,观测塔还配备 $\text{CO}_2$ 浓度7层(2.5、8、22、26、32、50和60 m)廓线系统(Li820, Li-Cor, USA),进行 $\text{CO}_2$ 浓度梯度观测.

### 2.3 数据处理

$\text{CO}_2$ 通量通过垂直风速( $w$ )与 $\text{CO}_2$ 浓度( $c$ )脉动值的协方差 $\overline{w'c'}$ 计算获得,上横线表示通量平均化时间内单元数据平均(通量平均化时间取为30 min).正的通量值表示 $\text{CO}_2$ 从森林向大气传输,负值与之相反.对10 Hz高频脉动时间序列和30 min涡度通量分别做了去倾修订、倾斜修订、WPL修订和频率响应修订.详细修订过程及结果详见文献<sup>[14]</sup>.数据处理与绘图利用MATLAB(MathWorks Inc., USA)完成.

## 3 结果与分析

### 3.1 垂直风速与 $\text{CO}_2$ 浓度脉动特征

在植被冠层近上方的气层中,湍流交换活动活跃,形成大小不同的涡旋.不同涡旋的运动速度和所携带的 $\text{CO}_2$ 气体浓度不同.通过涡与涡在垂直方向的交换,完成森林-大气间 $\text{CO}_2$ 输送过程.图1给出了观测期间(生长季午间)40 m高度CSAT3超声风速仪和Li7500红外气体分析仪在10 s内所捕获的典型垂直风速脉动和 $\text{CO}_2$ 浓度脉动时间序列.从中可以看出,两者均表现为随机的湍流交换过程.以 $\text{CO}_2$ 为例,10 s内其浓度最大振幅接近于 $2 \text{ mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ ,甚至在1 s内就有 $1 \text{ mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ 的浓度脉动.这说明采用10 Hz甚至更高响应频率的涡度相关仪器来捕获涡旋高频脉动的必要性<sup>[10]</sup>.另外,由图1还可以看出,虽然两者脉动均为随机的湍流过程,但由于午间冠层光合吸收作用,向上运动的湍流(垂直风速测量值为正)携带的 $\text{CO}_2$ 浓度明显低于向下运动湍流中 $\text{CO}_2$ 浓度.本研究中,7层 $\text{CO}_2$ 浓度廓线的实测也显示,生长季白天,在涡度相关仪器探头以下,特别是在冠层附近,相对于大气本底浓度,存在 $\text{CO}_2$ 浓度低值区,这是植被光合吸收的结果;晚间,由于植被与土壤的呼吸释放,向上运动的湍流携带的 $\text{CO}_2$ 浓度往往又高于向下运动中湍流携带的 $\text{CO}_2$ 浓度.这是涡度相关法在森林-大气—假界面处对 $\text{CO}_2$ 交换进行实测的理论基础.

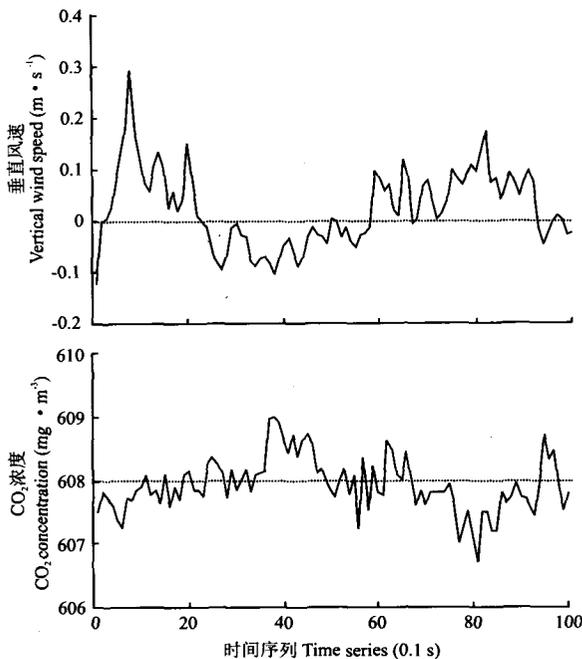


图1 生长季午间冠层上方湍流脉动时间序列

Fig. 1 Time series of turbulent fluctuation above canopy during noon of the growing season.

