#### DOI: 10.5846/stxb201404260833

同小娟, 张劲松, 孟平, 李俊.黄河小浪底人工混交林冠层 CO<sub>2</sub>储存通量变化特征.生态学报,2015,35(7):2076-2084. Tong X J, Zhang J S, Meng P, Li J.Variation characteristics of carbon storage flux over a mixed plantation of the Xiaolangdi area. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(7):2076-2084.

# 黄河小浪底人工混交林冠层 CO2 储存通量变化特征

同小娟<sup>1,\*</sup>,张劲松<sup>2</sup>,孟 平<sup>2</sup>,李 俊<sup>3</sup>

1 北京林业大学林学院,北京 100083

2 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

3 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101

**摘要:**基于黄河小浪底人工混交林 2008 年的 CO<sub>2</sub>浓度和碳通量数据,分析了不同天气条件下 CO<sub>2</sub>浓度在时间和空间上的变化 特征,对比了 CO<sub>2</sub>浓度廓线法和涡度相关法估算的 CO<sub>2</sub>储存通量,研究了 CO<sub>2</sub>储存通量的日、季变化特征。结果表明:人工混交 林冠层上方月平均 CO<sub>2</sub>浓度具有明显的季节变化规律。月平均 CO<sub>2</sub>浓度最大值出现在 3 月(370 µmol/mol),最低值出现在 8 月 (347 µmol/mol)。涡度相关法估算的 CO<sub>2</sub>储存通量比廓线法所得结果偏低 9%。生长季,冠层 CO<sub>2</sub>储存通量和净生态系统碳交 换量(NEE)日平均值分别为-0.0004 和-0.091 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,冠层 CO<sub>2</sub>储存通量在 NEE 中仅占 0.4%。2008 年 CO<sub>2</sub>储存通量和 NEE 分别为-46.1、-1133 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。在年尺度上,CO<sub>2</sub>储存通量占 NEE 的 4.1%。因此,在日和年尺度上计算黄河小浪底人 工混交林 NEE 时,CO<sub>2</sub>储存通量可以忽略。

关键词:人工混交林;涡度相关法;CO2浓度廓线法;CO2储存通量;净生态系统碳交换

# Variation characteristics of carbon storage flux over a mixed plantation of the Xiaolangdi area

TONG Xiaojuan<sup>1,\*</sup>, ZHANG Jinsong<sup>2</sup>, MENG Ping<sup>2</sup>, LI Jun<sup>3</sup>

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

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

3 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract**: Forest plays an important role in carbon cycle and global climate change. To estimate accurately net ecosystem carbon exchange (NEE) between forest ecosystem and the atmosphere and understand the ecophysical factors influencing NEE, it is necessary to study the variation characteristics of  $CO_2$  storage flux. In this study, the eddy covariance method and the profile method were used to measure  $CO_2$  flux and  $CO_2$  concentration over a warm-temperate mixed plantation in the Xiaolangdi area in 2008, respectively. The temporal and spatial variations of  $CO_2$  concentration under sunny and cloudy sky conditions above the forest canopy were analyzed.  $CO_2$  storage flux obtained by the eddy covariance was compared with those derived from the profile method and the diurnal and seasonal variations of  $CO_2$  storage flux were investigated. The results showed that the diurnal and seasonal variations in  $CO_2$  concentration were obvious. In the sunny days of the growing season,  $CO_2$  concentrations above the plantation canopy decreased continuously and the minimal  $CO_2$  concentration appeared at 12:00. After 12:30,  $CO_2$  concentration increased slowly. However, in the cloudy days, the maximal and minimal  $CO_2$  concentrations occurred in the early morning and at about 14:30, respectively. At the annual scale,  $CO_2$  concentration

收稿日期:2013-04-26; 网络出版日期:2014-11-17

基金项目:国家自然科学基金 (31100322); 国家林业局公益性行业项目(GYHY20110400904)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tongxjsxbs@ sina.com

peaked in March, with a value of 370  $\mu$ mol/mol. The minimal CO<sub>2</sub> concentration occurred in August, with a value of 347  $\mu$ mol/mol. CO<sub>2</sub> storage flux estimated by the eddy covariance method was 9% lower than that obtained by the profile method. During the growing season of 2008, monthly mean CO<sub>2</sub> storage flux was -0.0004 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> and NEE was -0.091 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. At the daily scale, the proportion of CO<sub>2</sub> storage flux to NEE was only 0.4%. In 2008, CO<sub>2</sub> storage flux and NEE were -46.1 and -1133 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, respectively. On an annual scale, CO<sub>2</sub> storage flux only accounted for 4.1% of NEE. Therefore, at the longer time (daily or annual) scale, CO<sub>2</sub> storage flux could be neglected when NEE is estimated in the mixed plantation of the Xiaolangdi area.

