

海南尖峰岭热带山地雨林近冠层 CO₂ 及通量特征研究

陈步峰, 林明献, 李意德, 邱坚锐, 骆土寿

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520)

摘要: 采用梯度法及 CI-301PS CO₂ 系统, 实现了海南尖峰岭热带山地雨林近冠层 CO₂、微气象因子梯度观测研究, 结果表明: 雨季晴、晴间少云及多云天气, 9:00~18:00 CO₂ 浓度平均值分别在 349~350 ml/m³ (冠上 2.8 m)、346~348 ml/m³ (冠上 0.8 m)、345~349 ml/m³ (林内 16 m)、352~357 ml/m³ (林内 5 m), 较旱季相应天气分别小 14~17.5、10.1~23.7、16.4~35.7 和 18.1~36.1 ml/m³; 1:00~8:00, 则雨季 CO₂ 浓度大于旱季; 梯度浓度廓变量和实时动力计算反映出, 8:00~18:00 CO₂ 通量由大气向林冠层, 旱、雨季平均 CO₂ 通量分别为 $(0.61 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 和 $(0.71 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$, 19:00 通量甚微, 20:00~7:00 CO₂ 通量则由林冠向大气, 平均 CO₂ 通量分别为 $(0.36 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 和 $(0.32 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$; 雨季昼夜大气流向冠层的净 CO₂ 通量是相应旱季的 1.56 倍。总辐射、冠顶净辐射通量以 13:00~15:00 为最大时域, 相对林内 21 m, 80% 的辐射热能被冠层吸收, 与 CO₂ 通量正相关; 晴天冠上潜热、感热最高值分别在 13:00~14:00 和 9:00, 反映热带山地雨林近冠层的汇、源即白昼光合固定 CO₂ 大于夜间呼吸排放 CO₂ 效应, 且雨季高于旱季。

关键词: 热带山地雨林近冠层; 能量及水热通量; CO₂ 梯度及通量

Study on the CO₂ grads and flux in near canopy layer of tropical mountain rainforest at Jianfengling, Hainan Island

CHEN Bu-Feng, LIN Ming-Xian, LI Yi-De, QIU Jian-Rui, LUO Tu-Shou (The Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou 510520, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2166~2172.

Abstract: Carbon dioxide and its flux with water and heat exchanging was studied by means of the gradient observation and outline methods in near canopy layer of tropical mountain rainforest for three years. The results were as follow: At fine, cloudlet and cloud weather in rainy season, the mean value of CO₂ content varied in a range of 349 to 350 ml/m³ at 2.8 m above the canopy, 346 to 348 ml/m³ at 0.8 m above the canopy, 345 to 349 ml/m³ at 16 m inner the forest and 352 to 357 ml/m³ at 5 m above ground in the period from 9:00 to 18:00. The CO₂ content in rainy season was lower than that in dry season. At the same weather and space-time, CO₂ content in rainy season was higher than that of CO₂ in dry season at both day and night. According to the grads calculation, there were the CO₂ flux from atmosphere to canopy with $(0.61 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ and $(0.71 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ during day time in dry and rainy seasons respectively. And there was the CO₂ flux from forestland to top of canopy with $(0.36 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ and $(0.32 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ during night in dry and rainy seasons respectively. Daily net flux of CO₂ in rainy season was 1.56 times than that in dry season. There was a maximize radiation at the canopy's top from 13:00 to 15:00 PM in fine weather. The CO₂ flux was a positive correlation with the effective radiation at the canopy layer.

Key words: tropical mountain rainforest; CO₂ content; CO₂ flux; radiation

文章编号: 1000-0933(2001)12-2166-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 39870618), 国家林业局重点资助项目 (2001-08)。

收稿日期: 2001-04-03; **修订日期:** 2001-10-10

作者简介: 陈步峰 (1958~), 男, 陕西商州人, 副研究员。主要从事森林生态环境及水、热交换研究。

陆地生态系统是人类赖以生存与持续发展的生命支持系统;而森林是陆地生物圈的主体,森林绿色植物光合作用能够有效的利用 CO₂ 气体;从而影响大气环境中 CO₂ 浓度,对人类生活环境产生积极作用,因此研究森林及其与大气间 CO₂ 浓度、传输规律已是当今保护生态环境的一个重要内容。森林的冠层是陆地地表一个天然屏障,近冠层的 CO₂ 和通量变化、与大气相接的界面的热量交换、能量传输和质量交换是反映森林植物生长及森林对大气 CO₂ 浓度影响效应的关键所在^[1]。森林的光合、呼吸的生理生态净化和调节吸收作用效应,可直接反映在森林生态系统内和外界空间,诸如森林冠层上下、林内空间的 CO₂ 含量及环境因子的变化,一方面是界面的通量特征,另一方面是空间气体含量及环境因素的变化特征。近些年来,有关森林冠层 CO₂ 浓度的研究也取得一定的进展,我国东北天然林内已初步研究了林冠层附近的 CO₂ 的昼夜变化^[2],Betts 等和 Desjardins 等应用飞艇和铁塔,对林冠 CO₂ 通量、感热通量和潜热通量进行了观测研究;Wofsy and Harriss 研究了亚马孙河流域热带雨林植被内 CO₂ 浓度廓线和大气中的循环^[3]等。

