## 西双版纳热带季节雨林干热季林冠上 小气候特征及 CO<sub>2</sub> 通量的观测

### 张一平<sup>1</sup>,赵双菊<sup>1,4</sup>,于贵瑞<sup>2</sup>,窦军霞<sup>1,3,4</sup>,刘文杰<sup>1,3,4</sup>,孙晓敏<sup>2</sup>

(1.中国科学院西双版纳热带植物园,昆明 650223; 2.中国科学院地理科学与资源环境研究所,北京 100101;
3.中国科学院生态环境研究中心,北京 100085; 4.中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要:热带森林在陆地生态系统中起着重要的作用,但是人们对它在碳循环中的作用却了解不多;近年来,为了对其进行深入研究,热带森林的 CO<sub>2</sub> 通量成为了研究的热点。应用微气象法中的开路系统涡度相关法,使用设置在西双版纳一片成熟的热带季 节雨林中观测铁塔上的观测仪器所得的干热季 7 个晴好天气的 CO<sub>2</sub> 通量及小气候观测数据,对冠层的 CO<sub>2</sub> 通量及小气候特征 进行了分析研究。研究结果表明:(1)热带季节雨林林冠上风速及摩擦风速在中午和上半夜较大,而后半夜和上午较小;风向有 显著的昼、夜交替特征,昼间多为偏东风(45~135°),而夜间多为偏西风(250~280°);(2)林冠上方气温和树冠面表温具有显著 的日变化特征,树冠表温日变化幅度大于气温,热量由空气传向树冠中,在观测的 7d 中,气温有着较明显的升高趋势;(3)干热 季林冠上湿度变化范围为 26.5%~97.2%,饱和水汽压差数值大小介于 0.3~30.5 hPa 之间;(4)CO<sub>2</sub> 浓度在 364.5~408.5 ml/m<sup>3</sup> 之间变化,夜间浓度升高,而昼间 CO<sub>2</sub> 浓度降低;(5)地下 5cm 土壤温度与气温一样日变化规律明显,土壤含水量的变化 幅度很小,在 7d 内其变化幅度维持在 19.9%~23.3%之间,日变化幅度更小;(6)总体上讲林冠上方显热通量小于潜热通量, 上午显热通量和潜热通量的数值基本相同,但是在中午和下午,潜热通量远大于显热通量,充分显示了西双版纳干热季热带雨 林森林的热量支出主要是蒸腾耗热;(7)观测期间,生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换的平均日变化看,昼间最大的净 CO<sub>2</sub> 吸 收速率为一12.4  $\mu$ mol/(m<sup>2</sup> • s),夜间最大的净释放速率为 6.6  $\mu$ mol/(m<sup>2</sup> • s)。净 CO<sub>2</sub> 交换的日累积量在-0.0665~0.0448 mol/m<sup>2</sup>范围内变化,7d 的累积量为-0.0140 mol/m<sup>2</sup>,表明在西双版纳干热季的 7 d 观测时间段里,热带季节雨林呈现弱的碳 汇效应。

关键词:涡度相关;热带季节雨林;小气候; $CO_2$ 通量;生态系统净 $CO_2$ 交换;西双版纳 文章编号:1000-0933(2005)10-2540-10 中图分类号:Q142,Q945.1,S718.5 文献标识码:A

#### 又阜编亏:1000-0933(2005)10-2540-10 甲图万尖亏:Q142,Q945.1,S718.5 又毗孙识码:A

# Characteristics of microclimate and CO<sub>2</sub> flux above a tropical seasonal rain forest in dry-hot season of Xishuangbanna, southwest of China

ZHANG Yi-Ping<sup>1</sup>, ZHAO Shuang-Ju<sup>1,4</sup>, YU Gui-Rui<sup>2</sup>, DOU Jun-Xia<sup>1,3,4</sup>, LIU Wen-Jie<sup>1,3,4</sup>, SUN Xiao-

Min<sup>2</sup> (1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Research Centre for Eco-environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 4. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2540~2549.

Abstract: Tropical forests play a great role in the terrestrial ecosystem, however, little is known about its effects on carbon cycle. In recent years, many researches have focused on  $CO_2$  flux in order to further understand tropical forests how to

基金项目:中国科学院知识创新重大资助项目(KZCX1-SW-01-01A);国家 973 资助项目(2002CB412501)

收稿日期:2004-05-15;修订日期:2005-03-25

作者简介:张一平(1957~),云南人,博士,研究员,主要从事生态气候研究.E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

致谢 :本研究得到中国科学院生态系统研究网络西双版纳热带森林生态系统定位研究站的大力支持 ,Dr Xiaoming Zou 帮助修改本文 ,刘梦楠同 志参加了观测数据的收录工作 ,在此表示感谢

Foundation item: the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-01A and KZCX2-406) and the Development Program in Basic Science of China (No. 2002CB412501)