Key Words: Mixed plantation; the eddy covariance method; the profile method;  $CO_2$  storage flux; net ecosystem carbon exchange

森林在陆地生态系统碳循环和全球变化中起着重要的作用。测定森林生态系统与大气间碳交换的方法 主要有箱法和微气象法。在各种微气象法中,涡度相关法被认为是长期测算生态系统碳通量最可靠和切实可 行的方法<sup>[1]</sup>。该方法为评价陆地生态系统在全球碳循环中的作用提供了重要的数据支持<sup>[2]</sup>。从 2002 年开 始,我国采用涡度相关技术对森林水、热和碳通量进行了大范围的连续观测。近 10 年来,在温带/暖温带森 林<sup>[3-10]</sup>、亚热带森林<sup>[11-16]</sup>和热带季雨林<sup>[17-19]</sup>生态系统碳交换方面取得了一系列的研究进展。然而,在森林生 态系统碳收支各分量研究中,当夜间大气层结稳定或湍流混合作用较弱时,土壤和植物呼吸释放的部分 CO<sub>2</sub> 由于大气湍流弱无法达到涡度相关仪器的观测高度,造成部分 CO<sub>2</sub>通量会被储存在植被冠层的大气中,于是 低估了夜间生态系统呼吸<sup>[20]</sup>。此外,冠层内和冠层上方 CO<sub>2</sub>通量的时空变异大,这也会低估生态系统呼 吸<sup>[20]</sup>。因此,为了准确估算生态系统与大气间净碳交换以及理解生理因子对净生态系统碳交换量(NEE)的 影响,有必要开展森林 CO<sub>2</sub>储存通量变化特征的研究。

在小时尺度上,CO<sub>2</sub>储存通量对于低矮作物的 NEE 的影响比较小<sup>[2]</sup>。对于高大植被(如森林)来说,冠层 空气中 CO<sub>2</sub>储存通量对 NEE 日变化过程则具有明显的影响<sup>[20-24]</sup>。在夜间稳定边界层和白天对流混合层的过 渡期,森林 CO<sub>2</sub>储存通量变化会达到最大;在大气不稳定、湍流作用较强的午后,CO<sub>2</sub>储存通量接近于零<sup>[22,24]</sup>。 因此,在小时时间尺度上,忽略 CO<sub>2</sub>储存通量将会降低对 NEE 的准确估算<sup>[24-25]</sup>。在日和年尺度上,CO<sub>2</sub>通量储 存效应对碳吸收的影响不明显,原因主要是在长时间尺度上 CO<sub>2</sub>储存通量的累加值近似为零<sup>[26-28]</sup>。

第八次森林资源清查结果显示,中国现有森林面积 2.08×10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>,其中人工林面积为 0.69×10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>,占森 林总面积的 33.2%。研究表明,中国人工林对全国总森林碳汇的贡献率超过 80%<sup>[29]</sup>。人工林在区域碳平衡 中具有重要的作用。目前,人工林碳交换研究主要集中于年碳平衡方面<sup>[8-14]</sup>,有关不同时间尺度上 CO<sub>2</sub>储存 通量对净生态系统碳交换的影响研究比较少。本研究分别采用 CO<sub>2</sub>浓度廓线法和涡度相关法对黄河小浪底 人工混交林 CO<sub>2</sub>浓度和碳通量进行了周年观测,分析了不同天气条件下冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度在时间和空间上的 变化特征,对比了廓线法和涡度相关法估算的碳储存通量的大小,研究了 CO<sub>2</sub>储存通量的日、季变化特征,以 期为准确估算人工混交林净碳交换量提供理论依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究于 2008 年在国家林业局黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35°01′N,112°28′E,410 m elev)进行。该站位于暖温带亚湿润季风气候区。站区年平均气温 12.4—14.3℃,年日照时数为 2368 h,年平均降水量 648 mm,且季节分配不均,6—9 月降水量占全年的 68.3%。植物生长季(4—9 月)盛行风向为东北风。通量观测塔(塔高 30 m)周围 1.8 km<sup>2</sup>内的平均坡度约 14°。研究区的主要树种为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*),林龄分别为 32、30a 和 28a,平均株高分别为 10.5、8.2

和 9.3 m。栓皮栎、侧柏和刺槐所占比例分别为 80%、8% 和 12%。林下灌丛主要有黑枣(Ziziphus jujuba Mill. var. inermis (Bunge) Rehd.)、扁担木(Grewia biloba var. parviflora)、荆条(Vitex negundo L. var)、小叶鼠李 (Rhamnus bungeana J.Vass.)、杠柳(Periploca sepium)、连翘(Forsythia suspense (Thunb.) Vahl)等,草本主要有 隐子草(Crpsis aculeata (L.) Ait.)、狗尾草(Setaria viridis (L.) Beauv.)等。土壤类型主要为棕壤和石灰岩风 化母质淋溶性褐土。该土壤结构不良,土层浅薄(平均 40 cm),土壤贫瘠,保水保肥力较差。

1.2 CO2通量、CO2浓度和微气象观测

涡度相关系统主要由 CSAT3 三维超声风速计(Model CSAT3, Campbell Sci. Inc., USA)和 LI-7500 红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(IRGA, Model LI-7500, Li-Cor Inc., USA)组成。该系统可测定三维风速、温度、湿度和 CO<sub>2</sub> 浓度。原始数据采样频率为 10 Hz,每 30 min 输出一组平均值,由 CR5000 数据采集器(Model CR5000, Campbell Sci. Inc., USA)记录和保存。