我国热带雨林近冠层二氧化碳浓度和通量特征研究,旨在深入了解热带雨林近冠层热量和质量交换机制和过程,尤其是热带山地原始雨林这一生态群落所具有的环境效益,过去迫于仪器和研究经费的极大限制,加上热带原始雨林地处偏远无人烟的复杂地带,近 30m 高度的垂直林分,实施分层、昼夜连续研究难度都非常之大^[4-6];随着科研条件的不断改善,尤其是综合观测塔和高精度的 CO₂ 分析仪的出现,构成了实现研究的可行条件。

1 研究地概况及研究方法

1.1 研究林区概况

1.1.1 研究测定林区位于海南岛的西南(18°23'~18°52'N,108°36'~109°05'E)的尖峰岭,地形四面缓坡山地原始雨林(海拔 800~960m),中间为较大面积的较平坦雨林涡区,热带季风气候,年均气温为 19.5℃,受海陆、地形的气候交替影响明显,年均降水量 2200mm,旱、雨季分明,80%雨量集中在 5~10 月份,年均风速为 1.5m/s,年均相对湿度在 67%~88%。岩石母质为花岗岩^[6]。

1.1.2 热带山地雨林原始林,组成复杂 $D>10\text{cm}$ 的乔木 154 种/hm²,平均胸径 24.1cm,上层木平均高度达 28.0m,林分郁闭度 0.96;林内冠幅重叠,自下而上有明显的 4 个冠层,以大叶白颜(*Gironniera subaequalis* Planch.)、中华厚壳桂(*Cryptocarya chinensis* Hemsl.)毛荔子(*Nephelium topengii* (Merr.)等)为中层乔木优势种类、其密度及频度分布均匀;上层优势乔木以盘壳栎(*Cyclobalanopsis patelliformis* Chun)、红稠(*Lathocarpus fenzelianus* A. Camus)、倒卵阿丁枫(*Altingia obovata* Merr. Et Chun)、油丹(*Alseodaphne hainanense* Merr.)、尖峰栲(*Castanopsis jianfeng lingensis* Duanmu)等种类,其相对密度和频度较小;下层则以谷姑条(*Mallotus hookerianus* Muell. -Arg.)、九节木(*Psychotria rubra* (Lour.))、高山蒲葵(*Livistona saribus* (Lour.) Merr. ex A. Chev.)、黄叶树(*Xanthophyllum hainanensis* Hu)、技花李榄(*Linociera ramiflora* (Roxb.) D. Don)等种类为优势。

1.2 观测设置

梯度观测设置 在林冠上 2.8m、0.8m 和林内 21m、15m、11m、4.0m 高处,分别设置 CO₂ 浓度、温度、湿度、风速观测,以旱、雨季晴天、晴间少云、晴间多云、多云天气为典型天气,1h 间隔/24h 全天候观测,冠顶上 8m 处设置总辐射、散射辐射,冠顶设置净辐射观测,30min 数采间隔。

1.2.1 CO₂ 浓度测定 采用 CID 公司的 CI-301PS 光合作用测定仪,使用两通道 CO₂ 绝对值功能,接两根 20m 长晴轮管于仪器和测定层,两通道切换时间 12s,4 层测定气流管每两个切换时差 30s,采样速率和空气流速为 0.6~0.8m 和 0.6LPm,测定时除仪器本身自动调零标定外,用 347ml/m³ 的标准 CO₂ 气体进行跨度标定(Span,标定后单通道返测标准气,10 次均值为 347.6ml/m³),每 1h 测定一次采集 6 个数据。

1.2.2 微气象观测 温度和湿度采用美国或澳大利亚(VAISALA'S INTE)温湿传感探头,其精度要求误差均小于 5%,通风干湿表和 FY-11B 数字风速仪观测温湿度、风速(精度:误差小于 5%),达到相互校正,温度每次 6~12 个重复。总辐射采用 TBQ-2 总辐射表,响应时间 $\leq 60\text{s}$;TBQ-2 加 DFP-1 型遮光环按地理纬度设定标尺日调整观测散射辐射量,采用 DFY-5 净全波辐射表测定冠顶净辐射通量,长波与全波段灵敏度误差 $\leq 10\%$ 。

1.3 通量计算

依据动力学原理,森林冠层上 CO_2 及感热、潜热通量可通过 CO_2 、风速、温度和湿度的梯度连续观测,按以下方程计算^[3];因为 $\mu_s = k(z-d) \frac{1}{\varphi_m} \frac{\partial u}{\partial z}$, 则 CO_2 通量为: $F_c = -\rho_a \mu_s^2 \frac{\partial K_c}{\partial u} \varphi_m \varphi_s^{-1}$; 感热、潜热分别为: $LE = -\rho_a c_p \mu_s^2 \frac{\partial e}{\partial u} \varphi_m (\gamma \varphi_s)^{-1}$ 和 $H = -\rho_a c_p \mu_s^2 \frac{\partial \theta}{\partial u} \varphi_m \varphi_h^{-1}$ 。

