

热带森林植被冠层 CO₂ 储存项的估算方法研究姚玉刚^{1,2} 张一平¹ 于贵瑞³ 宋青海^{1,2} 谭正洪^{1,2} 赵俊斌^{1,2}

(1 中国科学院热带森林生态学重点实验室, 西双版纳热带植物园 2 中国科学院研究生院

3 中国科学院地理科学与资源研究所)

摘要: 评价植被冠层 CO₂ 储存项有助于提高森林-大气层面净生态系统 CO₂ 交换量 (F_{NEE}) 的估算精度。基于西双版纳热带季节雨林 2 年完整的涡度相关系统和 CO₂ 廓线的同步观测资料, 详细分析涡度相关法 (F_{s-EC}) 和廓线法 (F_{s-PM}) CO₂ 储存项估算结果和变化趋势。结果表明: 1) 廓线法 CO₂ 储存项年平均日变化曲线相比涡度相关法能更真实地反映冠层内外 CO₂ 浓度时空变化特征。2) 廓线法估算的 CO₂ 储存项年总量值为 $-0.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 涡度相关法为 $-0.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。3) 由于复杂地形条件下的西双版纳热带季节雨林存在较大 CO₂ 浓度梯度, 采用廓线法进行 CO₂ 储存项估算比涡度相关法更为合适。

关键词: CO₂ 储存项; 涡度相关法; 廓线法

中图分类号: 718.55+6 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2011)01-0023-07

YAO Yu-gang^{1,2}; ZHANG Yi-ping¹; YU Gui-rui³; SONG Qing-hai^{1,2}; TAN Zheng-hong^{1,2}; ZHAO Jun-bin^{1,2}. **Estimation of CO₂ storage flux between forest and atmosphere in a tropical forest.** *Journal of Beijing Forestry University* (2011) **33**(1) 23-29 [Ch 42 ref.]

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650223, P. R. China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, P. R. China;

3 Institute of Geographical Science and Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, P. R. China.

Evaluating CO₂ storage flux may help us to improve the calculation accuracy of net ecosystem CO₂ exchange (F_{NEE}). Based on data of two consecutive years from an eddy covariance system and a vertical CO₂ profile system in a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwest China, CO₂ storage flux was calculated by two methods, eddy covariance (F_{s-EC}) and profile (F_{s-PM}) methods. Results show that: 1) Comparing with eddy covariance method, diurnal variation of CO₂ storage flux calculated by profile method could directly reflect the spatial-temporal variation of CO₂; 2) Total amount value of CO₂ storage flux calculated by profile method was $-0.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{year})$, and the value calculated by eddy covariance method was $-0.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{year})$; 3) Under complex terrain and tall forest conditions, with a large concentration gradient of CO₂, profile method for calculation of CO₂ storage flux had an advantage over eddy covariance method.

Key words CO₂ storage flux; eddy covariance method; profile method

森林与大气间的物质和能量交换包括 3 个组成部分: 湍流通量 (F_c)、储存项 (F_s) 和物质流^[1]。其

中 CO₂ 储存项对于低矮植被的影响微弱, 但对高大森林则不可忽视^[2]。在湍流通量的基础上增加 CO₂

收稿日期: 2010-04-16

基金项目: “973”国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB833501)、中国科学院重要方向项目 (KZCX2-YW-Q1-05-04、KJ CX2-YW-432-1)、国家自然科学基金项目 (30670395)。

第一作者: 姚玉刚, 博士生。主要研究方向: 生态气候。电话: 0871-5160904 Email: yaoyugang@xtbg.ac.cn 地址: 650223 云南省昆明市学府路 88 号中国科学院西双版纳热带植物园昆明分部。

责任作者: 张一平, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 生态气候。电话: 0871-5160904 Email: yipingzh@xtbg.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

储存项,用于平衡进出森林的 CO_2 通量是目前通量计算中的常用方法^[3-4]。对 CO_2 储存项的估算开展了一系列研究,发现处于昼夜交替时段 CO_2 储存项最大,储存效应最明显^[5-6]。 CO_2 储存效应对长时间尺度碳平衡特征不会造成明显影响,这是由于在长时间尺度上通量储存项的累加值近似等于零^[7-8]。Iwata 等^[9]发现温带森林 CO_2 储存项在日尺度上也接近零。