在通量塔 11、15、21、27 和 33 m 处分别安装 CO<sub>2</sub>浓度廓线观测系统进气口,利用红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 气体分析 仪(Model LI-840, Li-Cor, USA)测定各层 CO<sub>2</sub>浓度。数据通过数据采集器(Model CR10X2TD, Campbell Scientific Inc, USA)采集,并通过程序控制每 10 min 自动输出各层 CO<sub>2</sub>浓度平均值。

小气候梯度观测系统包括 7 层 AR-100 风速计(Vector Instruments, UK)和 7 层 HMP-45C 型温湿度传感器(Vaisala, Helsinki, Finland)(安装高度分别为 8、9、11、14、18、26 m 和 30 m)。在通量塔 27 m 处,安装了 CNR-1 型净辐射表和 CM11 型总辐射表(Kipp and Zonen)、Li-190SB 型光量子表(Li-Cor Inc., USA)等。上述 仪器均与 CR23x 型数据采集器(Campbell Sci., USA)相连,每半小时输出一组平均值。

### 1.3 数据处理

净生态系统碳交换量(NEE)由下式计算:

$$NEE = F_c + F_s \tag{1}$$

式中, $F_{c}$ 为 CO<sub>2</sub>湍流通量(mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>),可由涡度相关系统得出; $F_{s}$ 为涡度相关仪器观测高度以下大气 CO<sub>2</sub> 储存通量(mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)。NEE 为负值时表示人工混交林净吸收大气 CO<sub>2</sub>,反之则为净排放 CO<sub>2</sub>。

涡度相关法所得 CO<sub>2</sub>储存通量( $F_{s-FC}$ )可由下式进行估算<sup>[21,26]</sup>:

$$F_{s-EC} = \frac{\Delta C}{\Delta t} z \tag{2}$$

式中, $\Delta C$  为高度 *z* 处前后两次相邻时间测定的 CO<sub>2</sub>浓度差(mg/m<sup>3</sup>), $\Delta t$  为前后两次测定的时间间隔(s)(本 研究时间间隔为 30 min),*z* 为涡度相关观测高度(m)。

 $CO_2$ 浓度廓线法所得  $CO_2$ 储存通量( $F_{sP}$ )由下式给出<sup>[20,30]</sup>:

$$F_{s-P} = \frac{P}{RT_a} \int_0^h \frac{\mathrm{d}c(Z)}{\mathrm{d}t} \mathrm{d}z \tag{3}$$

式中,P为气压(Pa),R气体摩尔常数(Pa m<sup>3</sup> K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>), $T_a$ 为气温(K),h为廓线法观测高度(m),c为观测平 台间 CO<sub>2</sub>平均浓度(µmol/mol),t为测定时间间隔(s)时间,本研究中,时间间隔为 30 min。

1.4 数据质量控制和插补

对涡度相关系统所得的半小时 CO<sub>2</sub>通量数据经两次坐标轴旋转<sup>[31]</sup>和 WPL 校正<sup>[32]</sup>。夜间大气层结稳定, 湍流混合作用弱,植物和土壤呼吸产生的 CO<sub>2</sub>难以到达涡度相关系统观测高度,于是会低估生态系统的呼吸 作用。夜间通量数据的剔除:根据夜间摩擦风速( $U^*$ )与对应 CO<sub>2</sub>通量的关系,确定出临界  $U^*$ ,摩擦风速小于 临界  $U^*$ 的通量数据将被剔除掉<sup>[33]</sup>。本研究  $U^*$ 取 0.35 m s<sup>-1[8]</sup>。当仪器出现故障、雨天或清晨有露水时,仪 器观测到的异常通量数据应当删除。本文 CO<sub>2</sub>通量的阈值为 $|F_c| < 3.0 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1[34]}$ ,对于大于阈值的通 量数据予以剔除。此外,对初步筛选的数据计算出月平均值和方差,与平均值相差超过 3 倍方差的数值也要 剔除掉。小于 2 h 的缺失的数据用线性内插法插补;大于 2 h 的缺失数据采用平均日变化法(Mean Diurnal Variation, MDV)进行插补<sup>[33]</sup>。