其中变量 u, θ, c, e 的梯度采用以下差分方程计算: $\frac{\partial \psi}{\partial z} = (\psi_1 - \psi_2) / (\sqrt{z_1 z_2} \ln(z_1/z_2))$ (冠上 2.8m 和 0.8m 观测值); 取 $k = 0.41, \gamma = 0.662$, 零平面位移 d 据 3 个高度风速代入 $\frac{(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)}{(\bar{v}_3 - \bar{v}_1)} \ln\left(\frac{z_3 - d}{z_1 - d}\right) = \ln\left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d}\right)$ 求得。

c_p 取 $1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ρ_a 取 $1.2987 - 0.001317e/T (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$, ρ_c 即 CO_2 体积转化为比重的系数取 $1.83 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 取 $k_c = k_w$ 且 $k_w/k_m = k_h/k_m = k_e/k_m = \varphi_m/\varphi_w = \varphi_w/\varphi_h = \varphi_m/\varphi_e$ 。无量纲稳定函数(热量、水气和 CO_2)由 Richardson 数 $R_i = g(\partial\theta/\partial z)\theta^{-1}(\partial u/\partial z)^{-2}$ 求得^[4,6], 稳定度函数采用 Pruitt 关系式^[6]: $\varphi_m = (1 - 16R_i)^{-1/3}$, $K_w/K_m = 1.13(1 - 60R_i)^{0.074}$ — $R_i \leq 0$ 和 $\varphi_m = (1 + 16R_i)^{-1/3}$, $K_w/K_m = 1.13(1 + 95R_i)^{-0.1}$ — $R_i \geq 0$ 。

2 结果分析

2.1 CO_2 浓度的梯度廓变

图 1 给出的 1999 年雨季晴天 CO_2 浓度的实时观测垂直廓变结果。廓线反映出林冠上 0.8m 和林内高 15m 的第二林冠层下,除 9:00 和 19:00 外,各检测时平均浓度均在 350 ml/m^3 以下;而冠上 2.8m 处相应检测时 CO_2 浓度比这两个检测处高一些,近地面的林内空间各实时 CO_2 均比其上 3 个空间点为高,实时 CO_2 浓度梯度廓变特征为: $C_{\text{林内}5\text{m}} > C_{\text{冠上}2.8\text{m}} > C_{\text{冠上}0.8\text{m}} > C_{\text{林内}16\text{m}}$ 。冠上 0.8m 和林内 16m 高空间, $\text{CO}_2 \leq 340 \text{ ml/m}^3$ 时域分别在 15:00~18:00 和 15:00~16:00,反映出密集雨林内上下最适光合光照,这两高度的 CO_2 浓度 $\leq 350 \text{ ml/m}^3$ 均在 10:00~18:00,而林冠上 2.8m 空间则仅在 15:00~18:00。由此可见,热带山地雨林晴天白昼近上层优势木冠上、中层优势木冠层下的 CO_2 浓度较小,而近上层优势木冠上 2.8m、林内 5m 相对这两点浓度较高,反映出白昼近林冠层叶面是 CO_2 的汇,冠上较高处、林内最低空间 CO_2 气体分别有向下、向上至林冠叶面的湍流或扩散特征。

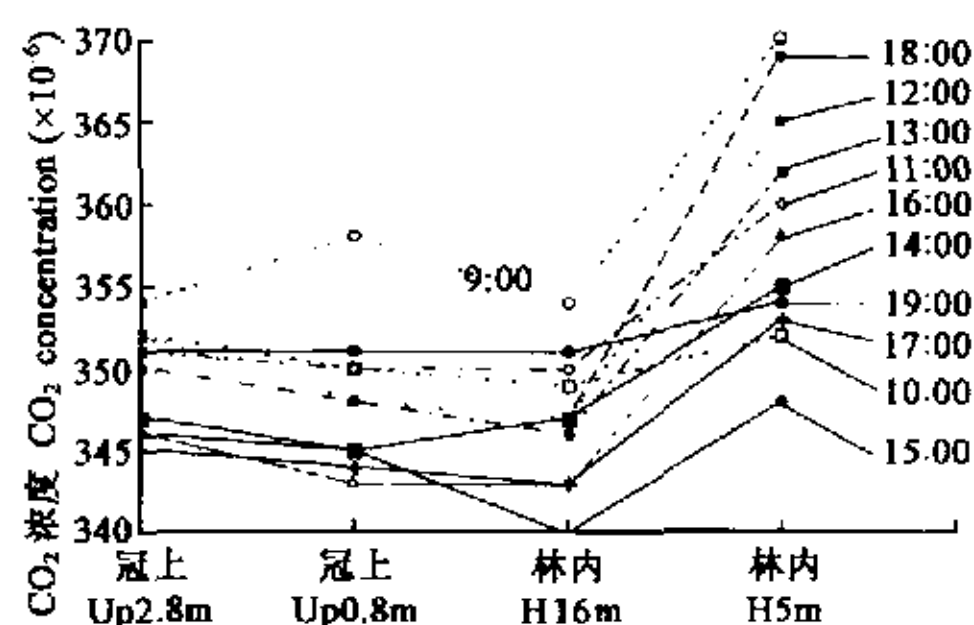


图 1 热带山地雨林二氧化碳浓度梯度廓线(1999-08-18/Fine day)

Fig. 1 Vertical outline of CO_2 content in rain forest (Aug. 18 1999)

夜间 CO_2 浓度廓变量空间特征(见图 2), CO_2 浓度梯度廓变特征为: $C_{\text{林内}5\text{m}} > C_{\text{林内}16\text{m}} > C_{\text{冠上}2.8\text{m}} > C_{\text{冠上}0.8\text{m}}$, 充分反映出,夜间山地雨林由地面至林冠的 CO_2 的梯度空间扩散趋势,由于森林植物、凋落物及土壤层的呼吸排放,夜间各检测空间 CO_2 浓度较高;浓度梯度也充分反映出,夜间近林冠层尤其是近林地是 CO_2 的排放或扩散的源。显示出夜间近林地面 CO_2 浓度较大,随高度逐渐递减,22:00 以后,林内 5m、16m 高空间 CO_2 浓度均大于 390 ml/m^3 ,且在 3:00~7:00 时间大于 410 ml/m^3 ;而冠上 0.8m 在 1~8 时段, CO_2 浓度在 $390 \sim 408 \text{ ml/m}^3$ 之间。夜间 CO_2 浓度梯度构成了由林地逐渐向上的传输或扩散趋势。