评价植被冠层 CO_2 储存项需要综合考虑仪器设置高度、采样周期及估算方法等因素的影响^[10-11]。 CO_2 储存项广泛应用于评价净生态系统 CO_2 交换量 (F_{NEE}) 的研究中^[8,12-13],多采用单一方法估算 CO_2 储存项,对估算方法的有效性评价研究不多。涡度相关法估算 CO_2 储存项随着涡度相关法的普及,广泛应用于森林站点^[7]。廓线法是独立于涡度相关法以外的观测方法^[14-18],在高大森林中设置 CO_2 廓线观测,可通过各层气温与 CO_2 浓度时间变率,估算各空气层的 CO_2 储存量,累加获得植被冠层的 CO_2 储存项^[3,11]。

西双版纳热带季节雨林的先前碳通量研究主要集中在 CO_2 湍流通量 (F_c)^[19-23]及环境控制因子方面,例如辐射^[24]、风速^[20]和大气稳定度^[25-26],但对 CO_2 储存项的研究开展不够,特别是 CO_2 储存项估算结果的有效性评价存在不足。西双版纳热带季节雨林位于复杂地形和高大冠层的双重作用下,存在相对特殊的 CO_2 时空变化特征,而这种变化必然对 CO_2 储存项的估算带来影响。适用于本区域的 CO_2 储存项的估算方法需要加以核实。因此,本研究采用涡度相关法和廓线法分别估算植被冠层 CO_2 储存项,通过比较 CO_2 储存项年、月尺度 CO_2 储存项总量的估算结果,旨在探寻可用于复杂地形条件下高大森林植被冠层 CO_2 储存项的估算方法。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

西双版纳热带雨林是世界上第二大热带雨林——印度马来热带雨林区(简称远东热带雨林)的一个重要组成部分^[27],位于该热带雨林的北缘。热带季节雨林是西双版纳热带雨林的主要类型和地带性植被,主要分布在海拔 900 m 以下的沟谷两侧及低丘台地^[28],以西双版纳东南部的勐腊县最为集中。西双版纳处于云南南部,年平均气温为 21.5°C ,年降水量为 1 558.8 mm,年平均风速仅为 0.5 m/s,为著名的静风区^[29],土壤为砖红壤。

观测样地位于中国生态系统研究网络西双版纳热带季节雨林定位观测样地 ($21^\circ56'\text{N}$ 、 $101^\circ15'\text{E}$),

雨林群落高度 32 ~ 35 m,结构复杂,分层现象明显。乔木层按高度即可分为 3 层:上层优势种主要为千果榄仁 (*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼 (*Pometia tomentosa*);中层常见种有云南玉蕊 (*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树 (*Gironniera subaequalis*)、山焦 (*Mitrephora maingayi*) 等;下层主要种包括云树 (*Garcinia cowl*)、假广子 (*Knema erratica*)、细罗伞 (*Ardisia tenera*)、蚊花 (*Mezzettiopsis creaghii*) 及毒鼠子 (*Dichmpetalum gelonioides*) 等。灌木层除上层乔木的幼苗幼树外,常见种有染木 (*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟 (*Morinda angustifolia*)、玉叶金花 (*Mussaenda* sp.) 等。草本层与灌木层处于同一层次,种类不多,常见的有凤尾蕨 (*Pteris* sp.)、海芋 (*Aloxaxis macrorrhiza*)、盈江南星 (*Arisaema inkiangense*) 等。藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著,是典型的季节雨林群落结构^[30-31]。

观测铁塔位于起伏山坡阶梯上的小凹地之处(图 1 中三角形区域),四面有山丘,铁塔底部与周围山丘顶的相对高差处于 80 ~ 270 m 之间,水平距离为 400 ~ 686 m。地形呈现东西至南北走向,白天山顶受到太阳辐射增温,山顶近地层的大气受热上升,谷底空气沿山坡爬升,易形成谷风。在夜间,大气层结相对稳定^[25-26],辐射冷却作用明显,易形成稳定逆温层结^[32]。

