

# 安吉毛竹林生长季 CO<sub>2</sub> 浓度的时空特征

陈晓峰<sup>1</sup> 江洪<sup>1,2\*</sup> 孙文文<sup>1</sup> 舒海燕<sup>3</sup> 方成圆<sup>1</sup> 孙恒<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 浙江农林大学国际生态研究中心, 杭州 311300; <sup>2</sup> 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; <sup>3</sup> 西南大学生命科学学院三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

**摘要** 试验采用 7 层 CO<sub>2</sub> 廓线系统对安吉毛竹林生长季(5—10 月) CO<sub>2</sub> 浓度进行连续监测, 同时结合同步 CO<sub>2</sub> 通量和气象资料, 分析安吉毛竹林 CO<sub>2</sub> 浓度的时空动态和 CO<sub>2</sub> 储存通量的变化特征。结果表明: 安吉毛竹林生长季 CO<sub>2</sub> 浓度表现出明显的日变化、季节变化和垂直梯度。日尺度上, CO<sub>2</sub> 浓度在日出前后达到最大, 随后出现一段快速释放过程, 午后达到全天最低值; 整个生长季尺度上, 7 月份林间 CO<sub>2</sub> 浓度最低(368.1 μmol · mol<sup>-1</sup>), 10 月份最高(402.6 μmol · mol<sup>-1</sup>); 垂直梯度方面, 林冠上层 CO<sub>2</sub> 垂直梯度明显小于林冠层和林冠下层; 林冠层和林冠上层垂直梯度变化趋势较为一致, 白天均为正值, 呈现为碳汇, 夜间为负值, 呈现为碳源, 林冠下层 CO<sub>2</sub> 梯度全天均为负值。利用廓线系统计算毛竹林 CO<sub>2</sub> 储存通量, 半小时和日尺度上, CO<sub>2</sub> 储存通量分别占净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量(NEE)的 25.5% 和 8.9%, 而在月尺度上仅占 NEE 的 0.22%。因此, 在半小时及日尺度上计算 NEE 时不可忽略 CO<sub>2</sub> 储存通量, 而在计算月尺度及更长时间尺度 NEE 时可以忽略 CO<sub>2</sub> 储存通量。

**关键词** CO<sub>2</sub> 廓线; 涡动相关法; CO<sub>2</sub> 储存通量; 垂直梯度

**Spatiotemporal characteristics of CO<sub>2</sub> concentration in *Phyllostachys edulis* forest in Anji during growing season.** CHEN Xiao-feng<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>1,2\*</sup>, SUN Wen-wen<sup>1</sup>, SHU Hai-yan<sup>3</sup>, FANG Cheng-yuan<sup>1</sup>, SUN Heng<sup>1</sup> (<sup>1</sup> International Ecological Research Center of Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China; <sup>2</sup> International Earth System Scientific Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, China; <sup>3</sup> Ministry of Education Key Laboratory of Eco-environments of Three Gorges Reservoir Region, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China).

**Abstract:** The CO<sub>2</sub> concentration of *Phyllostachys edulis* forest ecosystem during the growing season (from May to October) was continuously measured using a 7-layer profile system in Anji, Zhejiang Province in 2011. The synchronized CO<sub>2</sub> flux and meteorological data were applied to explore the temporal and spatial variations in the CO<sub>2</sub> concentration and CO<sub>2</sub> storage flux. The results showed that the CO<sub>2</sub> concentration of *P. edulis* forest during the growing season exhibited obvious diurnal and seasonal variations, as well as vertical variations. In a single day, the CO<sub>2</sub> concentration reached the maximum value at the daybreak, and decreased to the minimum value in the afternoon after a rapid emission process. In the entire growing season, the minimum CO<sub>2</sub> concentration of the forest appeared in July (368.1 μmol · mol<sup>-1</sup>), and the maximum one emerged in October (402.6 μmol · mol<sup>-1</sup>). What's more, the CO<sub>2</sub> vertical gradients above the canopy were lower than those in and below the canopy. The vertical gradients in and above the canopy showed a consistent variation trend: positive in the daytime (carbon sink) and negative at night (carbon source). However, the CO<sub>2</sub> vertical gradients below the canopy were negative throughout the day. We found the proportion of the CO<sub>2</sub> storage flux obtained from the profile system to net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) was 25.5% and 8.9% at a half-hour and daily scale, respective-

ly, but was only 0.22% at a monthly scale. The results suggested that CO<sub>2</sub> storage flux could not be neglected when NEE was estimated at a half-hour or daily scale, but could be ignored at a monthly or longer time scale.