Received date: 2004-05-15; Accepted date: 2005-05-25

Biography: ZHANG Yi-Ping, Ph., D., Professor, mainly engaged in ecoclimatology. E-mail: yipingzh@xtbg. ac. cn

influencing on carbon balance. Based on the eddy covariance method and by using of open-path CO<sub>2</sub> analyzer placed on a tower in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, 7-clear day data about CO2 flux and microclimate factors in dry hot season were used to analyze canopy characteristics of CO<sub>2</sub> flux and microclimate elements. The results showed that, (1) Wind speed and friction wind speed was larger at the noon and the first half of the night, while was less in the forenoon and the second half of the night; there had obvious alternation in wind direction above the canopy, with more east wind  $(45 \sim 135^{\circ})$  appearing in the daytime and more west wind coming forth in the nighttime  $(250 \sim 280^\circ)$ ; (2) There had significant characteristics of daily variation in air temperature and canopy surface temperature, moreover, the daily range of canopy surface temperature was larger than that of air temperature which resulted that heat was transferred from air to canopy. During the 7 days, air temperature presented an obvious trend of rise. (3) In the dry hot season, relative humidity and water vapour deficit varied from 26.5 to 97.2% and from 0.3 to 30.5 hPa, respectively; (4) CO<sub>2</sub> concentration ranged between 364.5 and 408.5ppm, moreover, it increased in the nighttime and decreased in the daytime. (5) The characteristics of daily variation of the 5cm soil temperature were clear and similar with those of air temperature. The range of the soil water content was very small, with the values varying from 19.9 to 23.3% during the 7 days. The daily range of the soil water content was especially small. (6) Generally speaking, sensible heat flux was less than latent heat flux. In the forenoon, sensible heat flux was nearly equal to latent heat flux, but latent heat flux was much larger than sensible heat flux at the noon and in the afternoon, which showed that transpiration was mainly payout of the heat in Xishuangbanna tropical seasonal rain forest; (7) During the observation period, net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange fluctuated between  $-20.9 \ \mu \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and 17.6  $\mu \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  with the maximum of net CO<sub>2</sub> uptake was in a range from  $-20.9 \ \mu \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  to  $-12.9 \ \mu \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . The average diurnal variation of NEE showed that the maximum of net CO<sub>2</sub> uptake was  $-12.4 \,\mu$ mol/(m<sup>2</sup> · s) and the minimum of net CO<sub>2</sub> emission was 6.6  $\mu$ mol/  $(m^2 \cdot s)$ . The daily accumulated net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange varied from -0.0665 to 0.0448 mol/m<sup>2</sup> and the total accumulated  $CO_2$  within 7 clear days was  $-0.0140 \text{ mol/m}^2$ , which indicated that the tropical seasonal rain forest was a small carbon sink within the 7 clear days of dry hot season in Xishuangbanna.

**Key words:** eddy covariance; tropical seasonal rain forest; microclimate; CO<sub>2</sub> flux; net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange; Xishuangbanna

CO<sub>2</sub> 等温室气体增加所引起的全球变化已受到各方面的关注。陆地生态系统碳收支在全球变化中起着举足轻重的作用,而 森林作为陆地生态系统的主体,扮演着重要角色。热带森林以其丰富多样的物种数,复杂的群落结构以及巨大的生物量,成为支 配全球碳平衡的主要因素,但是未受干扰的热带森林在全球气候变化中的作用仍是一个有争议的问题<sup>[1]</sup>。

热带雨林覆盖了地表植被面积的 12%<sup>[2,3]</sup>,其巨大的生物量对全球碳平衡起着重要作用,使得热带雨林的碳汇/源问题成为研究的热点。Houghton 等用长期资料估算了热带地区由于森林砍伐和火灾向大气中排放的 CO<sub>2</sub> 量<sup>[4]</sup>,结果表明热带森林是 大气 CO<sub>2</sub> 的一个重要源;但是 Tian 等对年际间变化的模拟分析结果却证明巴西热带森林生态系统有时也会成为大气的一个 碳汇<sup>[5]</sup>;对亚马逊热带雨林 CO<sub>2</sub> 通量的直接观测表明这个地区在一个短期内至少是个 CO<sub>2</sub> 汇<sup>[6]</sup>,而且全年可能都是碳汇<sup>[3,7]</sup>。 Grace 等对没有干扰的热带森林的局部观测结果和 Philips 等进行的长期实验调查,都证明了热带碳汇的存在<sup>[7,8]</sup>。Aoki 等通过 CO<sub>2</sub> 的垂直廓线估计了 CO<sub>2</sub> 的通量<sup>[9]</sup>,计算得出当入射的太阳辐射为 907 W/m<sup>2</sup> 时,该森林的 CO<sub>2</sub> 净吸收量为 1.2 mg/ (m<sup>2</sup> • s)。马来半岛热带雨林的短期观测结果表明<sup>[10]</sup>,至少在观测期间热带雨林是 CO<sub>2</sub> 的汇,对生物圈的 CO<sub>2</sub> 的吸收起着重要 的作用。

应用涡度相关法测定森林生态系统与大气间 CO<sub>2</sub> 通量值的连续性观测已在各种森林中得到了实施,但是多数都是在欧洲 和北美的北方森林或温带森林中进行。美国大气科学家 P. Tans 领导的研究小组利用大气和海洋模型以及大气 CO<sub>2</sub> 浓度的观 测资料研究发现,北半球中高纬度陆地是一个巨大的碳汇,其值可达 2~3 PgC/a,而海洋的作用十分有限<sup>[11]</sup>;随后的几份研究 表明<sup>[12~15]</sup>,北半球中高纬度的陆地起着大气碳汇的作用,其中森林生态系统的碳汇作用十分显著。但是应用涡度相关法进行热 带雨林通量的测定还只在少数的地区有所开展,如巴西的亚马逊热带雨林<sup>[5]</sup>和马来半岛<sup>[10]</sup>。

为探讨我国陆地生态系统碳通量的分布特征和长期变化规律,于 2002 年建立了 ChinaFlux,其中 ChinaFlux 西双版纳热带 雨林通量观测站的建立,使得的我国热带季节雨林长期通量观测、研究得以实现。但由于通量观测站建立的时间较短,加之数据 处理方法正在摸索之中,所以本文仅选择了干热季 6 个晴好天气的观测资料,初步分析了热带季节雨林林冠上通量的基本特征 及变化规律,以期为分析、研究热带季节雨林的长期通量特征打下基础。