### 3.2 湍流谱特征分析

湍流谱特征是描述脉动量的方差在不同尺度或频率域湍流上的分布。湍流分量能谱或协谱分析能够揭示不同尺度湍流对涡度通量相对贡献的大小。为了评价开路式湍度相关仪器系统对高频湍流信号的响应能力,同时获得  $\text{CO}_2$  在冠层上湍流交换的物理结构信息,对实测垂直风速和  $\text{CO}_2$  浓度脉动序列的功率谱和协谱特征进行了分析。利用 Welch 方法计算垂直风速和  $\text{CO}_2$  浓度脉动时间序列的功率谱和协谱。进行谱分析所采用的数据为去倾后的 30 min 高频实时数据。功率谱和协谱的平均谱密度都乘自然频率项。其中,功率谱通过变量本身的方差进行标准化,而协谱则是利用两个变量协方差的绝对值进行标准化。

功率谱分析的两个突出的特征就是斜率和谱峰。在近地边界层内小尺度湍流是各向同性的,湍流谱满足莫宁-奥布霍夫相似理论。大气湍流中存在一个惯性副区,在该区能量只是从大的涡旋传递给较小的涡旋,能量即不产生也不消耗,而是遵循对数频谱的  $-2/3$  定律,由低频向高频惯性传递。相应地,湍流变量功率谱在惯性副区内的斜率对于评价湍度相关仪器系统对不同频率湍流信号的响应能力具有重要的意义。由图 2 可以看出,用双对数坐标作图时,在近中性条件下,0.01 ~ 10 Hz 频率范围内  $\text{CO}_2$

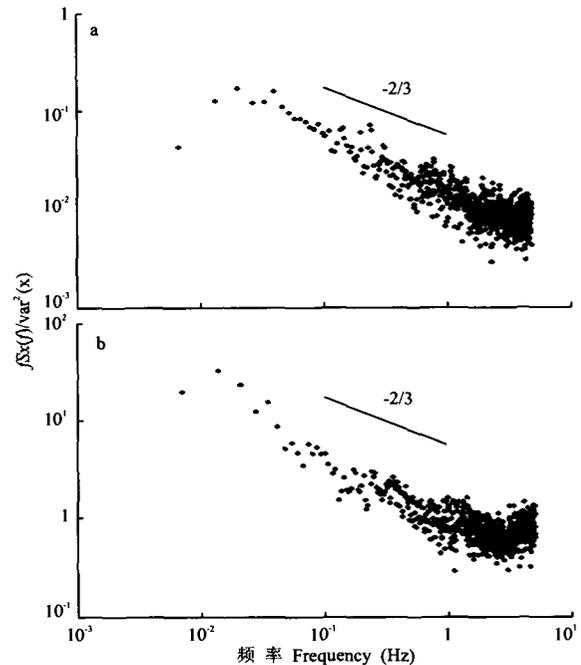


图2 开路式湍度相关系统实测的垂直风速(a)和  $\text{CO}_2$  浓度(b)脉动序列功率谱

Fig. 2 Power spectrums of vertical wind speed (a) and  $\text{CO}_2$  concentration (b) time series measured by OPEC system (at 13:00 of 17 September, 2003).

气体浓度和三维风速功率谱在惯性子区基本符合  $-2/3$  定律,且两者具有相似的谱能降低速率。这与 Kaimal 等<sup>[6]</sup>实验的结果有很好的 consistency。它说明 CSAT3 三维超声风速仪和 Li7500 红外线  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  气体分析仪对垂直风速分量和  $\text{CO}_2$  浓度脉动信号的响应能力能够满足冠层上方湍流观测要求。另外,当频率大于 2 Hz 时, Li7500 气体分析仪实测的  $\text{CO}_2$  气体浓度信号谱呈烟斗状上翘,可能是由于仪器的噪声所引起的。由于高频端的曲线下面积很小,对湍流通量测定不会有明显的影响<sup>[13]</sup>。这也证实了长白山通量观测站尾流等环境干扰效应较小。