**Key words:** CO<sub>2</sub> profile; eddy covariance; CO<sub>2</sub> storage flux; vertical gradient.

自工业革命以来,大气 CO<sub>2</sub> 等温室气体浓度持续上升,导致全球变暖,进而引发一系列的气候变化。森林作为陆地生态系统的主体,在全球碳循环过程中起到非常重要的作用,一方面森林生态系统的光合与呼吸过程会影响 CO<sub>2</sub> 浓度(Canadell *et al.*, 2000),另一方面,林冠层 CO<sub>2</sub> 浓度时空变化又是影响森林植被生产力的重要因素(Osborne *et al.*, 1997)。目前,涡度相关法被公认为是长期测定森林生态系统与大气间碳交换的最可靠方法(Goulden *et al.*, 1996),近年来我国采用涡度相关技术在热带季雨林(Zhang *et al.*, 2006, 2010)、温带森林(吴家兵等, 2007; 周丽艳等, 2010)、亚热带森林(Liu *et al.*, 2006; 孙成等, 2013)等多种森林生态系统进行了大范围连续观测,并取得了一系列的研究进展。而生态系统尺度 CO<sub>2</sub> 浓度时空变化的观测与分析又是对涡度相关法通量观测的重要补充,一方面研究 CO<sub>2</sub> 浓度变化可以更深入了解森林生态系统内部的 CO<sub>2</sub> 循环(Kondo *et al.*, 2005),另一方面 CO<sub>2</sub> 浓度廓线法也是研究森林 CO<sub>2</sub> 储存通量的基础方法之一(张弥等, 2010),此外,该研究还可以为森林生态系统生产力研究提供环境参数。国外对森林 CO<sub>2</sub> 浓度特征方面的研究起步较早,形成了大量研究成果(Brooks *et al.*, 1997; Osborne *et al.*, 1997; Norasada *et al.*, 1998),而在国内,蒋高明等(1998)对落叶阔叶林 CO<sub>2</sub> 浓度进行观测与分析;陈步峰等(2001)对海南热带山地雨林 CO<sub>2</sub> 浓度进行观测分析,得出雨季与旱季差异的结论;焦振等(2011)的观测研究得出温带落叶阔叶林在日尺度上 CO<sub>2</sub> 呈“单峰”曲线;谭正洪等(2008)研究得出西双版纳热带季节雨林近地层 CO<sub>2</sub> 具有“双峰”格局。而考虑到前期研究方法与实验仪器的差异,且森林类型的多样性,对于森林生态系统 CO<sub>2</sub> 浓度特征仍有必要做进一步的研究。

毛竹林是我国重要的森林资源,对比于其他森林类型,毛竹林具有固碳能力强、生长速度快及生产周期短等特点,具有重要生态价值(周国模, 2006; 孙成等, 2013)。长江以南,分布着世界上 85% 的毛竹,研究区浙江省安吉县更是素有“毛竹之乡”的美

誉。此外,在生长季,毛竹的光合作用较旺盛,使得森林碳吸收增强,很大程度上影响了毛竹林生态系统全年的碳源/汇强度。本研究利用研究区内通量塔的 7 层 CO<sub>2</sub> 廓线系统和涡度系统对安吉亚热带毛竹林生态系统生长季(固碳量最高的 5—10 月份)CO<sub>2</sub> 浓度和碳通量进行长时间观测,并对 CO<sub>2</sub> 浓度的空间与时间变化进行初步分析,同时研究了 CO<sub>2</sub> 储存通量的变化特征,为完善毛竹林生态系统碳循环研究提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地位于浙江省安吉县山川乡,地理坐标 30°28'34.5" N, 119°40'25.7" E。该地区属典型的亚热带季风气候,四季分明,地区年平均气温达 16.6 °C,生长季平均气温为 21.9 °C,1 月份温度最低,7 月份温度最高,年平均降水量为 761~1780 mm,降雨多集中在夏季,6 月至 7 月初为梅雨季节,年平均空气湿度在 70% 以上。观测塔海拔 380 m,下垫面坡度为 2.5°~14.0°,坡向北偏东 8°,土壤类型为黄壤土。通量塔周围植被类型以毛竹为主,均采用粗放式经营,其中 3~6 a 生竹为主体,林下只有极少量草本与灌木,研究区竹林面积 2155 hm<sup>2</sup>,其中毛竹林占总面积的 78.6%。区内毛竹高 13~20 m,枝下高为 10~17 m,胸径 12~18 cm,冠幅 3.0 m×2.5 m,郁闭度达 0.9。区内毛竹有大小年之分,2011 年为竹林大年,表现为 3—5 月大量发笋,5 月底新竹开始抽叶,6 月份叶片大量展开,7—9 月份为主要生长季,10 月份为生长季末期。

### 1.2 观测仪器设置

观测区内通量观测塔高 40 m,在 1、7、11、17、23、30 和 38 m 处分别布设 CO<sub>2</sub> 浓度廓线系统进气口,进气口处安装 3 μm 滤膜除尘,CO<sub>2</sub> 浓度采用二氧化碳及水气分析仪(LI-840, Li-Cor Inc., USA)进行测定。分析仪设定每天自动标定一次,标定气体为高纯 N<sub>2</sub> 和标准 CO<sub>2</sub> 气体(499 μmol·mol<sup>-1</sup>)。利用真空泵(DOA-V502A-FD, Gast Manufacturing Inc., USA)将气体抽入气瓶中,再通过阀门控制,将对应

层气体分别送入分析仪进行分析,每层历时 15 s,前 7 s 为清洗管路时间,后 8 s 为气体测定时间,一个采样周期为 2 min。分析仪再将数据输出到数据采集器(CR1000, Campbell Inc., USA)中,通过采集器每 30 min 自动输出各层的 CO<sub>2</sub> 浓度平均值。