#### 25 **卷**

1 研究概况

#### 1.1 样地概况

观测样地在云南省西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区内(21°57′N、101°12′E,海拔756 m),距中国科学院西双版 纳热带雨林生态系统定位研究站约10km。样地所在的森林为原生的热带季节雨林,其群落(林冠)高度35 m 左右,结构复杂,分 层现象明显,乔木层按高度即可分为3层:上层高30 m 以上,优势种主要为千果榄仁(Terminalia myriocarpa)、番龙眼(Pometia tomentosa);中层高度在16~30 m 之间,常见种有云南玉蕊(Barringtonia macrostachya)、大叶白颜树(Gironniera subaequalis)、 山焦(Mitrephora maingayi)等;下层高16 m 以下,主要种包括云树(Garcinia cowal)、假广子(Knema erratica)、细罗伞(Ardisia tenera)、蚁花(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(Aloxasis 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<sup>[1]</sup>。

本区位于热带雨林的北缘,终年受西南季风控制,属热带季 风气候,一年中有雾凉季(11~翌年2月份)、干热季(3~4月 份)、湿热季(5~10月份)之分<sup>[2]</sup>,该地区独特的天气现象为雾日 较多,年雾日可达186.4d,在雾凉季(11~2月份)月平均雾日均 超过23d,最多的1月份可达26.1d;一般在22:00左右开始起 雾,直到第2天12:00以后才逐渐消散;与雾凉季相比,干热季 的雾生成时刻较迟,维持时间较短,一般在23:00之后才开始起 雾,而在10:00左右就逐渐消散。

1.2 研究方法及数据处理

1.2.1 仪器设置 西双版纳热带季节雨林主要分布在山间沟谷中,为此,气象观测铁塔(图1)设置在沟谷中(海拔高度约756m),周围的山峰海拔高度在830~1020m之间,铁塔与山峰顶的直线距离为400~680m之间。

涡度相关技术通过计算垂直风速和 CO<sub>2</sub> 浓度之间脉动的协 方差来测量 CO<sub>2</sub> 通量。瞬时三维风速和温度及其脉动是由安装 在观测铁塔 48.8m 处(高于林冠层 15~16m)的三维超声风速测 定仪(CSAT3,美国 CAMPBELL 公司)测量。为了将铁塔导致的 流场变形减小到最低程度,一般将其安装在铁塔的逆风向。由于 该地区处于西南季风区,因此将探头固定于与正北的夹角为



#### 图 1 观测铁塔位置概况

Fig. 1 The situation of observation Tower

210°的 3m 长的铁臂支架上。开路红外气体分析仪(LI-7500,美国 LI-COR 公司)用来观测 CO<sub>2</sub> 和水汽通量,同样安装在 48.8m 高度上。CSAT3 和 LI-7500 的取样频率均为 10Hz。

铁塔还装有由 7 层 3 杯风速仪(A100R,英国 VECTOR INSTRUMENTS 公司)和温湿计(HMP45C,芬兰 VAISALA 公司)构成的风速和温湿度垂直梯度观测系统;铁塔上架设了 6 层 PAR 传感器(顶层点状 LI190SB,美国 LI-COR 公司;其余为 1m 长 10 点杆状,LQS70-10SUN,美国 APOGEE 公司),观测光合有效辐射的垂直变化;在观测铁塔顶层设置有太阳辐射传感器(CM11,荷兰 KIPP&ZONEN 公司),在铁塔 41.6m 处设置有太阳辐射和反射辐射(长、短波)及净辐射观测的传感器(CNR-1,荷兰 KIPP&ZONEN 公司);另外,还设置了地温观测仪获取土壤温度数据(TCAV,美国 CAMPBELL 公司);土壤温度梯度则利用两套温度传感器进行测定(107-L,和 105T,美国 CAMPBELL 公司);安装了土壤热通量板(HFP01,荷兰 HUKSEFLUX 公司)和 3 层土壤湿度传感器(CS616-L,美国 CAMPBELL 公司)以收集土壤热通量和土壤水分等相关数据;此外,在森林群落 冠层和林内低冠层设置了 2 层红外温度传感器(IRTS-P,美国 APOGEE 公司),对植物冠层表面温度进行监测。各种数据用 DATALOGGER(CR5000,CR10X,CR23X-TD+AM25T,美国 CAMPBELL 公司)收集、存储。原始数据的记录和实时计算均由 系统软件 Loggernet(美国 CAMPBELL 公司)完成。

**1.2.2** 数据处理 CO<sub>2</sub> 通量需要应用垂直风速和 CO<sub>2</sub> 浓度脉动的协方差进行计算<sup>[16,17]</sup>,其假定的前提条件是垂直平均风速  $\overline{w} \approx 0$ 。因此对风速的 3 个分量进行三维坐标旋转<sup>[18,19]</sup>,其目的是使垂直平均风速转化为 0。热带季节雨林的空气湿度较大,为 了避免湿空气的影响,对通量数据进行 WPL 修正(超声湿度校正,Webb, Pearman and Leuning correction)。

本文选取了 2003 年 3 月  $1 \sim 7$  日 (DOY:  $60 \sim 67$ )天气晴好的观测数据进行分析,该时段属于干热季,温度相对较高,湿度较