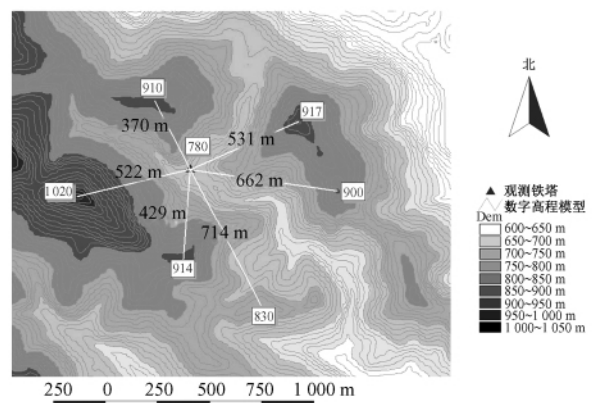


图 1 热带季节雨林观测铁塔位置示意图

Fig. 1 Sketch map of situation around observation tower

注:方框内数字为山顶海拔(m),白线为铁塔距山顶直线距离。

1.2 研究方法

1.2.1 仪器设置

涡度相关系统设置在 1.5 倍冠层高度(距地表 48.8 m 处)。采用三维超声风速测定仪(CSAT-3, Campbell Sci. Inc., USA)观测三维风速,配合开路红外气体分析仪(LI-7500, LI-COR, USA)测定 CO_2 、 H_2O 浓度及其脉动。上述仪器均与 CR5000 型数据采集器(CR5000, Campbell Sci. Inc., USA)相连,昼夜连续自动采集,原始数据采样频率为 10 Hz,每

30 min 输出 1 组平均值。

在观测铁塔上同时设置有 8 通道 CO₂ + H₂O 廓线监测系统 (8 channel CO₂ + H₂O profile system, LI-840, LI-COR, USA) 同步测定 8 层 CO₂ 浓度和水汽含量。观测高度为: 0.5、1.0、4.0、10.2、16.3、36.5、48.8、69.0 m。采样频率为 1 Hz (每个高度观测 30 个数据, 输出最后 10 个数据) 4 min 完成 1 次循环, 每日 12:00 切换 CO₂ 标气对红外气体分析仪进行标定。数据输出采用 SQL 2005 处理, 输出 60 min 平均 CO₂ 浓度数据。

气象观测系统包括 7 层 3 杯风速仪 (A100R, VECTOR, UK) 和温湿自记 (HMP45C, VAISALA, Finland), 观测高度分别为 4.2、16.3、26.2、36.5、42.0、48.8、69.8 m。大气压观测设置在距地表 4.2 m 高度 (CS105, VAISALA, Finland)。上述仪器均与 CR10X 型数据采集器 (CR10X, Campbell Sci. Inc., USA) 相连, 每 30 min 输出 1 组平均值。所有仪器均经过严格的标定, 以确保数据的可靠性。

1.2.2 计算方法

本研究中, 为与廓线法输出数据能够进行比较, 将涡度相关法所测的 CO₂ 浓度数据及同期气象数据进行处理, 输出 60 min 平均值。观测时间为 2007 年 4 月—2009 年 4 月, 获得 2 年完整的涡度相关系统和廓线系统的同期 CO₂ 浓度观测和气象资料。

目前一般采用式 (1) 计算净生态系统 CO₂ 交换量 (F_{NEE}), 式 (1) 右侧第 1 项为湍流通量 (F_c), 第 2 项为涡度相关通量测定高度以下的 CO₂ 储存项 (F_s)^[3, 33]。

$$F_{NEE} = (\overline{w'c'}) + \int_0^{z_r} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz \quad (1)$$

式中: w' 为垂直方向风速脉动, c' 为 CO₂ 浓度脉动, 上方横线表示协方差, z_r 为仪器观测高度, $\partial \bar{c} / \partial t$ 为 CO₂ 浓度随时间的变化率, z 为取样高度。

西双版纳热带季节雨林植被冠层 CO₂ 储存项 (F_s) 受观测仪器下方 CO₂ 浓度变率影响。涡度相关法 (F_{s-EC}) 估算储存项依据 Hollinger 等^[34] 和 Ohkubo 等^[17] 方法, 数据来源为涡度相关系统测定的 CO₂ 浓度。

$$F_{s-EC} = \frac{\Delta c}{\Delta t} z \quad (2)$$

式中: z 为涡度相关系统放置高度 (距地表 48.8 m 处); Δt 为相邻的时间间隔, 取 60 min 进行计算, Δc 为 Δt 内的 LI-7500 观测获得的单点 CO₂ 浓度差 (单位为 mg/m³)。

廓线法 (F_{s-PM}) 估算储存项方法参照 Aubinet 等^[35] 和 Finnigan 等^[10]。

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

式中: Δt 为 60 min, n 为观测层数 (从 48.8 m 高处向下, 共 6 层), h_i 为相邻高度间隔 (Δh) (从 48.8 m 向下, 共 6 层)。式 (3) 中的 CO₂ 浓度差 ($\Delta \bar{c}_i$) 为 $j+1$ 时刻上层 ($i+1$) 与下层 (i) 的平均 CO₂ 浓度与 j 时刻上层 ($i+1$) 与下层 (i) 的平均 CO₂ 浓度差。

$$\Delta \bar{c}_i = \frac{(c_{j+1, i+1} + c_{j+1, i}) - (c_{j, i+1} + c_{j, i})}{2} \quad (4)$$