2.2 不同季节和天气 CO_2 的梯度特征

绿色植物通过光合将 CO_2 转变为有机物,被动植物消耗,通过呼吸作用、发酵作用和燃烧又返回到大气中。热带森林的消长以其本身的光合、呼吸的生理生态净化和调节吸收作用,是影响大气 CO_2 浓度含量一个重要方面;森林的光合、呼吸的生理生态净化和调节吸收作用,可直接影响森林生态系统内各层、外界

面空间 CO₂ 浓度含量;而森林各层空间 CO₂ 浓度含量则可反映出昼夜光合、呼吸生理生态作用效能大小,对于热带山地雨林,不同季节和天气 CO₂ 浓度含量的时间空间变化,可真实地反映出热带林光合作用的季节的差异,表 1 给出热带山地雨林实施旱、雨季典型天气的观测的 CO₂ 浓度含量时段平均及增减的振幅变化。

对于尖峰岭热带山地雨林冠上 2.8m、0.8m 和林内 16m、5m 高空间;在旱、雨季的晴天、晴间少云、晴间多云 3 类天气中,CO₂ 浓度在 9:00~18:00 时段平均显示旱季大于雨季,高出幅度分别在 14~17.5ml/m³、10.1~23.7ml/m³、16.4~35.7ml/m³ 和 18.1~36.1ml/m³;而 19:00~24:00 时段的晴天及少云天气,旱季 CO₂ 浓度大于雨季,多云天气雨季大于旱季;夜间 1:00~8:00,三类天气这 4 处空间 CO₂ 浓度则为

雨季大于旱季,其多云天气高出幅度达 26.6~58.2ml/m³;这种特征证明了雨季的白昼 9:00~18:00 时段,山地雨林光合作用效应显著高于相应的旱季,尤其是晴天和晴间少云类天气;同时反映出,夜间 1:00~7:00 时段,雨季林内的生理呼吸 CO₂ 排放明显高于相应的旱季,尤其是在晴间多云和晴天类天气。

旱、雨季 3 个典型天气、4 个梯度 9:00~18:00 CO₂ 平均浓度值离差较小,尤其是林内 21m 以上的 3 个空间,各空间的均值离差 ±2~±13ml/m³,浓度振幅较小,反映了雨林光合效率幅度比较稳定;19:00~24:00 时段,旱季晴天和雨季晴间多云天气、4 个空间的时段平均浓度的离差振幅较大;1:00~8:00 时段,雨季的晴间多云天气 4 个空间的 CO₂ 时段平均浓度为最高、离差也较大。由表 1 也反映出,雨季晴间多云天气夜间 1:00~8:00 4 个测定空间 CO₂ 浓度 > 19:00~24:00 雨季晴间多云相应 CO₂ 浓度 > 19:00~24:00 旱季晴天相应浓度含量;反映出夜间林内生理呼吸排放扩散中,风、温度梯度或气压梯度较小。

CO₂ 时段平均浓度梯度也清楚的反映到,不论是旱季、雨季,白昼 3 个典型天气冠上 2.8m 和林地上 4m CO₂ 含量为大,相应冠上 0.8m 和林内 21m 为小,扩散的态势即冠顶指向冠层、林地指向上层明显。夜间 20:00~8:00,旱季的 3 个天气类型 CO₂ 浓度均表现为由上至下的递增,具备至下而上传输的浓度梯度,晴天类天气这种浓度梯度较大;雨季晴间多云天气林内由下向上的浓度梯度较大、晴天较小,而少云天气在夜间 20:00~24:00,CO₂ 浓度还出现由冠上至林地逐渐减小的趋势。昼夜各时段的 CO₂ 浓度梯度大小,充分反映出山地雨林光合、呼吸生理生态效应的时段强弱变化,也构成了 CO₂ 上下传输生物机制。

2.3 能量通量特征

太阳辐射是山地雨林光合生产有机物、参与森林植物本身的各种生命活动和代谢过程以及系统提供能量的能源,森林吸收辐射获得能量,而以潜热和感热散失热量,储藏的能量为生物化学和物质本身的能量储藏。因此,能量通量是观测研究首要项目。图 3 给出了 1999 年雨季典型的晴天天气,总辐射、散射、2 个梯度(林冠顶 29m、林内 22m 即 0.78II)的净辐射实时观测平均通量日变化。

图 3 反映出,总辐射、散射辐射和林冠顶净辐射通量日变化均为单峰曲线,13:00 最高,总辐射通量达 911W/m²,散射辐射、净辐射分别达到 692W/m²、803W/m²,总辐射、散射通量次高峰在 14:00,仅比 13:00 分别小 96W/m²、72W/m²,而林冠顶层净辐射通量的次高峰在 15:00,比高峰值小 102W/m²;通过林内 22m 高净辐射通量可见,进入 22m 以下的净辐射通量 7:00~11:00 占林冠顶层相应的 40%~83%,12:00~18:00 时仅林冠顶的 8.6%~19.9%,且夜间林冠顶层净辐射通量也是上层大于相应下层,负值反映出是向上的长波辐射;由此可见,白昼太阳辐射的绝大部分被上层林冠层所吸收,12:00 以前,冠层的净辐射差额相对总辐射来讲,森林层所吸收率较低,13:00 以后,林冠层顶部净辐射通量占相应总辐射通量比率加大,有利于森林对热能的利用,因此 13:00 以后,林内空间的 CO₂ 浓度含量一般较低,并持续至 18:00,