低。分析中的数据均为 30min 的平均值。为了探讨 CO<sub>2</sub> 通量生态 系统净 CO<sub>2</sub> 交换的日累积量,对观测得到的生态系统净 CO<sub>2</sub> 交 换以 *u*\* >0. 2m/s 为阈值进行筛选,并通过模型拟合关系式对数 据进行插补。

CO2 通量的计算公式:

$$F_c = \overline{w' \rho'_c} \tag{1}$$

w'为垂直风速的瞬时脉动, $\rho'_e$ 表示 CO<sub>2</sub> 浓度的瞬时脉动。 CO<sub>2</sub> 通量方向定义向下为负,向上为正。

林冠中 CO<sub>2</sub> 储存量用下式进行计算:

$$F_{S} = \frac{\Delta c(h)z}{\Delta t} \tag{2}$$

式中,变量  $\Delta c(h)$ 表示在测量高度上 CO<sub>2</sub> 浓度以 30min 为 间隔的时间变化,z 为测量高度, $\Delta t$  为测量 CO<sub>2</sub> 浓度变化的时间 间隔; $F_s$  表示通量观测高度以下林内的 CO<sub>2</sub> 储存量,其单位与 CO<sub>2</sub> 通量相同,其正值和负值分别代表林内空气中 CO<sub>2</sub> 储存量 增加和减少。

生态系统净 $CO_2$ 交换为 $CO_2$ 通量与林冠中 $CO_2$ 储存量两者之和,即:

$$NEE = F_c + F_s \tag{3}$$

根据其它热带地区已有的模型并结合本地区观测的实际情况,昼间净 CO<sub>2</sub> 交换利用 *NEE* 与光合有效辐射的关系进行模拟;夜间则用 NEE 与地下 5cm 的土温的关系进行拟合。

2 结果分析

2.1 林冠上气象要素时间变化

2.1.1 太阳辐射及光合有效辐射 观测期间铁塔林冠上(41.6m处)的太阳辐射及光合有效辐射的时间变化如图 3 所示,可见 研究期间天气晴好,总辐射(图 3a)的日变化十分平稳,最大值为 862 W/m<sup>2</sup>,出现在 2003 年 3 月 3 日 14:00(BJT,DOY62)。光合 有效辐射的变化趋势与太阳总辐射相似,最大峰值同样出现在 3 月 3 日。





Fig. 3 Variation of solar radiation above the canopy

2.1.2 风速、风向和摩擦风速 风速、风向和摩擦风速在涡度相关通量测量中起着关键作用。图4显示了林冠上水平风速、风向和摩擦风速的时间变化趋势。可见,热带季节雨林林冠上风速总体不是很强,在中午时分和上半夜风速较大,而后半夜和上午较小,在傍晚也有一个风速低值区。摩擦风速与水平风速变化趋势非常相似,其最大值也出现在中午,次峰值出现在前半夜。总体而言摩擦速度数值昼间较大,夜间较小,下午大于上午。风向具有较强的日变化特征,昼间多为东北~东南风(45~135°),而夜间多为偏西风(250~280°),林冠上超声风速仪安装的方位角为 210°,可以认为铁塔对测量的影响较小。

2.1.3 气温和树冠表温 图 5为林冠上方气温和树冠面表温的时间变化。由图 5 可知,季节雨林林冠层上方,气温昼间较高, 夜间较低,呈现显著的日变化特征。而林冠面表温的日变化趋势与气温相似,但日变幅大于气温,一般在 10:00~14:00,林冠面 表温与气温几乎相等;其余时间,气温高于林冠面表温,在前半夜差异较明显。林冠面表温的最高值与气温相近,而林冠面表温 最低值低于气温最低值较多。从图 5 可见,气温和林冠面表温的日际间变化较小,具有较好重复性。



Fig. 2 The instruments and mounted height in this

2.1.4 相对湿度和饱和水汽压差 图 6 给出了热带季节雨林林冠层上方空气相对湿度和饱和水汽压差的时间变化。可见,西 双版纳热带季节雨林相对湿度较大,6:00~8:30 相对湿度均在 90%以上,接近饱和状态。中午和下午,相对湿度略低。饱和水汽 压差的变化与相对湿度是相对应的,相对湿度出现最大值的时刻正是饱和水汽压差出现最小值的时刻。饱和水汽压差上午数值 较小,中午和下午较大,也就是说林冠上层空气在上午更接近于饱和状态,下午偏离饱和状态。虽然观测期间是在干热季,但是 热带季节雨林林冠上仍保持较高的湿度,相对湿度的变化范围为 26.5%~97.2%。从饱和水汽压差上看,其数值大小介于 0.3 ~30.5hPa 之间,后面 4d(DOY63~66)的不饱和水汽压差的最大峰值略大于前面 3d(DOY60~62)。



图 4 林冠上水平风速、摩擦风速、风向的时间变化

Fig. 4 Variation of wind speed, friction wind speed and wind direction above the canopy





Fig. 5 Variation of air temperature (Ta) and the surface temperature (Ts) of the canopy above canopy





2.1.5 CO<sub>2</sub> 和水汽浓度 图 7a 显示了西双版纳热带季节雨林林冠层上 CO<sub>2</sub> 和水汽浓度的时间变化。由图 7a 可以看出,CO<sub>2</sub> 浓度在 364.5~408.5 ml/m<sup>3</sup> 之间变化,其变化具有明显的规律性和周期性,夜间浓度升高,而昼间 CO<sub>2</sub> 浓度降低。水汽浓度的 变化规律性较差,总的趋势为下午到前半夜较低,而后半夜到中午较高。总体而言,水汽浓度与 CO<sub>2</sub> 浓度有着较为相似的变化 趋势。