由图 2 可以看出,功率谱的峰值特征也非常明显。 $\text{CO}_2$  浓度脉动序列谱峰值频率( $f_m$ )出现在 0.01 ~ 0.02 Hz 之间,而垂直风速脉动序列谱峰值出现频率约为 0.02 Hz 左右。参考刘和平等<sup>[8]</sup>报道的长白山阔叶红松林的零平面位移  $d$  (19.5 m),根据研究时段的平均风速(约为  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),可得到垂直方向风速谱的无因此频率峰值  $f_m$  约为 0.2,而垂直方向的主导涡旋尺度  $L_m$  约为 40 m ( $L_m = (Z - d)/f_m$ , 式中  $Z$  为观测高度)。这一结果相对较低,如余锦华等<sup>[18]</sup>对农田垂直速度谱的峰值频率研究值为 0.4 左右,马耀明等<sup>[9]</sup>对近海面垂直速度谱的峰值

频率研究值为 0.6 左右. 表明森林  $Sw(f)$  包含更多的低频涡旋, 湍流尺度较其它下垫面类型 (如农田、草原和旷野) 大得多. 另外, 由图 2 还可以看出, 垂直风速功率谱惯性副区频率开始于 0.04 Hz 附近, 而  $CO_2$  浓度序列功率谱开始于 0.02 Hz 左右.

对于湍流通量来说, 协谱密度与协方差密切相关<sup>[5,11]</sup>. 协谱分析可以确定不同频率的垂直风速  $w$  和  $CO_2$  浓度  $c$  对协方差也就是湍流通量的总体贡献. 在半对数坐标中, 协谱曲线下面积与垂直风速和  $CO_2$  浓度间的协方差成比例, 据此可以确定不同频率对  $CO_2$  湍流通量总贡献的大小. 由图 3 可以看出, 频率大于 2 Hz 的小尺度湍流运动对湍流通量贡献很小, 湍流通量贡献区主要在 0.01 ~ 2 Hz 频率范围内. 这与前文对垂直风速和  $CO_2$  浓度功率谱的分析结果基本一致. 说明开路式涡度相关仪器系统, 即三维超声风速仪和红外线  $CO_2/H_2O$  气体分析仪传感器响应能力的差异以及物理空间的分离造成的高频通量损失非常小<sup>[1]</sup>. 这可能与森林具有粗糙的下垫面有关. Lee<sup>[7]</sup> 的研究也表明, 观测较高植被时, 冠层上方低频传输的湍涡贡献了更多的  $CO_2$  通量.

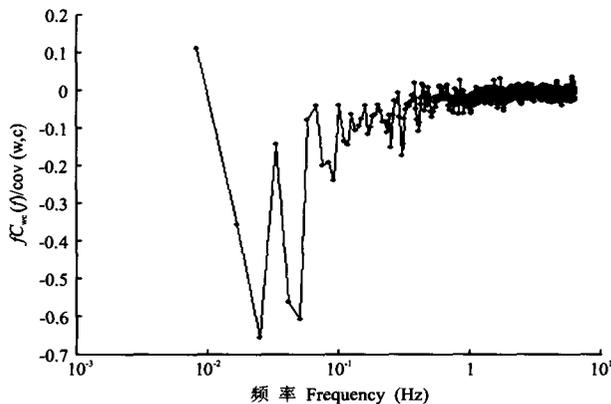


图 3 开路式涡度相关系统实测的垂直风速和  $CO_2$  浓度脉动序列协谱

Fig. 3 Cospectrums of vertical wind speed and  $CO_2$  concentration time series measured by OPEC system at 13:00 of 17 September, 2003.