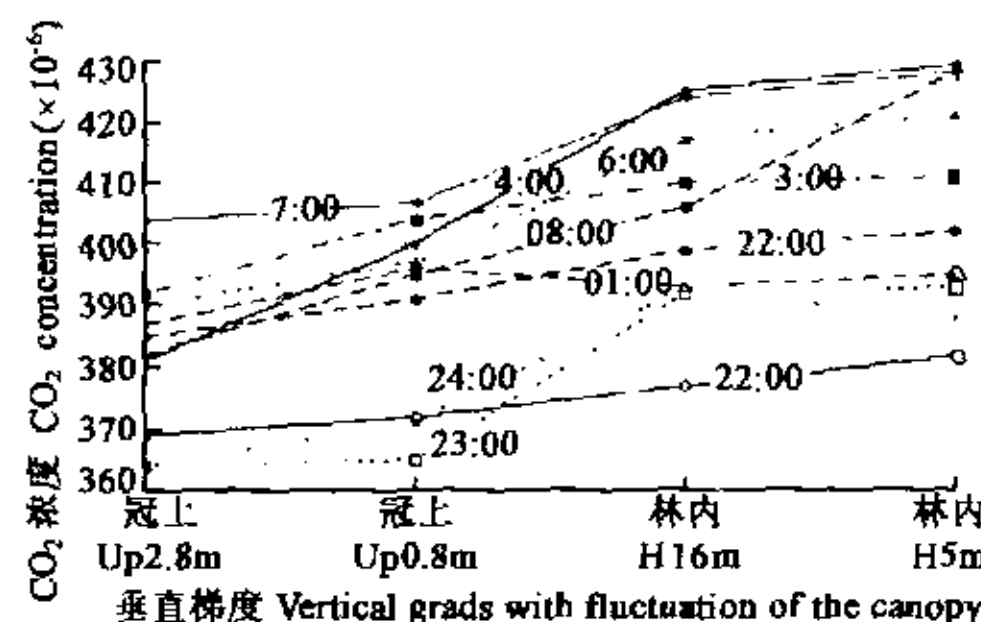


图 2 热带山地雨林二氧化碳浓度垂直梯度廓线 (1999.8.18~19/Fine day)

Fig. 2 Vertical outline of CO₂ content in rainforest (Aug. 18~19 1999)

表 1 热带山地雨林旱、雨季典型天气林分垂直梯度上 CO₂ 浓度时段平均变化 (ml/m³)Table 1 Vertical CO₂ variety of period of time with weather of the dry and rainy season in tropical mountain rainforest of Jianfengling, Hainan (W₁-Fine with a few Cloud, W₂-Fine, W₃-Fine with cloud)

观测时段 Periods	大气 Weather	季节 Season (R&D)	冠上 2.8m Above the canopy by 2.8m	振幅 Ranges	冠上 0.8m Above the canopy by 0.8m	振幅 Ranges	林内高 Inner H16m	振幅 Ranges	林内高 Inner H10m	振幅 Ranges
9:00~ 18:00	晴间 少云 W1	*1雨季 Rainy	350	+5 -3	347	+5 -4	348	±4	352	+20 -10
		旱季 Dry	364	±4	363	±5	364.4	+4.6 -4.4	375	+4.3 -14
		雨季 Rainy	349	+5 -4	346	+10 5	345	+9 -5	356	+53 -12
		旱季 Dry	357.5	+2.1 -1.9	356.1	+1.7 -2.9	380.7	+13.9	392.1	+20.1 -17.7
	晴间多云 W3	雨季 Rainy	350	±1	348	±4	349	±3	356	+53 -11
		旱季 Dry	357.3	+2.7 -2.3	371.7	+3.8 -3.2	367	+2.5 3.5	374.1	+3.7 -3.5
		雨季 Rainy	372	+23 -7	371	+14 -10	368	+15 -11	365	+12 -11
		旱季 Dry	384	+12 -16	390.8	+15.2 -21.8	396	-10 -27	412.8	+13.2 -15.8
	晴天 W2	雨季 Rainy	366	+16 -7	366	+8 -15	372	+17 -20	373	+12 17
		旱季 Dry	380.7	+13.9	392.1	+20.1 -17.7	408.3	+48.5 -39.3	417.3	+45.1 35.5
		雨季 Rainy	385	+33 -28	398	+44 -42	417	+32 -32	416	+34 -37
		旱季 Dry	381.5	+8 -12.5	384.6	+8.2 -10.1	385.3	+15.5 -12.8	393.4	+10.4 -9.4
19:00~ 24:00	晴间 少云 W1	雨季 Rainy	364	+23 -7	396	+10 -6	368	+2 -19	388	+20 -1
		旱季 Dry	368.6	+4.6 -4.4	368.4	+4.9 -5.1	370	-5 -8	396	-8 -15
		雨季 Rainy	388	+16 -6	398	+9 7	405	+13 7	422	+10 1
		旱季 Dry	367.3	+3.9 0.3	375	+10 -14.6	392.6	+11 -14	404.8	+10.6 -15.3
	晴间多云 W3	雨季 Rainy	398	+29 -26	413	+41 -41	441	+39 -57	449	+34 -50
		旱季 Dry	371.4	+5.9 -4.9	374.3	+11.5 8.3	382.8	+18 19.3	397.7	+17.3 -19.2
		雨季 Rainy	364	+23 -7	396	+10 -6	368	+2 -19	388	+20 -1
		旱季 Dry	368.6	+4.6 -4.4	368.4	+4.9 -5.1	370	-5 -8	396	-8 -15
	晴天 W2	雨季 Rainy	388	+16 -6	398	+9 7	405	+13 7	422	+10 1
		旱季 Dry	367.3	+3.9 0.3	375	+10 -14.6	392.6	+11 -14	404.8	+10.6 -15.3
		雨季 Rainy	398	+29 -26	413	+41 -41	441	+39 -57	449	+34 -50
		旱季 Dry	371.4	+5.9 -4.9	374.3	+11.5 8.3	382.8	+18 19.3	397.7	+17.3 -19.2