Fig. 7 Variation of  $\mathrm{CO}_2$  and  $\mathrm{H}_2\mathrm{O}$  concentration above the canopy

a. 7 天的变化 The ariation of 7 days; b. 日变化 Diurnal variation

林冠上的  $CO_2$  和水汽浓度的日变化如图 7b 所示,可见, $CO_2$  和水汽浓度的日变化趋势比较相似;并且两者在 0:00~13:00 左右的数值均大于 13:30~24:00 的数值。从凌晨至早晨 8:00 左右, $CO_2$  浓度呈上升的趋势;在 8:00 达最大(398.9 ml/m<sup>3</sup>),此 后浓度降低,至 11:00 左右  $CO_2$  浓度出现次峰值;随后继续下降,至 18:30 左右达最低值(366.8 ml/m<sup>3</sup>),随后缓慢回升。林冠上 的水汽浓度于 12:30 出现最大值(13.1 g/m<sup>3</sup>);在 16:00 出现最小值(9.1 g/m<sup>3</sup>)。

2.1.6 土壤温度及土壤含水量的时间变化 土壤温度及土壤 含水量直接影响着土壤中微生物、地面凋落物及腐殖质的呼吸 作用。对夜间生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换有着重要的作用。地下 5cm 的 土壤温度有明显的日变化(图 8),一般在 10:00 左右达到最小 值,16:00 左右出现最大值。图 7 显示出了土壤温度呈现逐渐升 高的趋势。土壤含水量的变化幅度维持在 19.9%~23.3%之间, 几乎没有日变化,变化随着日数增加而逐渐降低,与土壤温度形 成了明显的反差。

2.2 通量的时间变化特征

2.2.1 显热通量、潜热通量、土壤热通量及净辐射 总体上林 冠上方显热通量小于潜热通量(图 9a,c)。上午显热通量和潜热

土壤温度 Td 土壤含水量 V 18.0 2017.5 17.0 16.5 16.0 15.5 15.0 15.0 17.5 23.0 土壤温度(で) conter 壤含水量 water 20.6 Soil 14.5 19.8 60 61 62 63 64 65 66 日序号 DOY

图 8 地下 5cm 土壤温度(Td)及土壤含水量的时间变化

Fig. 8 Variation of soil temperatute and soil water content (V) at the 5cm below the soil surface

通量的数值基本相同,但是在中午和下午,潜热通量远大于显热通量,充分显示了西双版纳干热季热带雨林森林的热量支出主 要是蒸腾耗热。中午和下午潜热通量数值为正,热量从林冠传向林冠上方空气,林冠成为热力作用面,显示了林冠较强的蒸腾效 应;前半夜其蒸腾效应仍然存在,但数值较小;后半夜和上午,潜热通量数值较小,趋近于零值。显热通量在前半夜为负,且数值 较大,显示热量从林冠上方空气传向林冠;后半夜至上午,显热数值较小,多趋于零。显热通量和潜热通量均在14:00 左右达到 最大值。



图 9 林冠上显热(H)、潜热通量(LE)、土壤热通量(G)及净辐射(Rn)的时间变化

Fig. 9 Temporal variation of the sensible heat flux(H), latent heat flux(LE), net radiation (Rn) above the canopy and soil heat flux(G)

净辐射与太阳总辐射一样,变化趋势非常平滑(图 9b, 2a),昼间净辐射为正值,林冠层获得能量,夜间净辐射为负值,林冠 层放出能量。净辐射(图 9d)在接近地方时的正午时分(北京时,14:00)达到最大值(643.9 W/m<sup>2</sup>)。林内土壤热通量时间变化趋 势具有稳定性和较好的日变化(图 9b, d),日出前(8:30)达到其最小值,此后呈上升趋势,一般 12:00~21:00 为正,热量从空气 传入土壤,至 16:00 左右出现最大值;22:00~11:00 为负,土壤放出热量。由图 9d 可以看出,土壤热通量的最大值出现的时刻 滞后于净辐射 2h 左右。从图 9d 中还可见,上午土壤热通量的变化幅度大于下午。

2.2.2 CO2 通量变化特征及影响因素

(1) CO<sub>2</sub> 通量、CO<sub>2</sub> 储存量和净 CO<sub>2</sub> 交换的时间变化特征 林冠上方的 CO<sub>2</sub> 通量夜间多为正值(图 10a),在 18:00 左右有 一个较明显的正向峰值,午夜至次日清晨,CO<sub>2</sub> 通量较小,有时在零值附近波动;昼间均为负值,8:00 以后,随着太阳辐射的不 断增强,湍流作用也随之加剧,向下的通量不断增大,13:00~ 14:00 出现最大绝对值(图 10a)。CO<sub>2</sub> 储存量的变化趋势与 CO<sub>2</sub> 通量相似,昼间为负值,说明林冠层内 CO<sub>2</sub> 浓度减小;夜间为正值,显示了夜间 CO<sub>2</sub> 浓度升高的趋势。生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换 (*NEE*)在-20.9~17.6  $\mu$ mol/(m<sup>2</sup> • s)之间波动(图 10b),每天最大净 CO<sub>2</sub> 吸收速率在-20.9~-12.9  $\mu$ mol/(m<sup>2</sup> • s)范围内。 总体来讲,昼间生态系统净吸收 CO<sub>2</sub>,而夜间净释放 CO<sub>2</sub>。



 $\mathbf{B}_{10}$  林冠上  $\mathrm{CO}_2$  通量、 $\mathrm{CO}_2$  储存量以及生态系统净  $\mathrm{CO}_2$  交换量的时间变化