### 2 结果与分析

7期

2.1 冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度的变化

2.1.1 日变化

大尺度的大气边界层活动日变化是形成冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度日变化的主要原因<sup>[35]</sup>。在植物生长季,选择 典型晴天和阴天来研究人工混交林植被冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度的日变化特征。不同天气条件下人工混交林植被 冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度具有明显的日变化过程(图1)。晴天,日出后随太阳辐射的增强、气温的升高,植被光合作 用所消耗的 CO<sub>2</sub>量不断增强。此外,白天太阳辐射比较强时,人工林混交林下垫面上对流旺盛且强度大,造成 大气 CO<sub>2</sub>的扩散速率增大<sup>[36]</sup>,于是使得植被冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度持续下降。到 12:00 左右太阳辐射最强时 CO<sub>2</sub> 浓度降到最低(5、6 月份分别为 354 和 335 µmol/mol)。12:30 以后,冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度缓慢上升。一方面,太 阳辐射下降造成光合作用吸收 CO<sub>2</sub>的能力减弱;另一方面,气温在 12:30—16:00 仍在升高(图 1),这使得人 工混交林土壤呼吸和植物呼吸不断升高。日落以后,植被冠层光合作用停止;受逆温的影响,土壤呼吸和植物 呼吸产生的 CO<sub>2</sub>由于夜间大气层比较稳定、空气湍流运动弱而堆积,于是导致夜间 CO<sub>2</sub>浓度有所上升。与晴 天不同的是,阴天天气条件下植被冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度在日出后两小时左右有所升高(最大可达 400 µmol/ mol)。从 9:00 开始,CO<sub>2</sub>浓度逐渐下降,到 14:30 左右下降到最低水平(约 360 µmol/mol)(图 1)。阴天天气 下 CO<sub>2</sub>浓度最低值出现的时间滞后于晴天。一方面,晴天下午较高的温度(图 1)促进了土壤和植物呼吸作 用;另一方面,晴天中午太阳辐射强、饱和差(VPD)大,在强光作用下植被冠层部分叶片光合作用会受到 抑制。



图 1 晴天和阴天天气条件下冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度和气温的日变化

Fig.1 Diurnal courses of  $CO_2$  concentration and air temperature in the sunny and cloudy sky days above the canopy of the mixed plantation

#### 2.1.2 垂直变化

植被冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度随高度的变化,主要取决于植被冠层 CO<sub>2</sub>被固定和释放情况。不同天气条件下人

工混交林植被冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度垂直分布见图 2。晴天天气条件下,8:00 近冠层(11m)处 CO<sub>2</sub>浓度最低(图 2)。这主要与冠层光合作用吸收 CO<sub>2</sub>有关。14:00,植被冠层上方 CO<sub>2</sub>浓度随高度变化不大,原因主要是下午 较高的 VPD 抑制了植物冠层的光合作用。夜间 20:00,植被冠层上方 11—27 m 的 CO<sub>2</sub>浓度分别表现为随高 度升高而降低,11—27m 之间表现为夜间呼吸型,27—33 m 则为 CO<sub>2</sub>浓度分别表现为随高度升高而增加。到 夜间 2:00,植被冠层上方 11—33 m 的 CO<sub>2</sub>浓度则表现为完全夜间呼吸型(图 2)。与晴天相比,不论是白天还 是夜间,阴天 CO<sub>2</sub>浓度随高度的变化不明显(图 2)。这主要是阴天白天植物光合固定的 CO<sub>2</sub>以及夜间土壤和 植物呼吸产生的 CO<sub>2</sub>量都比较少造成的。





2.1.3 季节变化

林冠上 CO<sub>2</sub>浓度的季节变化主要受生态系统光合 作用和呼吸作用的共同控制<sup>[37]</sup>。图 3 表明,人工混交 林冠层上方月平均 CO<sub>2</sub>浓度具有明显的季节变化规律。 1—2 月份,太阳辐射弱,人工混交林植被冠层光合作用 和呼吸作用都比较小;此时温度低,空气对流弱,于是造 成土壤呼吸排放的 CO<sub>2</sub>有所堆积,进而使得冠层大气 CO<sub>2</sub>浓度有所增加,到 3 月份,可达 370 μmol/mol。从 4 月份开始,随辐射的增强和温度的升高,人工混交林冠 层光合和呼吸速率随之增加,植被光合作用超过了呼吸 作用,于是造成冠层上方大气 CO<sub>2</sub>浓度下降。到 8 月份





时,人工混交林植被冠层大气 CO<sub>2</sub>浓度降到最低(347 μmol/mol)。由图 3 可知,植被冠层大气 CO<sub>2</sub>浓度在 6 月份有所升高。这主要是 6 月份大气干旱以及辐射过强造成植物冠层光合速率下降<sup>[8]</sup>。9—11 月,人工混交 林植被冠层大气 CO<sub>2</sub>浓度变化不大,基本维持在 350 μmol/mol 左右。11 月份后,人工混交林进入非生长阶 段,此时主要树种(栓皮栎、刺槐)叶片都已凋落,生态系统以排放 CO<sub>2</sub>为主,由此造成植被冠层上方大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高。

2.2 廓线法和涡度相关法所得 CO2储存通量的比较

图 4 为 CO<sub>2</sub>浓度廓线法和涡度相关法所得半小时 CO<sub>2</sub>储存通量的比较。本研究发现,涡度相关法所得的 CO<sub>2</sub>储存通量低于 CO<sub>2</sub>浓度廓线法所得结果(偏低约 9%)(图 4)。在计算 CO<sub>2</sub>储存通量时,廓线法是根据一定 时间间隔内观测高度以下不同高度处 CO<sub>2</sub>浓度的变化得出的,而涡度相关法是平均了观测系统高度以下不同 层次的 CO<sub>2</sub>浓度变化<sup>[24]</sup>。受大气层结影响,森林近地层 CO<sub>2</sub>未能通过湍流作用输送到冠层上方,于是造成涡