由于廓线系统 (LI-840) 输出的 CO₂ 浓度单位为 $\mu\text{mol/mol}$, 为与涡度相关系统获得的 CO₂ 浓度数据进行比较, 采用式 (5) 统一换算为 mg/m³, Unit1 单位为 mg/m³, Unit2 为 $\mu\text{mol/mol}$:

$$\text{Unit1} = \text{Unit2} \frac{44P}{8.314(t + 273.15)} \quad (5)$$

式中: P 为实际大气压, t 为观测点所在高度的气温实测值, 均换算为 60 min 平均值。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度的时空变化特征

当森林与大气间 CO₂ 传输满足一维传输模式时, 林内 CO₂ 浓度的时空变化特征能够对植被冠层 CO₂ 储存项提供定性描述^[13]。图 2 可知, 日出后, 各层 CO₂ 浓度持续降低, 由于西双版纳热带季节雨林位于复杂地形条件下, 即便是湍流交换最强的午后, CO₂ 浓度梯度虽然减小, 但不为零。日落后, 林内各层 CO₂ 浓度逐渐升高, 以近地层浓度变化最为显著。冠层上方和下方 CO₂ 浓度表现出不同的时

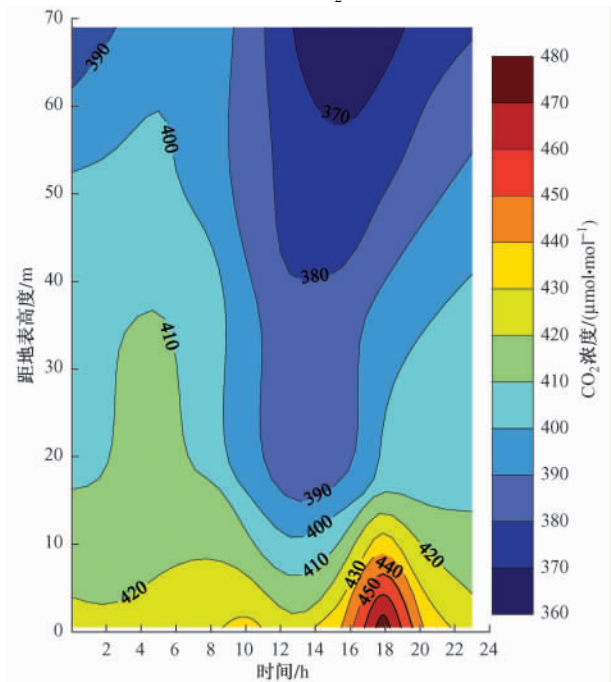


图 2 年平均 CO₂ 浓度垂直时空分布

Fig. 2 Temporal-spatial evolution of vertical CO₂ concentration

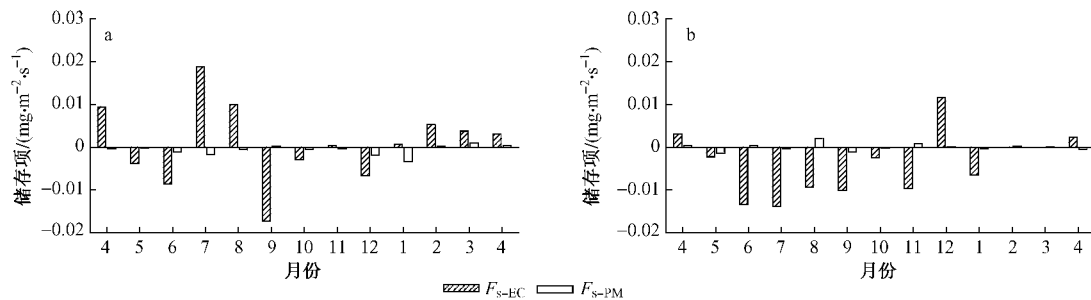
空变化规律。冠层上方 CO_2 浓度在清晨达到峰值, 午后(15:00) CO_2 浓度最低; 而冠层下方峰值出现在傍晚时分(18:00), CO_2 浓度最高可达 $480 \mu\text{mol/mol}$, 最低出现时刻在 13:00 前后。