Fig. 10 Variation of CO<sub>2</sub> flux, CO<sub>2</sub> storage below the eddy covariance system and the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange above the canopy

(2)净 CO<sub>2</sub> 交换的日变化特征及其影响因素 生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换有明显的日变化(图 11a)。昼间为负值,夜间为正值,并 且总体上前半夜的净 CO<sub>2</sub> 交换大于后半夜。昼间最大的净 CO<sub>2</sub> 吸收速率为-12.4 μmol/(m<sup>2</sup> • s),夜间最大的净释放速率为 6.6 μmol/(m<sup>2</sup> • s)。光合有效辐射是太阳辐射中能够被植物直接吸收利用的部分,它直接影响着生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换。随着光 合有效辐射的增强,生态系统净 CO<sub>2</sub> 吸收速率也逐渐增强,至中午时段与光合有效辐射一起达到峰值(图 11a),午后净 CO<sub>2</sub> 吸 收速率又随着光合有效辐射的减弱而减弱。气温和饱和水汽压差也是影响昼间净 CO<sub>2</sub> 交换的重要因素。两者有着相同的日变 化趋势(图 11b)。气温和饱和水汽压差均在 8:30 达到一天中的最小值,16:30 左右出现最大值。气温和饱和水汽压差在一定程 度上的增强有利于生态系统净 CO<sub>2</sub> 吸收速率的提高,但是超过了一定限度就起到相反的作用。如图 11a, b 所示,随着气温和饱 和水汽压差的增强,净 CO<sub>2</sub> 吸收速率先逐渐增大,而午后当其继续增强时,净 CO<sub>2</sub> 吸收速率反而开始减小。





Fig. 11 Diurnal variation of net ecosystem  $CO_2$  exchange and some relative environmental factors above the canopy

摩擦风速、水平风速以及风向也都对净 CO<sub>2</sub> 交换有着一定的影响。三者的日变化趋势都很明显(图 11c,d)。湍流是涡度相 关系统测量的基本条件,而摩擦风速又是衡量湍流的一个可靠的参数。摩擦风速大说明湍流运动强,生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换就会 更活跃。昼间摩擦风速和风速的数值大于夜间(图 11 d),并且上半夜的摩擦风速和风速均大于下半夜;昼间随着太阳辐射的增 强,对流运动也不断增强,使得湍流运动出现了与太阳辐射相同的日变化趋势。也就是说昼间湍流最强,上半夜次之,下半夜最 小并且变化非常平缓。林冠上的风速呈现较明显的日变化(图 11 d),0:00~9:00 风速很小,接近于静风状态;10:00 后风速增 大,中午达最大值(1.4 m/s)随后迅速下降,在傍晚风向转换时期出现风速低值,19:00 后风速再次增加,维持在 0.8 m/s 左右, 直至 23:00 后风速逐渐减弱趋势静风。林冠上的风向具有显著的昼、夜交替特征(图 11c),在 9:00~16:00 呈现东-东南风,而 18:00~8:00 呈现偏西风;上午风向转换较快,而下午风向改变则迟缓。

(3)净 CO<sub>2</sub> 交换的观测数据与模型数据的比较 应用 Michaelis-Menten 模型<sup>[20]</sup>的公式,对昼间的净 CO<sub>2</sub> 交换进行了模拟, NEE 并没有随着光合有效辐射的增强逐渐趋于饱和状态,而是随着光合有效辐射的增强一直呈现增强的趋势。主要原因在于 干热季天气晴好,气温和饱和水汽压差都很高,使得 NEE 不易达到饱和状态,类似的现象已经在马来半岛的 Pasoh 热带雨林 中出现<sup>[10]</sup>。夜间的净 CO<sub>2</sub> 交换与地下 5cm 的土壤温度有着一定的关系,由此求算出相关方程。

根据以上的拟合方程,对缺失数据进行插补。净 CO<sub>2</sub> 交换的观测数据与插补后数据的比较情况如图 12。昼间净 CO<sub>2</sub> 交换 的观测值与模拟值,无论是变化趋势还是大小都相差不大。夜间净 CO<sub>2</sub> 交换的模拟值变化趋势更为平缓,并且规律性和重复性 较强;而观测到的夜间净 CO<sub>2</sub> 交换没有规律性可言,表现为上下波动。

(4)净 CO<sub>2</sub> 交换的累积量 经过计算得到观测期间的净 CO<sub>2</sub> 交换(*NEE*)的日累积量及逐日累积量(图 13)。净 CO<sub>2</sub> 交换的 日累积量的变化范围为一0.0665~0.0448 mol/m<sup>2</sup>,总体而言,从 60DOY 至 65DOY 这 6d 中,净 CO<sub>2</sub> 交换的日累积量有正向增 加的趋势,最后一天略有下降。61~62 DOY 净 CO<sub>2</sub> 交换的日累积量为负值,表明生态系统净吸收 CO<sub>2</sub>;63~65 DOY 净 CO<sub>2</sub> 交 换的日累积量为正值,表明生态系统净释放 CO<sub>2</sub>;62DOY 净 CO<sub>2</sub> 交换的日累积量接近零值,显示出生态系统吸收 CO<sub>2</sub> 和释放 CO<sub>2</sub> 达到了平衡。



图 12 净  $CO_2$  交换的观测值(NEE)与模块值(NEE-m)的比较 Fig. 12 Compare the observation net ecosystem  $CO_2$  exchange (NEE) with the model value(NEE-m)