开路涡度相关系统探头安装在观测塔 38 m 高度上,包括开路 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(Li-7500, LiCor Inc., USA)和三维超声风速仪(CAST3, Campbell Inc., USA),原始采样频率 10 Hz,通过数据采集器(CR1000, Campbell Inc., USA)储存数据,并在线计算和存储 30 min CO<sub>2</sub> 通量( $F_c$ )、潜热通量( $LE$ )和显热通量( $HS$ )等相关物理量。观测塔配备 7 层气象梯度观测系统,利用数据采集器(CR1000, Campbell Inc., USA)每 30 min 自动记录空气温度与湿度、风速(1、7、11、17、23、30、38 m)、土壤温度、土壤含水量(5、50、100 cm)、光合有效辐射以及净辐射(38 m)等气象信息。涡度系统及气象梯度仪器设备详情可参考孙成等(2013)和刘玉莉等(2014)相关研究报道。

### 1.3 数据处理

净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量( $NEE$ )由下式计算:

$$NEE = F_c + F_s \quad (1)$$

式(1)中: $F_c$ 为 CO<sub>2</sub> 湍流通量,根据涡度相关系统测出, $F_s$ 为涡度相关仪器观测高度以下的 CO<sub>2</sub> 储存通量,单位均为 mg CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>;  $NEE$  为负值表示生态系统净吸收大气 CO<sub>2</sub>,当  $NEE$  为正值则表示生态系统为净排放 CO<sub>2</sub>。

由于廓线系统输出的 CO<sub>2</sub> 浓度单位为 μmol · mol<sup>-1</sup>,为了在计算 CO<sub>2</sub> 储存通量时与涡度相关系统所得的  $NEE$  单位相一致,需将单位 μmol · mol<sup>-1</sup> 转换为 mg · m<sup>-3</sup>,转换公式如下(姚玉刚等,2011):

$$Unit1 = Unit2 \frac{44P}{8.314(t+273.15)} \quad (2)$$

公式(2)中: $Unit1$  单位是 mg · m<sup>-3</sup>,  $Unit2$  单位为 μmol · mol<sup>-1</sup>,  $P$  为实际大气压(kPa),而  $t$  代表观测点所在高度气温(°C),各数值均为相同时刻 30 min 平均值。

利用廓线法所得的 CO<sub>2</sub> 储存通量  $F_{s-p}$ (mg CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)由下式得出:

$$F_{s-p} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \bar{c}_i}{\Delta t} h_i \quad (3)$$

式(3)中, $i$ 为观测层数(1~38 m 共 7 层), $h_i$ 为  $i$  层与下层( $i-1$ )间隔距离(m), $\Delta \bar{c}$ 为各层间 CO<sub>2</sub> 平均

浓度(mg · m<sup>-3</sup>)前后两次相邻时间的差值, $\Delta t$ 为前后两次测定时间间隔(s),本研究中取 30 min。

通过 CO<sub>2</sub> 廓线系统对毛竹林 CO<sub>2</sub> 浓度的长期监测,得出毛竹林各层 CO<sub>2</sub> 浓度均在 300~600 μmol · mol<sup>-1</sup>,因此,取 300~600 μmol · mol<sup>-1</sup>为 CO<sub>2</sub> 浓度的正常变化区间,对该区间以外的数据进行剔除。在剔除后数据中,数据缺失时段 ≤ 3 h 时采用线性内插法来估计 30 min CO<sub>2</sub> 浓度值;缺失时段 > 3 h 时,认为该日数据缺失,采用日平均值时间序列的线性内插来估计该日平均值。涡动系统数据质量控制方法详情参见孙成等(2013)相关研究。

为详细分析竹林内部 CO<sub>2</sub> 扩散机制,将竹林根据冠层高度和枝下高将其分为 3 个层次来研究 CO<sub>2</sub> 的垂直梯度  $G_{[CO_2]}$ (μmol · mol<sup>-1</sup> · m<sup>-1</sup>)。

$$G_{[CO_2]} = \frac{\Delta[CO_2]}{\Delta z} \quad (4)$$

式(4)中, $\Delta[CO_2]$ 为同时刻上层与下层 CO<sub>2</sub> 浓度差, $\Delta z$ 为高度差。当垂直梯度为正表示高出 CO<sub>2</sub> 浓度较高。设定 3 个层次分别为林冠下层(1~11 m,  $G_{UC}$ )、林冠层(11~23 m,  $G_{WC}$ )和林冠上层(23~38 m,  $G_{AC}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化

安吉毛竹林自 5 月底新竹抽叶开始至 10 月份结束为其主要生长季,将生长季内每个月相同时刻各层 CO<sub>2</sub> 浓度值进行平均处理,得到毛竹林生长季各层 CO<sub>2</sub> 浓度的月平均日变化。如图 2 可以看出,不同月份和高度的 CO<sub>2</sub> 浓度日变化均呈“U”型。各层 CO<sub>2</sub> 浓度均在日出前后 1 h 达到最高,随后有一个快速降低的过程。日出后,伴随着光合有效辐射的增强,毛竹光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 能力也显著增强。受两者影响,林内 CO<sub>2</sub> 浓度不断降低,在午后 14:00—16:30 达到最低值(7 月份最低值达到 352.4 μmol · mol<sup>-1</sup>);随后受到光合有效辐射持续降低的影响,竹内 CO<sub>2</sub> 浓度有一定上升趋势。在日落后,植被光合作用停止,受逆温层的影响,空气湍流减弱,植被与土壤呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 在林内堆积,CO<sub>2</sub> 浓度逐渐升高。

毛竹林生长季各层 CO<sub>2</sub> 的日变化格局也具有明显的月份差异(图 2)。以冠层 17 m 高度 CO<sub>2</sub> 浓度为例,在生长季初期的 5 月份其日变幅为 22.9