2.2 两种方法计算的植被冠层 CO_2 储存项逐月日平均值比较

从图 3 可以看出, 采用涡度相关法估算的植被冠层 CO_2 储存项逐月日平均值的绝对值各月均高于廓线法。从全年来看, 廓线法估算的植被冠层 CO_2 储存项日平均值在各月均位于零值线附近, 而涡度相关法的估算结果在不同月份偏离零值的数值均有相对明显的波动 6—9 月偏离零值线较远。

廓线法和涡度相关法估算的植被冠层 CO_2 储存项的年平均日变化表现出相似的变化特征(见图

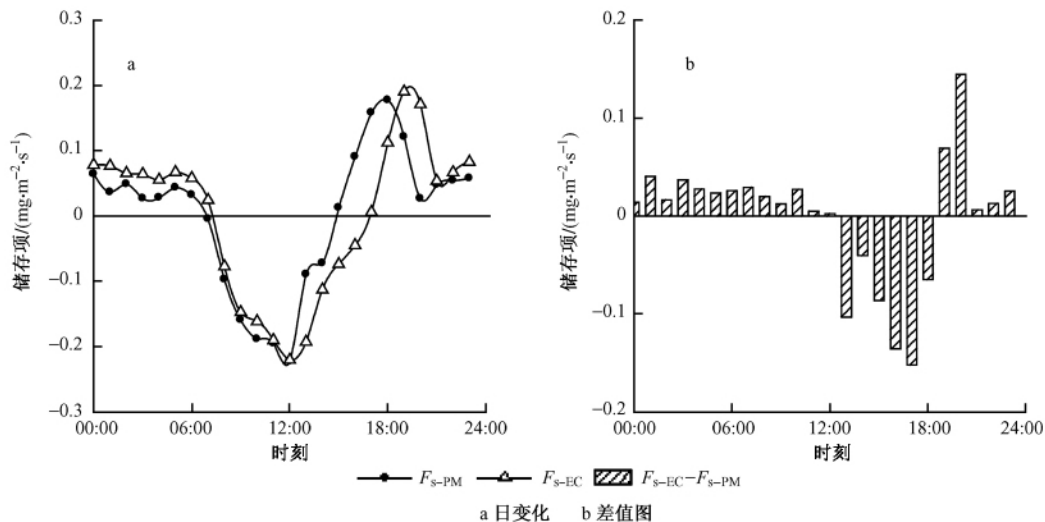
4a), 白天 CO_2 储存项为负值, 夜间反之。日变幅分别为 $-0.23 \sim 0.19 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ($F_{s-\text{EC}}$) 和 $-0.23 \sim 0.18 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ($F_{s-\text{PM}}$)。但两种方法估算的 CO_2 储存项由负转正的时段有所不同(见图 4a), 存在明显位相差异。廓线法 CO_2 储存项由负转正时刻为 14:00 前后, 涡度相关法 CO_2 储存项由负转正时刻为 17:00 左右, 廓线法估算的 CO_2 储存项数值符号变换先于涡度相关法 3 h 左右。比较涡度相关法和廓线法估算 CO_2 储存项日变化的数值差异可以看出(见图 4b), 涡度相关法估算的 CO_2 储存项除午后至傍晚时段外, 比廓线法估算值略高。而午后至傍晚时段正是近地层 CO_2 浓度变化剧烈时段(见图 2), 廓线法估算的 CO_2 储存项能够反映出植被冠层 CO_2 时空变率特征。



a. 2007 年 4 月—2008 年 4 月 b. 2008 年 4 月—2009 年 4 月

图 3 两种方法估算的 CO_2 储存项逐月日平均值比较

Fig. 3 Mean daily value of storage flux calculated by eddy covariance and profile methods at each month



a 日变化 b 差值图

图 4 植被冠层 CO_2 储存项年均日变化及两种估算结果间的数值差异

Fig. 4 Mean diurnal variation of storage flux measured by eddy covariance and profile methods

2.3 CO_2 储存项的年变化特征

比较涡度相关法和廓线法估算 CO_2 储存项月平均值的年变化特征可见(图 5), 全年廓线法估算的 CO_2 储存项月平均值均在零值附近。涡度相关法估算 CO_2 储存项月平均值变幅较大, 6 月和 9 月的 CO_2 储存项估算结果偏离零值较远。

2.4 CO_2 储存项年总量比较

CO_2 储存项在年尺度上总量应接近零值, 体现出年间总量闭合的特性^[7-8]。通过分析廓线法和涡度相关法估算的 CO_2 储存项年总量值可知, 两种方法所得的 CO_2 储存项年总量均为负值。涡度相关法估算的 CO_2 储存项年总量为 $-0.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,