*1 雨季为 1999-08-16~21 观测数据;旱季为 1999-04-08~10 和 2000-03-26~04.01 观测数据 shows rainy season CO₂ of vertical grade come from Aug. 16~21,1999 and dry season value from April 8~10, 1999 and March 26 to April 1, 2000

2.4 潜热、感热通量特征

热带雨林冠层吸收太阳辐射能量,一方面供给森林空间热量的变化,由此冠层界面发生水热及气体交换总在进行,另一方面,提供森林群落的生理生态作用所需能量。为了了解这一有意义的过程,图 4,给出了

雨季典型的晴天天气,冠层与大气之间能量和热量的通量,同时取此日梯度 CO₂ 检测 6 次重复中较小浓度检测对来进行通量估算,便于研究热量和气体交换的特征。

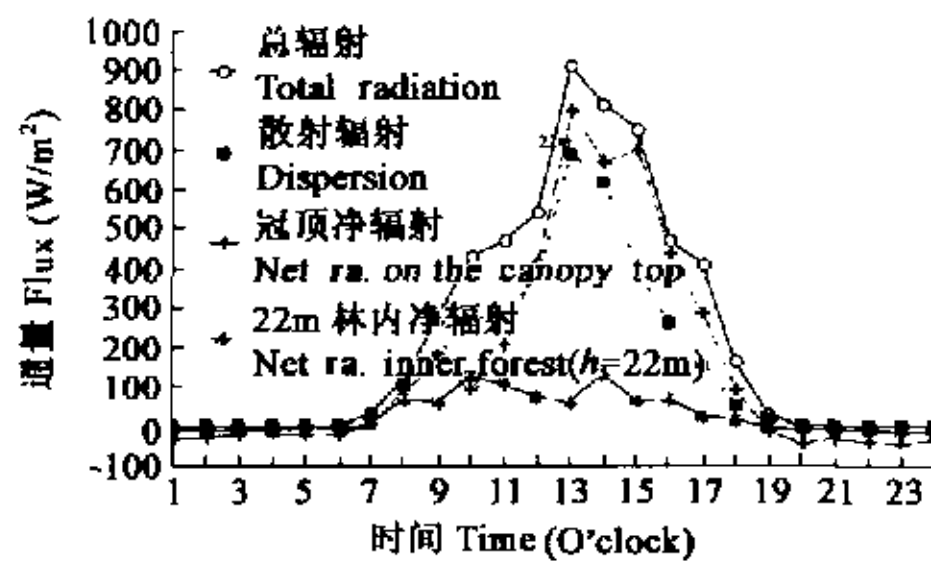


图 3 热带山地雨林(雨季晴天)能量通量日变化

Fig. 3 Daily variety of energy flux in rain forest (Fine day of rainy season)

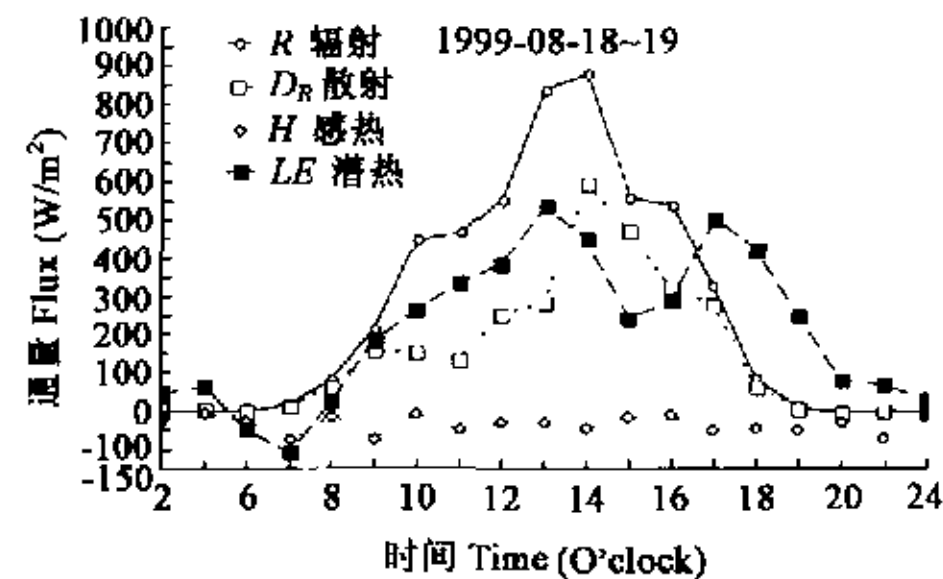


图 4 热带山地雨林(雨季晴天)冠层界面能量、水热通量日变化

Fig. 4 Daily flux variety of energy and caloric in rain forest (Fine day of ra.)