图 13 生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换(NEE)日累积量及逐日累积量 Fig. 13 Daily NEE and cumulative NEE in 7 days

从净  $CO_2$  交换的逐日累积量上来看,7d 的累积量为 $-0.0140 \text{ mol/m}^2$ ,表明在干热季 7d 的观测时间段里,西双版纳热带季节雨林呈现弱的碳汇效应。

3 讨论

3.1 气温与树冠表温间热力效应

在观测期间天气晴好,受到的天气现象的干扰较少,有利于对各参数进行较为深入的分析。研究表明,林冠上方气温和树冠表温具有显著的日变化特征。林冠表温日变化幅度大于气温,热量由空气传向树冠中,这与西双版纳以前的相关研究相一致<sup>[3]</sup>。 3.2 CO<sub>2</sub> 浓度与水汽浓度

Grace 等在巴西 Rondonia 热带雨林通量观测中得到的林冠高度上的 CO<sub>2</sub> 浓度介于 350~500 ml/m<sup>3</sup> 之间<sup>[1]</sup>;我国海南尖 峰岭干季时,昼间晴天少云林冠上 2.8m 处 CO<sub>2</sub> 浓度平均值的范围为 357.5~384.0 ml/m<sup>3[4]</sup>;本次观测测得西双版纳干热季热 带季节雨林林冠上 CO<sub>2</sub> 浓度在 364.5~408.5 ml/m<sup>3</sup> 之间,与其他热带森林的 CO<sub>2</sub> 浓度相近。本研究显示,昼间 CO<sub>2</sub> 浓度呈现 下降的趋势,而夜间 CO<sub>2</sub> 浓度呈上升的趋势,这是因为昼间有太阳辐射时,植物会吸收太阳能进行光合作用,该过程中 CO<sub>2</sub> 是 重要的参与者。夜间,由于土壤、凋落物以及植物等呼吸放出  $CO_2$  放,导致林冠上的  $CO_2$  浓度升高。其浓度于 8:30 出现最大值, 随后  $CO_2$  浓度较小幅度的降低后继而回升,即在  $10:00 \sim 11:00$   $CO_2$  浓度存在一个较微弱的上升趋势。这主要是因为这段时间 内的光合作用还较弱,而生态系统呼吸在适当的温度条件下变强,造成了  $CO_2$  浓度略有回升的趋势。11:00 以后随着太阳辐射 的加强,光合作用也不断增强, $CO_2$  逐渐被叶片吸收利用,于是林冠上的  $CO_2$  浓度逐渐降低。由于光合作用的过程中不仅利用  $CO_2$ ,还需要水的参与,因此水汽浓度与  $CO_2$  浓度的日变化趋势相似(图 7b),都与光合作用的变化密切相关。

3.3 影响生态系统净 CO2 交换日变化的主要因素

光合有效辐射直接影响着生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换,气温及饱和水汽压差也有着非常重要的作用。昼间净 CO<sub>2</sub> 交换的日变化 趋势基本与光合有效辐射相对应(图 11a),夜间主要受到土壤温度的影响。上半夜净 CO<sub>2</sub> 交换大于下半夜,其主要原因就是上 半夜气温高于下半夜,有利于土壤中的微生物、地面凋落物以及植被的呼吸作用,从而释放出较多的 CO<sub>2</sub>。此外,摩擦风速直接 影响着湍流运动,而湍流又是生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换的源动力,因此,摩擦风速在一定程度上影响着生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换。简而 言之,摩擦风速越大,湍流就越强,生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换就会越活跃。因此上半夜摩擦风速明显大于下半夜(图 11d)也是造成上 半夜净 CO<sub>2</sub> 交换大于下半夜的原因之一。

3.4 生态系统净 CO2 交换的累积量

本次观测得到的西双版纳干热季热带季节雨林林冠上 7d 净 CO<sub>2</sub> 交换的范围为  $- 21 \sim 17 \ \mu mol/(m^2 \cdot s)$ , 马来半岛的 Pasoh 热带雨林干季净 CO<sub>2</sub> 交换为  $- 23 \sim 11 \ \mu mol/(m^2 \cdot s)^{[10]}$ , Malhi 等在亚马逊中部热带雨林的观测研究中得到的净 CO<sub>2</sub> 交 换介于  $- 22 \sim 24 \ \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 之间<sup>[3]</sup>。我国海南尖峰岭应用梯度法计算得到的 CO<sub>2</sub> 通量,旱季晴天昼间的 CO<sub>2</sub> 通量范围介于  $- 2.0 \sim - 21.6 \ \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 之间<sup>[4]</sup>。由此可知,西双版纳干热季热带季节雨林净 CO<sub>2</sub> 交换量的变化范围与其它热带雨林较为 相似。观测期间天气晴朗(图 3), 昼间 CO<sub>2</sub> 通量多为负值,中午前后数值较大,峰值(绝对值)出现时刻比太阳辐射的峰值时刻 (图 3)要早。这与在马来半岛的 Pasoh 热带雨林<sup>[10]</sup>和巴西 Rondonia 热带雨林的 CO<sub>2</sub> 通量情况类似<sup>[1]</sup>。

对于昼间数据的插补,采用了 Michaelis-Menten 模型公式<sup>[20]</sup>。在干热季随着光合有效辐射的增强,净 CO<sub>2</sub> 交换一直没有达 到其饱和状态,显示了西双版纳干热季节较高的饱和水汽压差对净 CO<sub>2</sub> 交换有影响<sup>[10]</sup>。应用插补齐全的数据计算净 CO<sub>2</sub> 交换 的日累积量和逐日累积量,得出了西双版纳干热季热带季节雨林为一个弱的碳汇,与 Yasuda 等干季在 Pasoh 热带雨林进行的 观测所显示该热带森林为碳汇<sup>[10]</sup>的结果相一致。