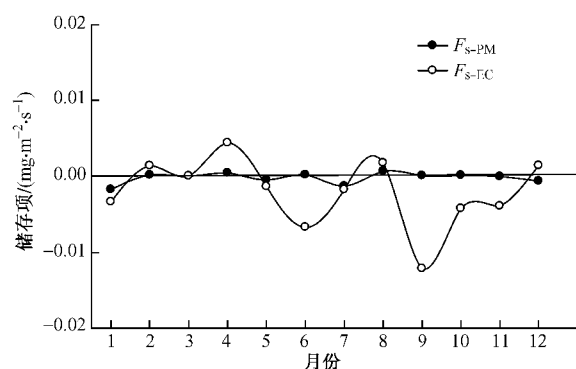
图5 两种方法计算的大气 CO₂ 储存通量的年变化

Fig.5 Annual variation of storage flux calculated by two methods

廓线法估算结果为 $-0.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

3 讨 论

3.1 CO₂ 浓度时空分布特征

白天植被冠层内 CO₂ 浓度时空分布主要受大气边界层过程的影响,夜间大气边界层过程和界面通量均发挥主要作用^[36]。Evans 等^[37]提出夜间束缚了 CO₂ 浓度的假设,解释了夜间近地层 CO₂ 浓度较高和日出后 CO₂ 浓度出现升高的现象。De Selm^[38]研究发现植被冠层 CO₂ 最大值出现在清晨,最小值出现时刻为白天。Grace 等^[39]和 Goulden 等^[40]通过观测得出亚马逊热带雨林植被冠层 CO₂ 在夜间累积,累积至清晨释放。吴家兵等^[13]在长白山森林站点的研究也认为植被冠层 CO₂ 浓度最高值出现在清晨,而最低值出现在午后时分。由西双版纳热带季节雨林 CO₂ 浓度时空变化可以看出(图2),冠层上方的 CO₂ 浓度变化趋势与大多数森林观测站点已有结论相似。但是,林内近地层 CO₂ 浓度高值出现在傍晚,表现出特殊的时空变化趋势,影响高度可达距地面 20 m 高度,出现这种现象可能受风向转变和局地环流影响^[41]。Iwata 等^[9]在亚马逊森林的研究发现,冠层上方的 CO₂ 储存项与冠层下方存在不一致现象,与冠层内外的 CO₂ 浓度梯度的大小密切相关。值得关注的是,西双版纳热带季节雨林植被冠层 CO₂ 浓度梯度明显,这也使得西双版纳热带季节雨林 CO₂ 储存项估算对 CO₂ 浓度梯度的响应更敏感。

3.2 大气 CO₂ 储存项逐月/年平均值的日变化

各月涡度相关法估算的植被冠层 CO₂ 储存项的日平均值的绝对值均高于廓线法计算结果(图3)。从全年来看,廓线法估算的植被冠层 CO₂ 储存项日平均值在各月均位于零值线附近,而涡度相关法估算结果在不同月份偏离零值的数值有相对明显的波动,6—9 月偏离零值线较远。廓线法估算的

CO₂ 储存项数值符号变换先于涡度相关法,这是由于近地层 CO₂ 浓度变化受大气层结影响而未能通过湍流作用传输到冠层上方,涡度相关法估算的 CO₂ 储存项并不能真实代表植被冠层整体的 CO₂ 浓度时空变率。从两种方法估算的年平均 CO₂ 储存项的日变幅来看,廓线法为 $-0.23 \sim 0.18 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,涡度相关法为 $-0.23 \sim 0.19 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。相比 Ohkubo 等^[12]在马来半岛的 Pasoh 站点采用廓线法估算的 CO₂ 储存项变幅结果略小($-0.56 \sim 0.14 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),但比王春林等^[42]采用涡度相关法估算 CO₂ 储存项的结果要高($-0.06 \sim 0.04 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

3.3 CO₂ 储存项月平均值和年总量估算结果比较

廓线法估算的 1—12 月植被冠层 CO₂ 储存项月平均值均趋近于零,涡度相关法估算的植被冠层 CO₂ 储存项有明显波动(图5)。结合廓线法估算的 CO₂ 储存项年总量值为 $-0.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,相比涡度相关法估算结果($-0.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)更接近零值,这表明廓线法估算结果与已有研究报道的 CO₂ 储存项在年总量上趋于零值的变化特征相符^[7,12]。