度相关法估算的 CO<sub>2</sub>储存通量不能真实反映植被冠层 CO<sub>2</sub>浓度的时空变化<sup>[38]</sup>。因此,在计算该地区人工混 交林半小时 CO<sub>2</sub>储存通量时应采用浓度廓线法。

2.3 CO2储存通量和净生态系统碳交换量的日变化

人工混交林冠层 CO<sub>2</sub>储存通量具有一定的日变化 规律(图5)。CO<sub>2</sub>储存通量的日变化具体表现为:夜间, CO<sub>2</sub>储存通量为正。原因主要是辐射冷却导致地表边 界层变得稳定,于是土壤和植物呼吸产生的 CO<sub>2</sub>大部分 被储存于冠层内部。6:30 左右时冠层 CO<sub>2</sub>储存量由正 变为负。这主要是冠层光合作用吸收了夜间冠层内部 积累的 CO<sub>2</sub>造成的。9:30 时,CO<sub>2</sub>储存通量达到最大 (-0.10 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)。中午,由于温度比较高,冠层 内部大气湍流混合比较强,CO<sub>2</sub>储存通量开始缓慢下 降,15:30 时 CO<sub>2</sub>储存量为零。16:00 以后,CO<sub>2</sub>储存通 量由负变为正,表明林冠内 CO<sub>2</sub>开始累积。

人工混交林净生态系统碳交换量(NEE)日变化过 程见图 5。夜间,NEE 为正,表明该生态系统是大气 CO<sub>2</sub>源。日出后,NEE 由正变为负,该生态系统由碳源 转为碳汇。上午,人工林混交净吸收的大气 CO<sub>2</sub>不断增 加。到 11:30 左右时,人工混交林净吸收的 CO<sub>2</sub>达到最 大值,可达-0.63 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。随后,人工混交林净 吸收的 CO<sub>2</sub>量开始不断下降。日落时,人工林生态系统 NEE 由负变为正,该生态系统由碳汇变为碳源。在生 长季,人工林 NEE 上午增加比较快,下午下降的则比较 缓慢。原因主要是:(1)下午较高的 VPD 抑制了植物 冠层的光合作用;(2)较高的温度促进了生态系统呼吸 作用。

在生长季(6月),人工混交林冠层 CO<sub>2</sub>储存通量和 NEE 日变幅分别为-0.10—0.06、-0.63—0.19 mgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。冠层 CO<sub>2</sub>储存通量和 NEE 日平均值分别为 -0.0004和-0.091 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,冠层 CO<sub>2</sub>储存通量在 NEE 中所占比例仅为 0.4%。

2.4 CO2储存通量的季节变化

在不存在平流/泄流作用情况下,夜间湍流作用较弱时,涡度相关观测高度以下储存的 CO<sub>2</sub>会被日出后植



#### 图 4 涡度相关法和廓线法所得 CO2储存通量的比较

Fig. 4 Comparison of  $CO_2$  storage flux obtained by the eddy covariance ( EC ) method with the profile method in the mixed plantation



图 5 人工混交林生长季(6月) $CO_2$ 储存通量  $(F_s)$ 和净生态系 统碳交换(NEE)的月平均日变化

Fig.5 Monthly mean diurnal variations of carbon storage flux  $(F_s)$  and net ecosystem carbon exchange (NEE) in the mixed plantation in June, 2008

物光合作用平衡掉。因此,在日尺度甚至更长的时间尺度上  $CO_2$ 储存通量应该为零<sup>[39]</sup>。图 6 为  $CO_2$ 储存通 量的季节变化。冬季,由于温度低,大气湍流比较弱。因此, $CO_2$ 储存通量比较大,最大可达-19.8 g  $CO_2$  m<sup>-2</sup> month<sup>-1</sup>。春季和夏季,在较强的辐射和温度的作用下,大气湍流混合增强, $CO_2$ 储存通量变小。非生长季、生 长季  $CO_2$ 储存通量分别为-27.6 和-18.5 g  $CO_2/m^2$ 。2008 年, $CO_2$ 储存通量和净生态系统碳交换量分别为 -46.1、-1133 g  $CO_2$  m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; $CO_2$ 储存通量在 NEE 中所占比例为 4.1%。因此,在年尺度上计算黄河小浪底人 工混交林 NEE 时, $CO_2$ 储存通量可以忽略。