### 3.3 $CO_2$ 湍流通量特征

森林-大气间  $CO_2$  通量是生态系统各个组分 (土壤、植被和凋落物等组成分量) 呼吸释放和光合吸收综合作用的结果. 大量的研究显示, 晚间生态系统呼吸释放主要受温度或湿度的控制, 如 Wu 等<sup>[16]</sup> 报道生态系统呼吸强度与土壤温度间呈指数正相关. 因此, 在短时间尺度内, 若温、湿度等环境条件变化不大, 森林的生物学碳源/汇强度也应该相对恒定. 但图 4 给出的长白山阔叶红松林实测数据显示,

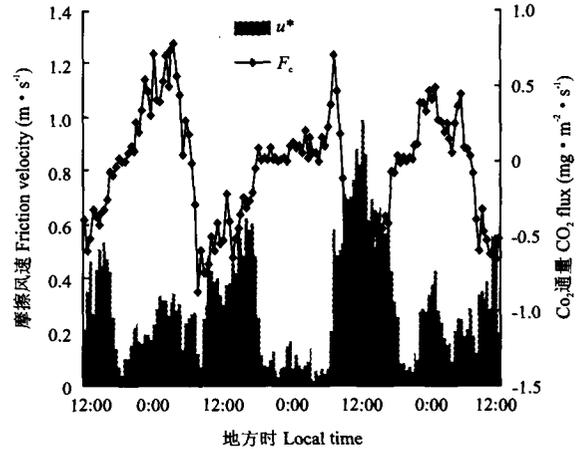


图 4 摩擦风速与  $CO_2$  通量日变化过程

Fig. 4 Diurnal courses of friction velocity and  $CO_2$  fluxes (August 17–20, 2004).

晚间 (日落后 1 h 至日出前 1 h)  $CO_2$  通量存在较大的振幅, 峰值约为  $0.78 \text{ mg } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而最小值不到  $0.01 \text{ mg } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 其变化过程与表征大气湍流交换强度的摩擦风速  $u^*$  之间有相似的趋势. 在  $u^*$  较小时, 晚间通量观测值也相对较小. 如 8 月 18–19 日夜间, 在日出以前,  $u^*$  最大不超过  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 显著小于临近观测日, 而期间  $CO_2$  通量明显偏小. 另外, 在 8 月 20 日 2:00–4:00 间,  $u^*$  值较小, 大气层结相对稳定, 对应的  $CO_2$  通量也存在一个明显低值区. 8 月 17–20 日间土壤观测资料显示, 5 cm 和 20 cm 深土壤湿度基本无变化, 晚间 5 cm 深温度变幅也不超过  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . 这说明期间植被和土壤源强变化不会太大, 但晚间  $CO_2$  通量却有数十倍的振幅. 由图 5 进一步证实, 晚间  $CO_2$  通量随着  $u^*$  的增大而增大; 在  $u^*$  值小于  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 涡度相关法实测的  $CO_2$  通量明显存在低估现象. 但在白天, 光合吸收速率与  $u^*$  间并没有明显的规律可寻. 值得注意的是,  $CO_2$  通量高值多出现在  $u^*$  值为  $0.2 \sim 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 而在  $u^*$  继续增加后,  $F_c$  趋于一渐进值 (约为  $0.3 \text{ mg } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 不再增加. 结合图 4 中  $F_c$  随  $u^*$  的变化趋势可以推断出, 期间  $F_c$  高值主要是由于林下积聚的  $CO_2$  随风速增大, 空气扰动增强, 出现的一快速释放过程. 如 8 月 17 日 21:30–23:30 之间,  $u^*$  一直低于 0.2, 虽然至 0:00 时  $u^*$  增加不多 ( $0.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 但当打破大气层节稳定的临界值 ( $u^* \approx 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[3]</sup>) 后, 林下积聚的  $CO_2$  会有一明显的倾泻过程发生<sup>[15]</sup>. 因此有时也会出现摩擦速度较低,  $CO_2$  通量却突然增加的现象.

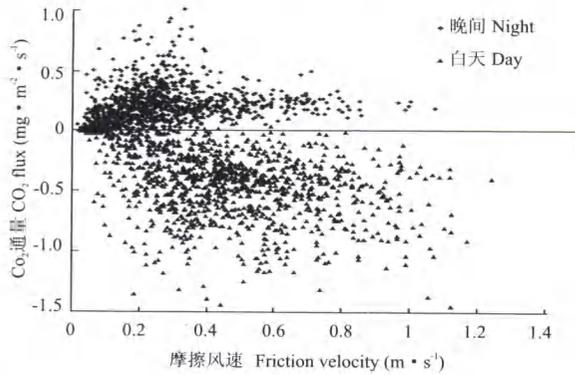


图5 CO<sub>2</sub> 通量与摩擦风速关系

Fig. 5 Relationship of CO<sub>2</sub> fluxes and friction velocity (July and August, 2004).