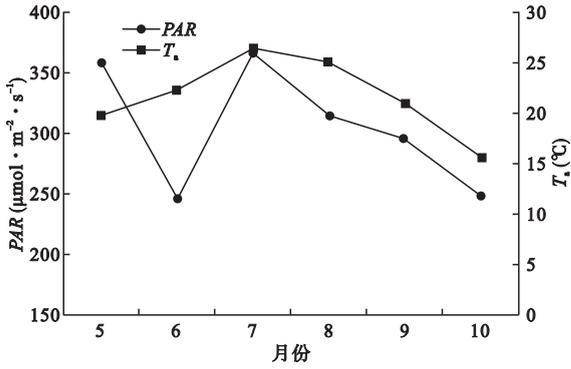


图 1 2011 年安吉毛竹林生长季月平均光合有效辐射 PAR 和空气温度 T<sub>a</sub> 的变化特征

Fig.1 Variations of monthly mean photosynthetically active radiation (PAR) and air temperature (T<sub>a</sub>) in Anji *Phyllostachys edulis* forest during growing season in 2011

$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 而受梅雨季的影响, 光合有效辐射相对降低(图 1), 6 月份 CO<sub>2</sub> 浓度日变幅仅为 13.8  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 6 月 26 日出梅, 加上新竹展叶完成, 白

天竹林光合能力最强, 且受温度升高的影响, 夜间竹林 CO<sub>2</sub> 排放也较强, 7 月份 CO<sub>2</sub> 浓度日变幅达到 31.2  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 随后几个月受温度降低及光照减弱的影响, 日变幅逐渐降低, 在生长季末期的 10 月份冠层 CO<sub>2</sub> 浓度日变幅仅为 12.8  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

### 2.2 CO<sub>2</sub> 浓度的垂直变化

图 2 所示, 不同高度 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化也存在一定差异。各月均表现为夜间近地层 CO<sub>2</sub> 浓度始终为最高, 随高度的增加 CO<sub>2</sub> 浓度递减, 这表明夜间竹林呈 CO<sub>2</sub> 排放源; 日间, 冠层底部(7 m/11 m) CO<sub>2</sub> 最低, 随高度的增加 CO<sub>2</sub> 浓度递增, 竹林冠层表现为 CO<sub>2</sub> 的碳汇; 而近地层 1 m 处始终处于较高水平, 其中 5 月、6 月以及 8 月尤为明显, 其他月份白天部分时段地表 CO<sub>2</sub> 浓度稍低于冠层上部, 但高于冠层浓度, 这表明毛竹林地表全天均呈 CO<sub>2</sub> 的排放源。