图 4 给出的结果反映出,当总辐射通量达到最高值前的 13:00 潜热通量达到最大值即 537 W/m^2 ,此后在 17:00~18:00 达到次大值,15:00~16:00 为相对这两个时反而较低时域,原因一方面是 14:00 高温后树木叶面气孔关闭,蒸腾减小,另一方面,15:00 后,太阳入射倾斜,林内净辐射增大,致使蒸腾和林地蒸发增大,因此出现了 17:00~18:00 的较高潜热特征;而在凌晨的 5:00~7:00,潜热通量为负值,其原因在于此时段,林内 21m 以下,气温减低到露点温度,形成凝结即雨林的晨雨形成,凝结与蒸发是具有相反的作用机理,故导致为负值。感热的曲线结果,首先负值表示通量是从上到下的规律,其数量无规律性特点,最大值在 9:00,相对 H 变化来看,夜间 17:00~24:00 较高一些,说明白昼温度梯度变化在 7:00、9:00、11:00 较大一些,其余检测时均小一些。

2.5 二氧化碳通量特征

森林冠层与大气界面间 CO₂ 通量,可反映大气和生物活动冠层之间动量、热量交换、控制着植物生长的微气候环境,向植物提供光合作用的 CO₂ 气体等。风、温湿梯度为通量的决定因子,风是气流动力传输所在,因子风、温湿、CO₂ 梯度观测中,严格选用了起动风速在 0.1m/s 的三杯风速仪、干湿球温度表和 CI-301Ps CO₂ 分析仪,使得观测中的漂移极小。图 5 的二氧化碳通量日变化结果反映出:早、雨季的晴与晴间少云天气,8:00~18:00 CO₂ 通量由大气指向林冠层,19:00 是通量方向转化时,20:00~7:00 CO₂ 通量是由林冠指向大气。早、雨季晴间少云天气白昼 CO₂ 通量分别在 $0.09 \times 10^{-6} \sim 0.95 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 和 $0.43 \times 10^{-6} \sim 1.08 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 范围,而晴天类天气则分别在 $0.0 \sim 1.15 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 和 $0.24 \times 10^{-6} \sim 1.49 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 范围;早、雨季夜间 CO₂ 通量分别在 $0.18 \times 10^{-6} \sim 0.72 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 和 $0.03 \times 10^{-6} \sim 0.55 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 范围;按两个天气的 CO₂ 通量平均值来比较,早、雨季白昼由大气向冠层 CO₂ 通量平均分别为 $0.61 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 和 $0.71 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$,夜间由冠层向大气 CO₂ 通量平均分别为 $0.36 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 和 $0.32 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$;那么昼夜间山地雨林冠层与大气之间的净 CO₂ 通量(即昼夜间大气向林冠通量减去林冠向大气的通量)早、雨季分别为 $0.25 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 和 $0.39 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$,且纯属大气流向冠层用于森林净光合的通量;早、雨季净通量比较,雨季大于旱季通量为 $0.14 \times 10^{-6} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。通量值与信乃诤先生《中国农业气象学》列举的森林 CO₂ 通量例证相吻合^[1]。以两个平均值对比看出,热带山地雨林白昼光合型影响效应大于夜间的呼吸型效应影响,何况夜间整个生物圈起着一个大 CO₂ 源区的作用,靠近地表层 CO₂ 浓度最大,即使没有生物覆盖,地面呼吸排放也会是较大的。

3 小结

3.1 尖峰岭热带山地雨林近冠层二氧化碳浓度的梯度观测结果清楚地反映出:白昼 CO_2 浓度梯度特征为 $C_{\text{林内}1\text{m}} > C_{\text{冠上}2.8\text{m}} > C_{\text{冠上}0.8\text{m}} > C_{\text{林内}15\text{m}}$, 即近山地雨林上层、中层优势木的林冠层 CO_2 浓度各时段最小、表明白昼近林冠层为 CO_2 的汇;夜间 CO_2 浓度梯度为 $C_{\text{林内}1\text{m}} > C_{\text{林内}15\text{m}} > C_{\text{冠上}0.8\text{m}} > C_{\text{冠上}2.8\text{m}}$, 近冠层和林地是 CO_2 的一个高浓度区。

3.2 冠上 2.8m、0.8m 和林内 16m、5m 高空;早、雨季的 3 类天气,旱季 9:00~18:00 CO_2 浓度显著高于雨季,幅度分别在 14~17.5、10.1~23.7、16.4~35.7 和 18.1~36.1 ml/m^3 ;旱季的晴天及少云天气,19:00~24:00 CO_2 浓度大于雨季,多云天气雨季大于旱季;1:00~8:00,三类天气这 4 处空间 CO_2 浓度则为雨季大于旱季;山地雨林光合作用效应显著高于相应的旱季,尤其是晴天和晴间少云类天气;旱、雨季 3 个典型天气,4 个梯度 9:00~18:00 CO_2 平均浓度值离差较小,尤其林内 16m 以上的 3 个空间,各空间的均值离差 $\pm 2 \sim \pm 13 \text{ml/m}^3$,浓度振幅较小。