### 3 结论与讨论

在植物生长季,不同天气条件下人工混交林植被冠 层上方 CO,浓度具有明显的日变化特征。晴天,日出后 植被冠层上方 CO,浓度持续下降。到 12:00 太阳辐射 最强时 CO,浓度降到最低。12:30 以后,冠层上方 CO, 浓度缓慢上升。阴天天气条件下植被冠层上方 CO,浓 度在日出后两小时左右有所升高。这与吴家兵等<sup>[28]</sup>在 温带阔叶红松林、谭正洪等[35]在热带季雨林所得结果 类似。Grace 等<sup>[40]</sup>、Goulden 等<sup>[41]</sup>在亚马逊热带雨林也 Fig.6 Seasonal pattern of CO<sub>2</sub> storage flux in the mixed plantation 发现了植被冠层 CO2在夜间累积、清晨释放 CO2的现





象。人工混交林冠层上方月平均 CO,浓度具有明显的季节变化规律。一年中,月平均 CO,浓度最大值(370 μmol/mol)出现在3月份,最低值(347 μmol/mol)出现在8月份。李英年等<sup>[36]</sup>对青海海北湿地近地层大气 CO,浓度研究得出,月平均 CO,浓度最高值出现在 10 月(335.0 µmol/mol),最低值出现在 7 月(270.1 µmol/ mol)。与湿地相比,人工林 CO<sub>2</sub>浓度最大和最小值均比较高。这主要是湿地地表积水以及植物的吸收作用造 成的<sup>[36]</sup>。对于热带季雨林,林冠上方平均 CO<sub>2</sub>浓度的最大值出现在 3 月,最小值出现在 6 月<sup>[35]</sup>。焦振等<sup>[37]</sup> 对帽儿山温带落叶阔叶林 CO,浓度的时空变化研究发现,受植被生态系统光合作用和呼吸作用的共同影响, 林冠上 CO,浓度在 5 月初和 10 月各出现 1 次峰值,8 月初出现最低值。

本研究发现,涡度相关法估算的人工混交林 CO,储存通量比廓线法所得结果偏低 9%。与本研究不同的 是,姚玉刚等<sup>[38]</sup>对热带森林植被冠层研究得出涡度相关法估算的碳储存通量大于廓线法所得结果。Hollinger 等<sup>[21]</sup>、Carrara等<sup>[42]</sup>指出这两种方法所得的储存碳通量具有较好的一致性。张弥等<sup>[24]</sup>对长白山阔叶红松林 研究也发现,涡度相关法估算的 CO2储存通量与廓线法所得结果差别不显著。

生长季,人工混交林 CO,储存通量达到最大出现在 9:30。这与 Schindler 等<sup>[43]</sup>在苏格兰松林、de Araújo 等<sup>[20]</sup>在亚马孙热带雨林所得结果类似。对于长白山阔叶红松林,CO2储存通量在5:00 左右达到最大<sup>[28]</sup>。 Loescher 等<sup>[44]</sup>在研究热带森林碳交换时发现, CO2储存通量在 8:00 空气对流运动形成时达到最大。人工混 交林 CO,储存通量日变幅为-0.10-0.06 mgCO, m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 与孙成等<sup>[16]</sup>在亚热带毛竹林所得结果(-0.12-0.07 mg CO, m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)接近,高于王春林等<sup>[45]</sup>在鼎湖山南亚热带针阔叶混交林所得结果(-0.06-0.04 mg CO, m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>),但低于姚玉刚等<sup>[38]</sup>在西双版纳热带季节雨林所得日变幅值(-0.23—0.18 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)。这与土壤有 机质的数量与质量、温度以及冠层高度存在差别有关。此外,平流与湍流体系的不同也造成以上研究存在差 异的原因之一<sup>[46]</sup>。人工林日最大碳吸收可达-0.63 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,高于 Baldocchi 等<sup>[22]</sup>在温带松林所得结 果,低于 Hollinger 等<sup>[21]</sup>、Baldocchi 和 Harley<sup>[47]</sup>、Wang 等<sup>[48]</sup>在温带落叶松林所得结果。这主要是不同研究区 树种、土壤与气候条件存在差异造成的。

在半小时尺度上,人工混交林 CO,储存通量对 NEE 对影响比较大,这与 Haszpra 等<sup>[23]</sup>在农田和森林生态 系统、张弥等<sup>[24]</sup>在温带森林、孙成等<sup>[16]</sup>在亚热带毛竹林所得结果类似。生长季,人工混交林冠层 CO。储存通 量在日尺度上近似为0,这与 Greco 和 Baldocchi<sup>[26]</sup>在温带落叶林、Baldocchi 等<sup>[27]</sup>在温带混交阔叶林、吴家兵 等<sup>[28]</sup>在长白山阔叶红松林的研究一致。张弥等<sup>[24]</sup>对长白山阔叶红松林储存通量研究则发现,在日尺度上, 忽略 CO,储存通量会造成对 NEE 低估 10%。2008 年,人工混交林 CO,储存通量和 NEE 分别为-46.1、-1133 g CO2 m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;CO2储存通量仅占 NEE 的 4.1%。因此,在长时间(日、年)尺度上估算黄河小浪底人工混交林 NEE 时,CO,储存通量可以忽略不计。在年尺度上,本研究所得 CO,储存通量占 NEE 的比例与 Yu 等<sup>[49]</sup>在温 带森林的研究结果类似,低于张弥等<sup>[24]</sup>在长白山阔叶红松林所得结果。