此外,廓线法在一些研究区域的应用易受环境因子的影响,如夜间阵风的影响使实测 CO₂ 浓度廓线发生改变,使 CO₂ 储存项的计算误差最高达到 50%^[10]。但西双版纳热带季节雨林处于静风区^[29],夜间风速微弱,大气稳定度高^[25-26],夜间阵风对 CO₂ 廓线观测影响微弱。

4 结 论

1) 西双版纳热带季节雨林受所处复杂地形和高大植被冠层的共同影响,CO₂ 浓度时空变化特征与其他森林站点存在差异。傍晚时段近地层 CO₂ 浓度出现堆积现象,冠层内外 CO₂ 储存量存在明显差异,CO₂ 浓度垂直梯度差别明显。冠层上方的 CO₂ 浓度变化趋势与大多数森林观测站点已有结论相似。而林内近地层 CO₂ 浓度高值出现在傍晚,影响高度可达距地面 20 m 高度。这一特殊现象使得西双版纳热带季节雨林 CO₂ 储存项估算对 CO₂ 浓度梯度的响应更敏感。廓线法估算的 CO₂ 储存项数值符号变换先于涡度相关法。从全年来看,廓线法估算的植被冠层 CO₂ 储存项各月日平均值在各月均位于零值线附近,而涡度相关法估算结果在不同月份偏离零值的数值有相对明显的波动。廓线法估算的年平均 CO₂ 储存项的日变幅为 $-0.23 \sim 0.18 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,涡度相关法为 $-0.23 \sim 0.19 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2) 廓线法估算的 1—12 月植被冠层 CO₂ 储存

项月平均值均趋近于零,涡度相关法估算的植被冠层 CO_2 储存项有明显波动。从年总量来看,廓线法估算的 CO_2 储存项年总量值为 $-0.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,而涡度相关法估算结果为 $-0.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

3)在复杂地形条件下,西双版纳热带季节雨林存在较大 CO_2 浓度梯度变异,采用廓线法进行 CO_2 储存项估算结果比涡度相关法更具有可信性。该研究结果可应用于复杂地形条件下具有高大植被冠层的森林类型。

致谢 感谢中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站的大力协助。感谢日本国立环境研究所梁乃申老师对试验提出的宝贵意见和技术支持。感谢邓云、游广永、张鹏超、李麟辉等同学在野外试验和论文思路中给予的帮助和启发。

参 考 文 献

- [1] LEE X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(1-2): 39-49.
- [2] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 195-196.
- [3] 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.
- [4] GRECO S, BALDOCCH D D. Seasonal variations of CO_2 and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2: 183-197.
- [5] GOULDEN M L, WILLIAM M J, FAN S M, et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2: 169-182.
- [6] 彭珍,胡非,蒋维楣,等. 地气通量中存贮和平流项计算方案的探讨 [J]. 气候与环境研究, 2009, 14(2): 113-119.
- [7] MASSMAN W J, LEE X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 121-144.
- [8] 温学发. 中亚热带红壤丘陵人工林生态系统 CO_2 通量 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [9] IWATA H, MALHI Y, VON RANDOW C. Gap-filling measurements of carbon dioxide storage in tropical rainforest canopy airspace [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(3-4): 305-314.
- [10] FINNIGAN J. The storage term in eddy flux calculations [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 136(3-4): 108-113.
- [11] YANG B, HANSON P J, RIGGS J S, et al. Biases of CO_2 storage in eddy flux measurements in a forest pertinent to vertical configurations of a profile system and CO_2 density averaging [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112: D20123.
- [12] OHKUBO S, KOSUGI Y, TAKANASHI S, et al. Vertical profiles and storage fluxes of CO_2 , heat and water in a tropical rainforest at Pasoh, Peninsular Malaysia [J]. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 2008, 60(4): 569-582.
- [13] 吴家兵,关德新,赵晓松,等. 长白山阔叶红松林二氧化碳浓度特征 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 49-53.
- [14] BROOKS J R, FLANAGAN L B, VARNEY G T, et al. Vertical gradients in photosynthetic gas exchange characteristics and refixation of respired CO_2 within boreal forest canopies [J]. *Tree Physiology*, 1997, 17(1): 1-12.
- [15] HOLLINGER D Y, KELLIHER F M, SCHULZE E D, et al. Forest-atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90(4): 291-306.
- [16] MALHI Y, NOBRE A D, GRACE J, et al. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1998, 103(24): 31593-31612.
- [17] OHKUBO S, KOSUGI Y, TAKANASHI S, et al. Comparison of the eddy covariance and automated closed chamber methods for evaluating nocturnal CO_2 exchange in a Japanese cypress forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(1): 50-65.
- [18] RANNIK U, KERONEN P, HARI P, et al. Estimation of forest-atmosphere CO_2 exchange by eddy covariance and profile techniques [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(1-2): 141-155.
- [19] 张一平, 龚军霞, 孙晓敏, 等. 热带季节雨林林冠碳通量不同校正方法的比较分析 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2253-2258.
- [20] 张一平, 赵双菊, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林干热季林冠上小气候特征及 CO_2 通量的观测 [J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2540-2549.
- [21] ZHANG Y P, SHA L Q, YU G R, et al. Annual variations of carbon flux and impact factors in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China [J]. *Sciences in China (Series D)*, 2006, 49(Suppl II): 150-162.
- [22] 赵双菊, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林晴天 CO_2 交换的日变化和季节变化特征 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 295-301.
- [23] TAN Z H, ZHANG Y P, YU G R, et al. The carbon balance of a primary tropical seasonal rain forest [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010, 115: D00H16.
- [24] 张一平, 龚军霞, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(5): 17-25.
- [25] 杨振, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林树冠上生态边界层大气稳定度时间变化特征初探 [J]. 热带气象学报, 2007, 23(4): 413-416.
- [26] 杨振, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林大气稳定度特征 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 130-134.
- [27] WHITMORE T C. Tropical rain forests of the far east [J]. *The Journal of Ecology*, 1984, 65: 726-727.
- [28] 吴征镒. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [29] 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 中国热带季风林缘水平热力特征的初步分析 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 205-209.