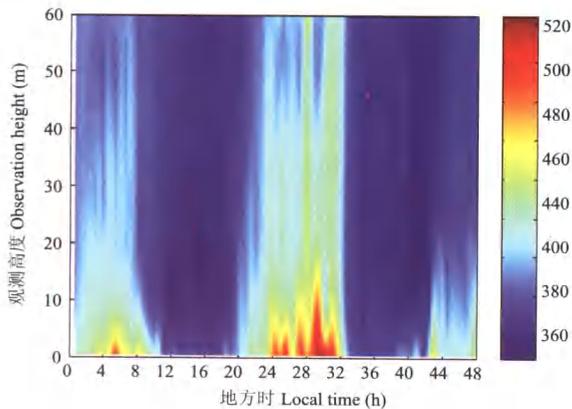


图6 林内 CO<sub>2</sub> 浓度演化图

Fig. 6 Spatial-temporal evolution of CO<sub>2</sub> concentration in forest (August 19–20, 2004).

根据质量守恒定律,在森林-大气 CO<sub>2</sub> 交换满足垂直向的一维传输模式时(即在水平方向无平流和泻流发生),在冠层上方观测界面处,CO<sub>2</sub> 通量过程除了受控于植物的光合与呼吸,以及土壤微生物的生物学活性外,还与传感器高度以下,特别是冠层以下 CO<sub>2</sub> 的蓄积和释放密切相关.而这一过程直接反映在林内 CO<sub>2</sub> 浓度的变化上.图 6 为 7 层廓线系统实测的 CO<sub>2</sub> 浓度在时间和空间上的演化图.从中可以看出:CO<sub>2</sub> 浓度通常在 4:00—5:00 时最高,而此时正是林内逆温层开始打破的日出前后;5:00—6:00,各层 CO<sub>2</sub> 浓度均迅速降低,平均降幅可达 30 μmol · mol<sup>-1</sup>,冠层下方积聚的 CO<sub>2</sub> 有倾泻现象;8:00—16:00 之间,CO<sub>2</sub> 浓度持续降低.但在垂直方向的浓度梯度相对较小,只在冠层附近有一不太明显的低值区,说明白天 CO<sub>2</sub> 浓度廓线具有较好的混合特征;日落后,林内各层 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐升高,近地层 CO<sub>2</sub> 浓度变化尤为显著.表明森林-大气 CO<sub>2</sub> 交换主要表现为土壤的呼吸释放过程.

## 4 结 语

对长白山阔叶红松林森林-大气界面 CO<sub>2</sub> 的湍流交换特征研究显示,在近中性层结大气条件下,冠层上方垂直风速和 CO<sub>2</sub> 浓度功率谱在惯性子区基本符合 -2/3 定律,垂直方向主导湍涡尺度约为 40 m.协谱分析表明,湍流通量贡献区主要在 0.01 ~ 2 Hz 频率范围内,冠层上方 CO<sub>2</sub> 湍流通量主要由低频传输的湍涡贡献.而观测系统的主体部分——Li7500 红外气体分析仪和 CSAT3 三维超声风温仪的最高采样频率都可以达到 10 Hz.这说明开路式湍度相关仪器系统可以满足冠层上方湍流通量观测的基本要求.

由湍度相关技术获得的森林-大气 CO<sub>2</sub> 通量仍存在夜间低估现象,主要是由于夜间林内大气多中性稳定,甚至处于逆温状态.此时,湍流交换变弱,森林-大气 CO<sub>2</sub> 交换不再满足一维传输模式,而变为二维或三维,导致水平与垂直平流以及分子扩散增加.而传统的湍度相关仪器系统并不能捕捉到这种非湍流运动过程.因此,非湍流过程的增加是湍度相关技术应用中的主要制约因素.此时,需要对弱湍流条件下的 CO<sub>2</sub> 通量做相应的修订.长白山通量观测站适宜的摩擦风速  $u^*$  临界值约为 0.2 m · s<sup>-1</sup>.