35 卷

研究表明,忽略 CO<sub>2</sub>储存通量会低估森林生态系统 Michaelis-Menten 光响应方程中的表观初始量子效率 和 Lloyd-Taylor 呼吸方程中的参考呼吸,进而导致对总初级生产力(GPP)和生态系统呼吸(*R*<sub>ec</sub>)低估约 20%<sup>[24]</sup>。王静等<sup>[25]</sup>对不同浓度变量计算的温带落叶阔叶林 CO<sub>2</sub>储存通量的误差进行分析得出,基于密度、摩尔分数和混合比计算的 CO<sub>2</sub>储存通量分别平均高估 CO<sub>2</sub>有效储存通量 8.5%、0.6%和 0.1%。因此,为准确评价人工混交林碳交换各分量的大小,今后研究应侧重选择大气水、热过程守恒的混合比计算 CO<sub>2</sub>储存通量,加强 CO<sub>2</sub>储存通量对光响应参数以及呼吸参数影响的研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. Global Change Biology, 1996, 2(3): 169-182.
- [2] Baldocchi D D, Falge E, Gu L, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer Ch, Davis K, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw U K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [3] Guan D X, Wu J B, Yu G R, Sun X M, Zhao X S, Han S J, Jin C J. Meteorological control on CO<sub>2</sub> flux above broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2005, 48: 116-122.
- [4] Guan D X, Wu J B, Zhao X S, Han S J, Yu G R, Sun X M, Jin C J. CO<sub>2</sub> fluxes over an old, temperate mixed forest in northeastern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(3/4): 138-149.
- [5] 吴家兵,关德新,张弥,韩士杰,于贵瑞,孙晓敏.长白山阔叶红松林碳收支特征.北京林业大学学报,2007,29(1):1-6.
- [6] 王宇,周广胜,贾丙瑞,李帅,王淑华.中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的碳通量特征及其影响因子比较.生态学报,2010,30 (16):4376-4388.
- [7] 周丽艳, 贾丙瑞, 曾伟, 王宇, 周广胜. 原始兴安岭落叶松林生长季净生态系统 CO<sub>2</sub>交换及其光响应特征. 生态学报, 2010, 30(24): 6919-6926.
- [8] Tong X J, Meng P, Zhang J S, Li J, Zheng N, Huang H. Ecosystem carbon exchange over a warm-temperate mixed plantation in the lithoid hilly area of the North China. Atmosphere Environment, 2012, 49: 257-267.
- [9] 唐祥,陈文婧,李春义,查天山,吴斌,王小平,贾昕.北京八达岭林场人工林净碳交换及其环境影响因子.应用生态学报,2013,24 (11):3057-3064.
- [10] ZhouJ, ZhangZ Q, Sun G, Fang X R, Zha T G, McNulty S, Chen J Q, Jin Y, Noormets A. Response of ecosystem carbon fluxes to drought events in a poplar plantation in Northern China. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 33-42.
- [11] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, Song X, Li J, Sun X M, Yang F T, ChenY R, Liu Q J. Seasonal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(Supplement II): 99-109.
- [12] 彭镇华, 王妍, 任海青, 孙启祥, 周金星. 安庆杨树林生态系统碳通量及其影响因子研究. 林业科学研究, 2009, 22(2): 237-242.
- [13] Wen X F, Wang H M, Wang J L, Yu G R, Sun X M. Ecosystem carbon exchanges of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought, 2003-2007. Biogeosciences, 2010, 7: 357-369.
- [14] 陈云飞, 江洪, 周国模, 杨爽, 陈健. 人工高效经营雷竹林 CO2通量估算及季节变化特征. 生态学报, 2013, 33(11): 3434-3444.
- [15] 黄昆, 王绍强, 王辉民, 仪垂祥, 周蕾, 刘允芬, 石浩. 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析. 生态学报, 2013, 33(17): 5252-5265.
- [16] 孙成, 江洪, 周国模, 杨爽, 陈云飞. 我国亚热带毛竹林 CO<sub>2</sub>通量的变异特征. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2717-2724.
- [17] Zhang Y P, Sha L Q, Yu G R, Song Q H, Tang J W, Yang X D, Wang Y S, Zheng Z, Zhao S J, Yang Z, Sun X M. 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, 2006, 49 (Supplement II): 150-162.
- [18] Zhang Y P, Tan Z H, Song Q H, Yu G R, Sun X M. Respiration controls the unexpected seasonal pattern of carbon flux in an Asian tropical rain forest. Atmospheric Environment, 2010, 44(32): 3886-3893.
- [19] Tan Z H, Zhang Y P, Schaefer D, Yu G R, Liang N S, Song Q H. An old-growth subtropical Asian evergreen forest as a large carbon sink. Atmospheric Environment, 2011, 45(8): 1548-1554.
- [20] de Araújo A C, Dolman A J, Waterloo M J, Gash J H C, Kruijt B, Zanchi F B, de Lang J M E, Stoevelaar R, Manzi A O, Nobre A D, Lootens R N, Backer J. The spatial variability of CO<sub>2</sub> storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(2): 226-237.
- [21] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, Hunt J E, McSeveny T M, Weir P L. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. Ecology, 1994, 75(1): 134-150.
- [22] Baldocchi D D, Vogel C A, Hall B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 83(1/2): 147-170.