- [30] ZHANG J H, CAO M. Tropical forest vegetation of Xishuangbanna, SW China and its secondary changes, with special reference to some problems in local nature conservation [J]. *Biological Conservation*, 1995, 73(3): 229–238.
- [31] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究 [J]. *植物生态学报*, 1999, 23(5): 418–425.
- [32] 刘文杰, 李红梅. 西双版纳山地逆温资源评价 [J]. *国土与自然资源研究*, 1997(3): 36–39.
- [33] WOFSY S, GOULDEN M, MUNGER J W, et al. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest [J]. *Science*, 1993, 260: 1314–1317.
- [34] HOLLINGER D Y, GOLTZ S M, DAVIDSON E A, et al. Seasonal patterns and environmental control of carbon dioxide and water vapour exchange in an ecotonal boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(8): 891–902.
- [35] AUBINET M, BERBIGIER P, BERNHOFER C H, et al. Comparing CO₂ storage and advection conditions at night at different carboeuroflux sites [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 116(1): 63–94.
- [36] CULF A D, FISCH G, MALHI Y, et al. The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 85: 149–158.
- [37] EVANS G C. Ecological studies on the rain forest of southern Nigeria II: The atmospheric environmental conditions [J]. *The Journal of Ecology*, 1939, 27(2): 436–482.
- [38] DE SELM H R. Carbon dioxide gradients in a beech forest in central Ohio [J]. *The Ohio Journal of Science*, 1952, 52: 187–198.
- [39] GRACE J, MALHI Y, LLOYD J, et al. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest [J]. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 209–217.
- [40] GOULDEN M L, MILLER S D, DA ROCHA. Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, 111(8): 1–14.
- [41] 谭正洪, 张一平, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林林冠上方和林内近地层 CO₂ 浓度的时空动态及其成因分析 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 555–567.
- [42] 王春林, 周国逸, 王旭, 等. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析 [J]. *中国农业气象*, 2007, 28(3): 233–240.

(责任编辑 赵 勃)

欢迎订阅《北京林业大学学报(社会科学版)》

《北京林业大学学报(社会科学版)》是教育部主管、国内外公开发行的全国性社科类期刊,《北京林业大学学报(社会科学版)》重点研究林业和生态环境建设中的哲学、社会科学问题,力求对林业和生态环境建设中全局性、战略性和前瞻性的重大课题作出科学的理论回答。本刊目前主要设“森林文化”、“林业史”、“森林与环境法律问题”、“环境与艺术”、“农林经济理论与政策”等栏目。本刊为“中文社会科学引文索引”(CSSCI)来源期刊。

本刊为大 16 开,季刊,季末月出版。国内定价为每期 30.00 元。国内统一刊号为 CN11-4740/C,邮发代号为 80-322,欢迎各单位及个人投稿、订阅。订阅也可与编辑部直接联系,联系方式如下:

地址:100083 北京林业大学 148 号信箱 社会科学版编辑部

电话:010-62338397