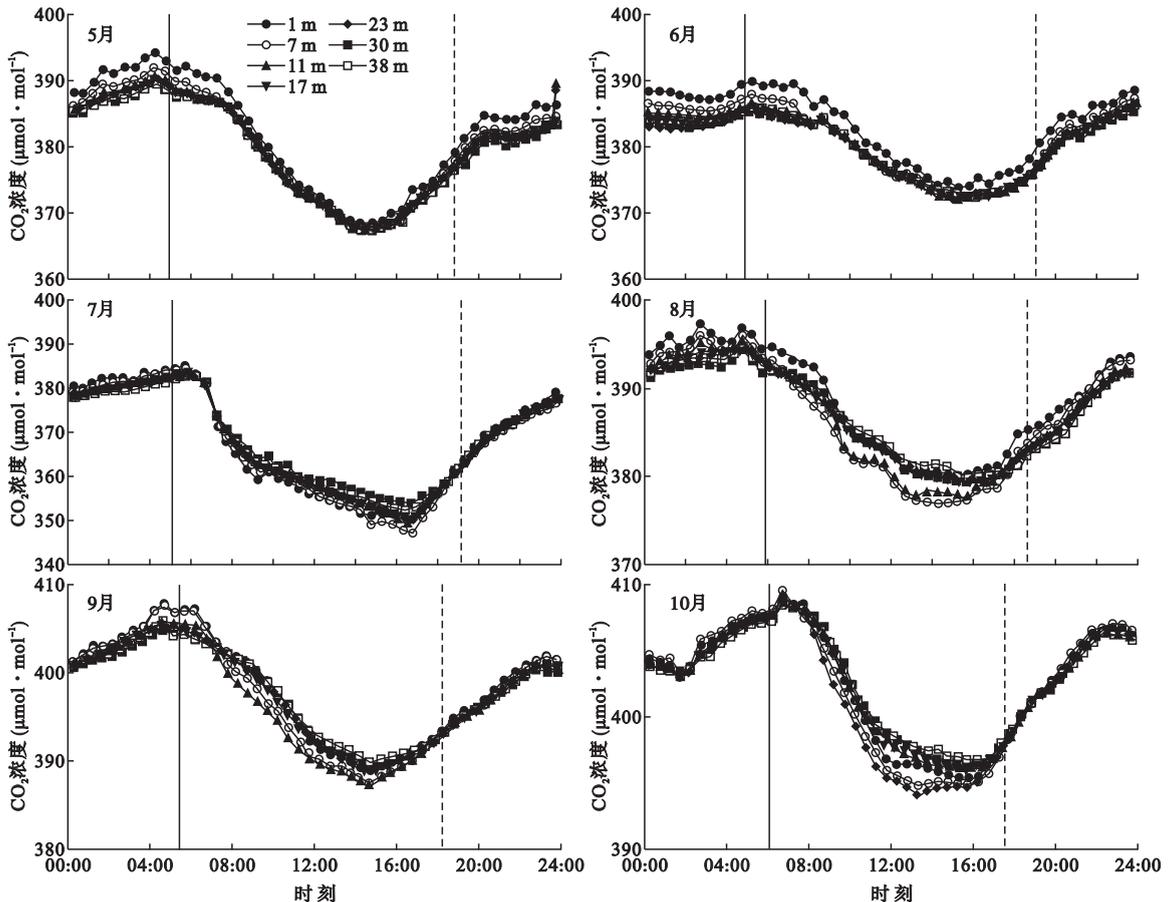


图 2 安吉毛竹林生长季不同高度月平均 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化

Fig.2 Diurnal variations of monthly mean CO<sub>2</sub> concentration at various heights in Anji *Phyllostachys edulis* forest during the growing season

图中竖直实线和虚线分别代表日出和日落时间。

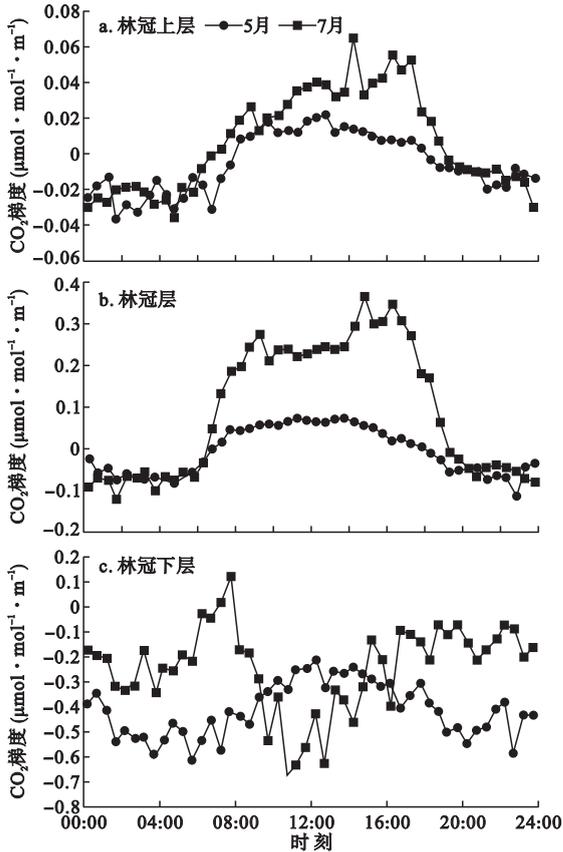


图3 2011年5月和7月安吉毛竹林月平均CO<sub>2</sub>浓度的垂直梯度

Fig.3 Vertical gradients of monthly mean CO<sub>2</sub> concentration in Anji *Phyllostachys edulis* forest in May and July of 2011

各层间CO<sub>2</sub>梯度也表现出明显的差异。以生长季初期(5月)和生长高峰期(7月)为例(图3),可以发现,生长高峰期各层梯度波动明显大于生长季初期。林冠下层(1~11 m),两个月份全天G<sub>UC</sub>均为负值,表明近地层CO<sub>2</sub>向冠层流动;夜间5月份CO<sub>2</sub>梯度绝对值要高于7月份,反映了5月份地表呼吸要强于7月份;而在白天5月份林冠下层CO<sub>2</sub>梯度绝对值则低于7月份。在林冠层以及林冠上层,两月CO<sub>2</sub>梯度值在夜间均为负,表现为大气CO<sub>2</sub>源,白天梯度值为正,表现为大气CO<sub>2</sub>汇;5和7月林冠内层梯度值由负转正的时间分别为06:30和06:00,迟于日出时间1~1.5 h,林冠上层则在林冠层基础上再推迟0.5~1 h;而两月林冠层和林冠上层CO<sub>2</sub>梯度值由正转负的时间分别为18:00和19:00,5月份要早于当月日落时间1 h,7月份同当月日落时间基本同步。

### 2.3 CO<sub>2</sub>浓度的季节变化

毛竹林生长季冠层CO<sub>2</sub>平均浓度为386.1 μmol ·

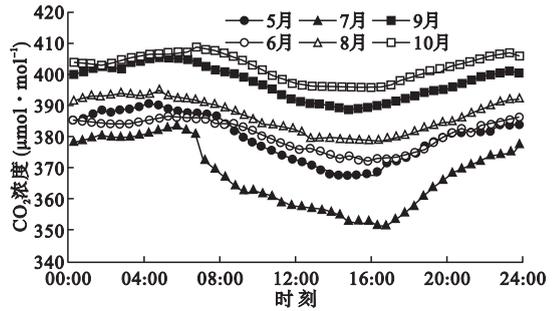


图4 毛竹林生长季冠层CO<sub>2</sub>浓度的月平均日变化  
Fig.4 Diurnal variations of monthly mean CO<sub>2</sub> concentration at *Phyllostachys edulis* forest canopy during the growing season