3.3 总辐射、散射辐射和林冠顶净辐射通量日变化均为单峰曲线,13:00 总辐射通量达 911W/m^2 ,散射辐射、净辐射分别达到 692W/m^2 、 803W/m^2 ,白昼太阳辐射的绝大部分被上层林冠层所吸收;雨季晴天冠层顶的潜热通量 13:00 达到最高值 550W/m^2 ,此高峰在 17:00 近 500W/m^2 ,凌晨 5:00~7:00 时段感热和潜热出现负的最大值,即凝结热量的耗损。

3.4 旱、雨季的晴与晴间少云天气,8:00~18:00 CO_2 通量由大气指向林冠层,19:00 是通量方向转化时,20:00~7:00 CO_2 通量是由林冠指向大气。以动力学计算,雨、季白昼由大气向冠层 CO_2 通量平均分别为 $0.61 \times 10^{-6} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.71 \times 10^{-6} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,夜间由冠层向大气 CO_2 通量平均分别为 $0.36 \times 10^{-6} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.32 \times 10^{-6} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,由大气向林冠的净 CO_2 通量显著。

参考文献

- [1] 王庚辰. 我国温室气体研究的主要进展. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 中国环境出版社, 1996, 1~11.
- [2] 杨思河等. 长白山天然林内 CO_2 环境初探. 生态学杂志, 1992, 11(5): 56~58.
- [3] 刘树华, 麻益民. 农田近地面层 CO_2 和潜流通量特征的研究. 气象学报, 1997, 55(2): 188~190.
- [4] 信乃谕主编. 中国农业气象学. 中国农业出版社, 1999, 96.
- [5] 曾庆波, 李意德, 陈步峰, 等著. 热带森林生态系统研究与管理. 中国林业出版社, 1997, 186~190.
- [6] L. 理查德. 森林小气候. (姚启润, 等译). 气象出版社, 1996.
- [7] Wosly S C, Harriss R C and Kaplan W A. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon Basin. *J Geophys Res.* 1988, 93: 1377~1387.

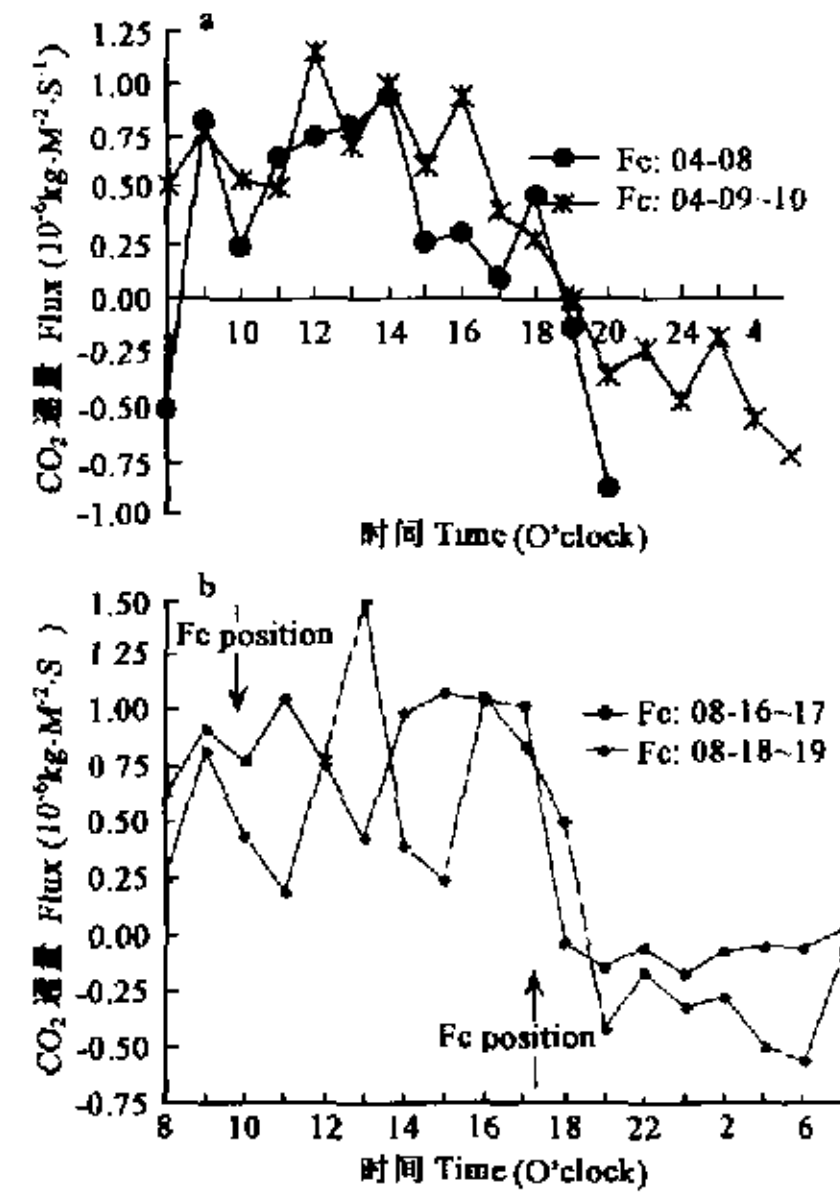


图5 热带山地雨林近冠层旱雨季典型天气 CO_2 通量 (Fine and Fine with a few cloud)

Fig. 5 CO_2 Flux of the typical weather at dry and rainy season in the near canopy of tropical mountain rainforest