- [23] Haszpra L, Barcza Z, Davis K J, Tarczay K. Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 132(1/2): 58-77.
- [24] 张弥,温学发,于贵瑞,张雷明,伏玉玲,孙晓敏,韩士杰.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,2010,21 (5):1201-1209.
- [25] 王静, 王兴昌, 王传宽. 基于不同浓度变量的温带落叶阔叶林 CO,储存通量的误差分析. 应用生态学报, 2013, 24(4): 975-982.
- [26] Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variation of CO<sub>2</sub> and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. Global Change Biology, 1996, 2(3): 183-197.
- [27] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, Paw U K T, Falge E. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. Boundary-Layer Meteorology, 2000, 96(1/2): 257-291.
- [28] 吴家兵,关德新,赵晓松,韩士杰,于贵瑞,孙晓敏.长白山阔叶红松林二氧化碳浓度特征.应用生态学报,2005,16(1):49-53.
- [29] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [30] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, Longdoz B, Yernaux M, Laitat E. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108(4): 293-315.
- [31] McMillen R T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. Boundary-Layer Meteorology, 1988, 43(3): 231-245.
- [32] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447): 85-100.
- [33] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N-O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [34] Zhang L M, Yu G R, Sun X M, Wen X F, Ren C Y, Song X, Liu Y F, Guan D X, Yan J H, Zhang Y P. Seasonal variation of carbon exchange of typical forest ecosystems along the eastern forest transect in China. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49 (Supplement II): 47-62.
- [35] 谭正洪, 张一平, 于贵瑞, 宋清海, 高举明, 杨振, 孙晓敏, 赵双菊. 热带季节雨林林冠上方和林内近地层 CO<sub>2</sub>浓度的时空动态及其成因 分析. 植物生态学报, 2008, 32(3): 555-567.
- [36] 李英年,徐世晓,赵亮,张法伟,赵新全.青海海北高寒湿地近地层大气 CO<sub>2</sub>浓度的变化特征.干旱区资源与环境,2007,21(6): 108-113.
- [37] 焦振, 王传宽, 王兴昌. 温带落叶阔叶林冠层 CO<sub>2</sub>浓度的时空变异. 植物生态学报, 2011, 35(5): 512-522.
- [38] 姚玉刚, 张一平, 于贵瑞, 宋清海, 谭正洪, 赵俊武. 热带森林植被冠层 CO<sub>2</sub>储存项的估算方法研究. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 23-29.
- [39] Aubinet M, Heinesch B, Longdoz B. Estimation of the carbon sequestration by a heterogeneous forest: Night flux corrections, heterogeneity of the site and inter-annual variability. Global Change Biology, 2002, 8(11): 1053-1071.
- [40] Grace J, Malhi Y, Lloyd J, McIntyre J, Miranda A C, Meir P, Miranda H S. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. Global Change Biology, 1996, 2(3): 209-217.
- [41] Goulden M L, Miller S D, da Rocha H R. Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2006, 111: D08S04, doi:10.1029/2005JD006037.
- [42] Carrara A, Kowalski A S, Neirynck J, Janssens I A, Yuste J C, Ceulemans R. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of mixed forest in Belgium over 5 years. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 119(3/4): 209-227.
- [43] Schindler D, Türk M, Mayer H. CO<sub>2</sub> fluxes of a Scots pine forest growing in the warm and dry southern upper Rhine plain, SW Germany. European Journal of Forest Research, 2006, 125(3): 201-212.
- [44] Loescher H W, Oberbauer S F, Gholz H L, Clark D B. Environmental controls on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a Central American tropical wet forest. Global Change Biology, 2003, 9(3): 396-412.
- [45] 王春林,周国逸,王旭,周传燕,于贵瑞.复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析.中国农业气象,2007,28(3):233-240.
- [46] Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer CH, Cescatti A, Feigenwinter C, Granier A, Grünwald TH, Havrankova K, Heinesch B, Longdoz B, Marcolla B, Montagnani L, Sedlak P. Comparing CO<sub>2</sub> storage and advection conditions at night at different carboEuroFlux sites. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 116(1): 63-94.
- [47] Baldocchi D D, Harley P C. Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application. Plant, Cell and Environment, 1995, 18(10): 1157-1173.
- [48] Wang H, Saigusa N, Yamamoto S, Kondo H, Hirano T, Toriyama A, Fujinuma Y. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan. Atmospheric Environment, 2004, 38(40): 7021-7032.
- [49] Yu G R, Zhang L M, Sun X M, Fu Y L, Wen X F, Wang Q F, Li S G, Ren C Y, Song X, Liu Y F, Han S J, Yan J H. Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in eastern China. Global Change Biology, 2008, 14(11): 2555-2571.