mol<sup>-1</sup>,图4显示了安吉毛竹林生长季(5—10月)冠层CO<sub>2</sub>浓度月平均日变化。5月份毛竹林部分老龄竹换叶结束,叶片光合能力较强,新生竹开始抽叶,光合作用能力较弱,其呼吸值较高,月平均冠层CO<sub>2</sub>浓度380.2 μmol · mol<sup>-1</sup>。6月份受到梅雨季影响,光照不足,叶片光合能力不能充分发挥,白天冠层CO<sub>2</sub>浓度较之于5月有所升高,月平均CO<sub>2</sub>浓度也有一定程度升高,达到380.9 μmol · mol<sup>-1</sup>。7月梅雨季结束,光合有效辐射迅速增强,且新竹展叶完成,在老毛竹的共同作用下竹林固碳能力达到全年最大,白天CO<sub>2</sub>浓度明显低于各月份,月平均CO<sub>2</sub>浓度仅为368.1 μmol · mol<sup>-1</sup>。随后几个月份随着光照、温度以及叶片光合能力减弱,竹林固碳能力逐月降低,林间CO<sub>2</sub>浓度也逐渐升高,8—10月平均CO<sub>2</sub>浓度分别为387.1、397.7和402.6 μmol · mol<sup>-1</sup>。

### 2.4 CO<sub>2</sub>储存通量的变化特征

利用涡动相关法得出的CO<sub>2</sub>储存通量,是利用涡动仪器观测得到的冠层上方CO<sub>2</sub>浓度变化计算得出(张弥等,2010),而廓线法计算CO<sub>2</sub>储存通量则需要考虑不同高度处CO<sub>2</sub>浓度的变化。受到大气结构影响,森林冠层及冠层下CO<sub>2</sub>并不能完全通过湍流作用输送到冠层上方,造成涡动相关法估算CO<sub>2</sub>储存通量并不能真实反映出植被林冠层及林冠下层CO<sub>2</sub>浓度的变化(同小娟等,2015),而廓线法恰好弥补这一缺点。因此,本文的毛竹林CO<sub>2</sub>储存通量采用廓线法计算。

选取生长季中期的9月份做储存通量和NEE的平均日变化(图5),可以看出,毛竹林冠层储存通量有明显的日变化规律。夜间,地表边界层较为稳定,土壤及植被呼吸作用产生的CO<sub>2</sub>逐渐积聚于冠层及冠层下方,CO<sub>2</sub>储存通量为正;05:30左右CO<sub>2</sub>

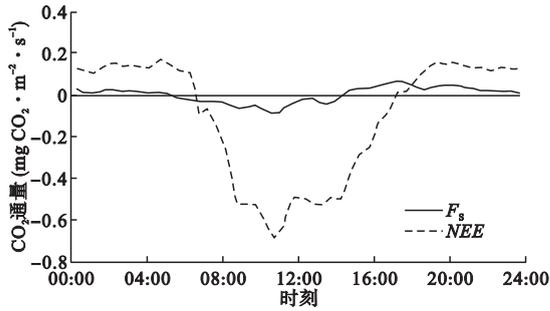


图5 安吉毛竹林9月份月平均CO<sub>2</sub>储存通量( $F_s$ )和NEE日变化

Fig.5 Diurnal variations of monthly mean CO<sub>2</sub> storage flux and NEE in Anji *Phyllostachys edulis* forest in September

储存通量由正转为负,这主要是由于光合有效辐射逐渐增强,冠层光合作用吸收林间积累的CO<sub>2</sub>造成;10:30 CO<sub>2</sub>储存通量达到最大,此时NEE也达到了全天最大。中午,受较强大气湍流及较高VPD抑制植被光合作用的影响(同小娟等,2015),CO<sub>2</sub>储存通量开始缓慢下降,至14:30,CO<sub>2</sub>储存通量由负转正,林冠层内CO<sub>2</sub>浓度逐渐升高。

9月份毛竹林NEE和冠层CO<sub>2</sub>储存通量日变幅分别为-0.596~0.161和-0.0925~0.065 mg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。在半小时尺度上,冠层CO<sub>2</sub>储存通量平均可以达到NEE的25.5%。分别对9月份每天储存通量与当天NEE进行计算,得出日尺度上CO<sub>2</sub>储存通量平均占NEE的8.9%,这表明毛竹林冠层CO<sub>2</sub>储存通量在短时间尺度对NEE影响较大,计算短时间毛竹林NEE过程中不可忽略冠层的CO<sub>2</sub>通量。而通常在长时间尺度上CO<sub>2</sub>储存通量的累加值近似等于0,对碳吸收总量影响不明显(Massman *et al.*, 2002)。毛竹林生长季各月份总CO<sub>2</sub>储存通量分别为-0.457、-0.379、-1.234、0.724、0.212和0.408 g·m<sup>-2</sup>·mon<sup>-1</sup>,分别占各月总NEE的0.270%、0.2074%、0.338%、0.235%、0.077%和0.194%,而整个生长季CO<sub>2</sub>储存通量仅占总NEE的0.048%。因此,在月尺度及更长时间尺度上计算安吉毛竹林NEE时,可以忽略CO<sub>2</sub>储存通量。

### 3 讨论

受山坡地形影响,夜间山坡上降温快,冷空气沿斜坡流入坡底,使原来较暖空气抬升从而形成逆温层。逆温的出现有抑制低层大气对流、湍流的作用(刘文杰等,1997)。受逆温层影响,夜间土壤以及植被呼吸作用释放的CO<sub>2</sub>大量积聚于冠层以及近