Grace 等研究表明<sup>[7]</sup>,夜间的 CO<sub>2</sub> 通量观测存在很大的不确定性,当大气环境非常稳定的情况下,夜间 CO<sub>2</sub> 在冠层积聚,到 了第 2 天,当湍流开始传递时,CO<sub>2</sub> 就会释放,形成清晨 CO<sub>2</sub> 通量突增现象。位于亚马逊西南的热带雨林有类似的情况发生<sup>[21]</sup>, 马来半岛的 Pasoh 热带雨林的 CO<sub>2</sub> 通量观测结果与之有较好的吻合<sup>[10]</sup>,并且从 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化情况上,很容易看到 CO<sub>2</sub> 浓 度迅速增加的现象。但是从本次观测的 CO<sub>2</sub> 通量来看,在清晨并没有出现正向的 CO<sub>2</sub> 通量突增的现象,这与 Malhi 等在亚马逊 中部热带雨林中所观测到的情况有相似之处<sup>[3]</sup>。Malhi 等认为虽然在温度层结稳定的平静夜晚,呼吸作用所产生的 CO<sub>2</sub> 积聚在 了林冠层内,在清晨会暴发而出;但是在稳定状况较差的夜晚,大部分 CO<sub>2</sub> 会在整个夜晚被间歇的释放<sup>[3]</sup>。本次观测期间,西双 版纳干热季热带季节雨林林冠上次日清晨没有 CO<sub>2</sub> 通量突增的现象,这是否意味着夜间的 CO<sub>2</sub> 被间歇的释放了,由于所用资 料时间较短,其情况是否如此,还需要进一步研究。

#### **References**:

- [1] Grace J, Malhi Y, Lloyd J, et al. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brrazilian rain forest. Global Change Biology, 1996, 2: 209~217.
- [2] Whittaker R H, Likens G E. The biosphere and man. In: Lieth, H., Whittaker R. H. Eds. Primary Productivity of the Biosphere. Springer. New York, 1975. 305~328.
- [3] Malhi Y, Nobre A D, Grace J, et al. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. Journal of Geophysical Research, 1998, 130 (D24): 31593~31612.
- [4] Houghton R A. Terrestrial carbon storage: Global lessons for Amazonian research. Ciencia e Cultura Sao. Paulo., 1997, 49: 58~72.
- [5] Tian H, Mellilo J M, Kichilghter D W, et al. Effects of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. Nature, 1998, 396: 664~667.
- [6] Fan S M, Wofsy S C, Bakwin P S, et al. Atmosphere-biosphere exchange of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in the Central Amazon forest. Journal of Geophysical Research, 1990, 95 (D10): 16851~16864.
- [7] Grace J, Lloyd J, McIntyre J, et al. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. Global Change Biology, 1995a, 1: 1~12.
- [8] Philips O, Malhi Y, Higuchi N, et al. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from longterm plots. Science, 1999,

**282**: 5388~5389.

- [9] Aoki M, Yabuki K, Koyama H. Micrometeorology and assessment of primary production of a tropical rain forest in West Malaysia. Journal of Agricultural Meteorology, 1975, 31: 115~124.
- [10] Yasuda Y, Ohtani Y, Watanabe T, et al. Measurement of CO<sub>2</sub> flux above a tropical rain forest at Pasoh in Peninsular Malaysia. Agriculture and Forest Meteorology, 2003, 114: 235~244.
- [11] Tans P & J W C White. In the equilibrium aspect, because of some helps that come from the plants. Science, 1998, 281: 183~184.
- [12] Kauppi P E, Mielikainen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests. 1971 to 1990. Science, 1992, 256: 70~74.
- [13] Dixon R K, Brown S, Houghton R A. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263: 185~190.
- [14] Keeling R F, Piper S C & Heimann M. Global and hemispheric CO<sub>2</sub> sinks deduced from changes in atmospheric O<sub>2</sub> concentration. *Nature*, 1996a, 381: 218~221.
- [15] Keeling C D, Chin J F S and Whorf T P. Increased activity of northern Vegetation inferred from atmosphere CO<sub>2</sub> measurments. *Nature*, 1996b, 382: 146~149.
- [16] Baldocchi D D, Hicks B B, and Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 1988, 69: 1331~1340.
- [17] Grelle A, Lindroth A. Eddy-correlation system for long-term monitoring of fluxes of heat, water vapour and CO<sub>2</sub>. Global Change Biology, 1996, 2: 297~308.
- [18] McMillen R T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. Boundary-Layer Meteorology, 1988, 43: 231~245.
- [19] Aubinet M, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 113~175.
- [20] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, et al. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. Ecology, 1994, 75: 134~150.
- [21] Grace J, Lloyd J, Mcintyre J, et al. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia 1992~1993. Science, 1995b, 270: 778~780.

#### 参考文献:

- [1] 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.植物生态学报,1999,23(5):418~425.
- [2] 张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析. 气象学报,1966,33(2):210~230.
- [3] 张一平,赵双菊,窦军霞,等.热带季节雨林热力效应时空分布特征初探.北京林业大学学报,2004.4(26):1~7.
- [4] 陈步峰,林明献,李意德,等.海南尖峰岭热带山地雨林近冠层 CO<sub>2</sub> 及通量特征研究.生态学报,2001,21(12):2166~2172.