## 参考文献

- [1] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The Euroflux methodology. *Advance in Ecological Research*, **30**: 113–175
- [2] Chai Y-C (柴育成), Zhou G-S (周广胜), Zhou L (周莉), et al. 2004. The Global Carbon Project. No. 1. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese)
- [3] Guan DX, Wu JB, Yu GR, et al. 2005. Meteorological control on CO<sub>2</sub> flux above broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains. *Science in China Series D*, **48**(supp. 1): 116–122
- [4] Huang Y (黄耀). 2002. Study on carbon budget in terrestrial and marginal sea ecosystems of China. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences* (中国科学院院刊), (2): 104–107 (in Chinese)
- [5] Kaimal JC, Finnigan JJ. 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows; Their Structure and Measurement. New York: Oxford University Press.
- [6] Kaimal JC, Wyngaard JC, Izumi Y, et al. 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, **98**: 563–589
- [7] Lee XH. 1998. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural*

- and Forest Meteorology*, **91**: 39-49
- [8] Liu H-P (刘和平), Liu S-H (刘树华), Zhu T-Y (朱廷耀), *et al.* 1997. Determination of aerodynamic parameters of Changbai Mountains forest. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报·自然科学版), **33**(4): 522-528 (in Chinese)
- [9] Ma Y-M (马耀明), Wang J-M (王介民), Liu W (刘巍), *et al.* 1997. The study of the characteristics of both the atmospheric turbulence structure and the transfer in the lower layer of the atmosphere above the Nansha Islands area. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), **21**(3): 357-366 (in Chinese)
- [10] Moore CJ. 1996. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary Layer Meteorology*, **37**: 17-35
- [11] Stull RB. 1988. *An Introduction To Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- [12] Wen X-F (温学发), Yu G-R (于贵瑞), Sun X-M (孙晓敏). 2004. Uncertainties in long-term studies of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange with the atmosphere based on eddy covariance technique. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), **19**(4): 658-664 (in Chinese)
- [13] Wen XF, Yu GR, Sun XM, *et al.* 2005. Turbulence flux measurement above the overstory of a subtropical *pinus* plantation over the hilly region. *Science in China Series D*, **48**(supp. 1): 63-73
- [14] Wu J-B (吴家兵), Guan D-X (关德新), Sun X-M (孙晓敏), *et al.* 2004. Eddy flux corrections for CO<sub>2</sub> exchange in broadleaved Korean mixed forest of Changbai Mountains. *Science in China Series D* (中国科学·D辑), **34**(supp. 2): 95-102 (in Chinese)
- [15] Wu J-B (吴家兵), Guan D-X (关德新), Zhao X-S (赵晓松), *et al.* 2005. CO<sub>2</sub> concentration character in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, (应用生态学报), **16**(1): 49-53 (in Chinese)
- [16] Wu JB, Guan DX, Wang M, *et al.* 2006. Year-round soil and ecosystem respiration in a temperate broad-leaved Korean pine forest. *Forest Ecology and Management*, **223**(1-3): 35-44
- [17] Yu GR, Zhang LM, Sun XM, *et al.* 2005. Advances in carbon flux observation and research in Asia. *Science in China Series D*, **48**(supp. 1): 11-16
- [18] Yu J-H (余锦华), Liu J-M (刘晶森), Ren J (任健). 2001. Turbulent features near the surface over the Yangtze delta. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (南京气象学院学报), **24**(4): 536-544 (in Chinese)
- [19] Zhou C-Y (周存宇), Zhou G-Y (周国逸), Zhang D-Q (张德强), *et al.* 2004. CO<sub>2</sub> efflux from different forest soils and impact factors in Dinghu Mountain, China. *Science in China Series D* (中国科学·D辑), **34**(supp. 2): 175-182 (in Chinese)

---

作者简介 吴家兵,男,1977年生,博士,副研究员。主要从事生态气候研究,发表论文30余篇。E-mail: bjfu\_1999@hotmail.com

责任编辑 李凤琴

---