地层(吴家兵等,2005)。毛竹林在日出前后冠层CO<sub>2</sub>浓度达到一天中最高值,随后由于逆温层的打破,风速增大,空气扰动增强,出现一段迅速释放CO<sub>2</sub>的过程,这与吴家兵等(2005)在长白山阔叶红松林以及Grace等(1996)在亚马逊热带雨林的研究结果相同。在生长季白天,湍流交换增强,且植株光合作用旺盛,冠层CO<sub>2</sub>浓度持续降低,最低值一般出现在午后(Buchmann *et al.*, 1996)。

毛竹林在生长季月平均CO<sub>2</sub>浓度最低值(368.1 μmol·mol<sup>-1</sup>)出现在7月份。同小娟等(2015)对黄河小浪底人工混交林的研究得出,月平均CO<sub>2</sub>浓度最低值(347 μmol·mol<sup>-1</sup>)出现在8月份;李英年等(2007)对青海海北湿地近地层的大气CO<sub>2</sub>浓度研究,得出月平均CO<sub>2</sub>浓度最低值出现在7月(270.1 μmol·mol<sup>-1</sup>)。相比于人工混交林和湿地,毛竹林整体CO<sub>2</sub>浓度各月份均处于较高水平。这主要是因为,本研究区处于东亚季风区最突出的部位,尤其在生长季受海洋性气团影响,低层大气对流相对强烈,导致冠层较低CO<sub>2</sub>浓度的空气同上层较高CO<sub>2</sub>浓度的空气快速交换,降低了上层CO<sub>2</sub>浓度,同时也提升了林间CO<sub>2</sub>浓度。除了受大气湍流的影响外,温度、光合有效辐射、土壤湿度以及植株自身生理状况等都将影响到林内CO<sub>2</sub>浓度,且在森林的不同层次CO<sub>2</sub>浓度受不同环境因素影响。杨金燕等(2006)的研究表明,近地层的CO<sub>2</sub>浓度主要受控于地表温度;焦振等(2011)对温带落叶阔叶林的研究也表明,近地层CO<sub>2</sub>受土壤温度的强烈影响而呈单峰型格局,而林冠上层的CO<sub>2</sub>整体上是生长旺盛季达到最低值,在休眠季达到最高值,同土壤温度呈负相关关系。

毛竹林林冠下层、林冠层和林冠上层表现出不同的CO<sub>2</sub>梯度变化特征,其中林冠上层CO<sub>2</sub>梯度变化幅度要明显小于林冠层和林冠下层,这同焦振等(2011)对温带落叶阔叶林的研究结果相一致。毛竹林林冠层以及林冠上层变化趋势基本一致,夜间CO<sub>2</sub>梯度呈现负值,白天为正值。林冠下层全天始终保持负梯度,5月份是竹笋生长旺盛期,林下呼吸较为旺盛,夜间其林下碳源强度要高于7月份;由于新竹叶片未展开,冠层郁闭度较低,空气流通性较好,且地表少量草本及灌木光合作用较强,5月份白天的梯度值有一定程度降低;受空气流动性差、冠层光合能力强的影响,7月份白天林冠下层CO<sub>2</sub>梯度值则呈负向升高(图3),这也从侧面说明毛竹林冠

层光合作用吸收的  $\text{CO}_2$  来自于林冠上和地表排放的  $\text{CO}_2$ 。这同温带落叶阔叶林(焦振等,2011)和热带雨林(陈步峰等,2001)的观测结果一致。

利用廓线法对毛竹林  $\text{CO}_2$  储存通量计算得出,毛竹林储存通量日变幅为  $-0.0925 \sim 0.065 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大出现在 10:30,与同小娟等(2015)在黄河小浪底人工混交林研究所得结果较为接近,变化幅度要小于西双版纳热带季节雨林的变化幅度 ( $-0.23 \sim 0.18 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (姚玉刚等,2011),这主要与研究植被类型以及气候条件差异有关。在短时间尺度上,毛竹林  $\text{CO}_2$  储存通量对 NEE 的影响较大,其中在半小时尺度上  $\text{CO}_2$  储存通量可以占到 NEE 的 25.5%,在日尺度上储存通量可以占到 NEE 的 8.9%。张弥等(2010)在长白山阔叶红松林  $\text{CO}_2$  储存通量研究发现,半小时尺度上,会造成对夜间和白天的 NEE 分别低估 25% 和 19%,日尺度上,忽略  $\text{CO}_2$  储存通量将会造成对 NEE 低估 10%,与本研究结果极为接近。在月尺度上,各月份  $\text{CO}_2$  储存通量占 NEE 的 0.22%,整个生长季尺度上毛竹林  $\text{CO}_2$  储存通量仅占 NEE 的 0.048%,该结果要低于人工混交林(同小娟等,2015)和温带森林(Yu *et al.*,2008)的研究结果。

森林冠层  $\text{CO}_2$  浓度受控于大气边界层、森林植被以及土壤代谢等各因素的共同作用,反之  $\text{CO}_2$  浓度的时空变化又会作用于森林植被光合、呼吸等代谢循环。以往植被光合等研究往往忽视  $\text{CO}_2$  浓度的影响,或是将  $\text{CO}_2$  浓度作为因变量来考虑,忽视了  $\text{CO}_2$  的负反馈作用,从而造成实验结果出现偏差(张弥等,2010)。本研究利用  $\text{CO}_2$  廓线系统对毛竹林各层  $\text{CO}_2$  浓度进行长时间观测,并分析解释引起  $\text{CO}_2$  浓度时空变化的原因,对于  $\text{CO}_2$  浓度变化对毛竹林碳通量及光合生理方面的影响仍有很大研究空间。

#### 参考文献

陈步峰,林明献,李意德,等. 2001. 海南尖峰岭热带山地雨林近冠层  $\text{CO}_2$  及通量特征研究. 生态学报, **21**(12): 2166-2172.

刘文杰,李红梅. 1997. 西双版纳山地逆温资源评价. 国土与自然资源研究, (3): 36-39.

刘玉莉,江洪,周国模,等. 2014. 安吉毛竹林水汽通量变化特征及其与环境因子的关系. 生态学报, **34**(17): 4900-4909.

李英年,徐世晓,赵亮,等. 2007. 青海海北高寒湿地近地

层大气  $\text{CO}_2$  浓度的变化特征. 干旱区资源与环境, **21**(6): 108-113.

蒋高明,黄银晓,韩兴国. 1998. 城市与山地森林地区夏秋季大气  $\text{CO}_2$  浓度变化初探. 环境科学学报, **18**(1): 108-111.

焦振,王传宽,王兴昌. 2011. 温带落叶阔叶林冠层  $\text{CO}_2$  浓度的时空变异. 植物生态学报, **35**(5): 512-522.

孙成,江洪,周国模,等. 2013. 我国亚热带毛竹林  $\text{CO}_2$  通量的变异特征. 应用生态学报, **24**(10): 2717-2724.

谭正洪,张一平,于贵瑞,等. 2008. 热带季节雨林林冠上方和林内近地层  $\text{CO}_2$  浓度的时空动态及其成因分析. 植物生态学报, **32**(3): 555-567.

同小娟,张劲松,孟平,等. 2015. 黄河小浪底人工混交林冠层  $\text{CO}_2$  储存通量变化特征. 生态学报, **35**(7): 2076-2084.

吴家兵,关德新,赵晓松,等. 2005. 长白山阔叶红松林二氧化碳浓度特征. 应用生态学报, **16**(1): 49-53.

吴家兵,关德新,张弥,等. 2007. 长白山阔叶红松林碳收支特征. 北京林业大学学报, **29**(1): 1-6.

杨金艳,王传宽. 2006. 土壤水热条件对东北森林土壤表面  $\text{CO}_2$  通量的影响. 植物生态学报, **30**(2): 286-294.

姚玉刚,张一平,于贵瑞,等. 2011. 热带森林植被冠层  $\text{CO}_2$  储存项的估算方法研究. 北京林业大学学报, **33**(1): 23-29.

张弥,温学发,于贵瑞,等. 2010. 二氧化碳储存通量对森林生态系统碳收支的影响. 应用生态学报, **21**(5): 1201-1209.

周国模. 2006. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.

周丽艳,贾丙瑞,曾伟,等. 2010. 原始兴安岭落叶松林生长季净生态系统  $\text{CO}_2$  交换及其光响应特征. 生态学报, **30**(24): 6919-6926.

Brooks JR, Flanagan LB, Varney GT, *et al.* 1997. Vertical gradients in photosynthetic gas exchange characteristics and re-fixation of respired  $\text{CO}_2$  within boreal forest canopies. *Tree Physiology*, **17**: 1-12.

Buchmann N, Kao WY, Ehleringer JR. 1996. Carbon dioxide concentrations within forest canopies-variation with time, stand structure, and vegetation type. *Global Change Biology*, **2**: 421-432.

Canadell JG, Mooney HA, Baldocchi DD, *et al.* 2000. Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: A multitechnique approach for improved understanding. *Ecosystems*, **3**: 115-130.

Goulden ML, Munger JW, Fan SM, *et al.* 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, **2**: 169-182.

Grace J, Malhi Y, Lloyd J, *et al.* 1996. The use of eddy covari-

- ance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. *Global Change Biology*, **2**: 209–217.
- Kondo M, Muraoka H, Uchida M, *et al.* 2005. Refixation of respired CO<sub>2</sub> by understory vegetation in a cool-temperate deciduous forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, **134**: 110–121.
- Liu YF, Yu GR, Wen XF, *et al.* 2006. Seasonal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **49**: 99–109.
- 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.
- Norasada M, Tange T, Suzuki M, *et al.* 1998. Temporal and spatial variations in CO<sub>2</sub> concentration within a Japanese cedar forest on a slope land. *Bulletin of the Tokyo University Forests*, **99**: 199–207.
- Osborne CP, Drake BG, Long SP, *et al.* 1997. Does long-term elevation of CO<sub>2</sub> concentration increase photosynthesis in forest floor vegetation? *Plant Physiology*, **114**: 337–344.
- Yu GR, Zhang LM, Sun XM, *et al.* 2008. Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in eastern China. *Global Change Biology*, **14**: 2555–2571.
- Zhang YP, Sha LQ, Yu GR, *et al.* 2006. Annual variation of carbon flux and impact factors in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **49**: 150–162.
- Zhang YP, Tan ZH, Song QH, *et al.* 2010. Respiration controls the unexpected seasonal pattern of carbon flux in an Asian tropical rain forest. *Atmospheric Environment*, **44**: 3886–3893.
- 
- 作者简介 陈晓峰,男,1990年生,硕士,主要从事森林生态系统碳循环研究。E-mail: 18358107852@163.com
- 责任编辑 张敏
-