

热带山地雨林 CO₂ 浓度环境的时空梯度特征

陈步峰, 李意德, 林明献, 邱坚锐, 骆土寿, 周铁峰

(中国林科院热带林业研究所, 广州 510520)

摘要: 基于 2000 年旱、雨季梯度观测结果叠加分析, 晴及晴间少云天气, 山地雨林垂直 CO₂ 浓度雨季在 333~350ml/m³ 的时间空间特征显著即 8:00~18:00 林内 16m 至冠顶 28m, 较早季浓度分别小 10~21、7~20.2ml/m³, 夜间呼吸影响空间的最高浓度均在近林地上 5m, 出现时段有季节性差别。8:00~18:00 林冠上 CO₂ 浓度梯度、气温梯度表明, 大气至林冠的 CO₂ 通量和冠层指向大气的热通量特征显著, 夜间则梯度值减小、方向相反, 且雨季晴天的 $\Delta C_i/\Delta Z$ 大于旱季, 旱季气温梯度大于雨季; 林内二氧化碳垂直梯度 ($\Delta C_i/\Delta Z < 0$) 昼夜均小于零, 即林地指向上层的 CO₂ 通量特征显著, 且两类天气均表现出雨季的浓度梯度大于相应的旱季。从而, 科学地揭示出在 28m 的山地雨林垂直高度上, 植物光合固定 CO₂ 最多而导致空间浓度最低的季节、天气、时间和空间, 同时证实冠上两个高度实时气温与相应 CO₂ 浓度成 $C_{CO_2} = a10^{bT}$ 。而山地雨林水汽压时空则较为直观地解释了蒸发、扩散和乱流机制影响的效果以及雨林“雨”形成的特征。

关键词: 热带山地雨林; CO₂ 浓度及微气象梯度; 时空特征

Space-time character of CO₂ content in tropical mountain rain forest of Jianfengling, Hainan

CHEN Bu-Feng, LI Yi-De, LIN Ming-Xian, QIU Jian-Rui, LIU Tu-Shou, ZHOU Tie-Feng
(The Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou 510520, Guangdong, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2089~2095.

Abstract: The content of carbon dioxide ranges from 333ml/m³ to 350ml/m³ in rainy season appeared in the time range from 8:00 to 18:00 and height range from 16 m to the canopy top in a tropical mountain rain forest. The CO₂ content range in rainy season was 7~22ml/m³ less than that in the dry season. At night the maximum content of carbon dioxide was 5m above the forestland and appeared different time in both weathers. Diurnal (8:00 ~ 18:00) vertical grade ($\Delta C_i/\Delta Z$) of carbon dioxide above the canopy showed that it there was a marked flux character of carbon dioxide and the flux aspect was from atmosphere to the canopy. Nightly the grade value was decreased and became opposite aspect. Likewise, $\Delta C_i/\Delta Z$ value of the fine in the rainy season was more than that in the dry season and $\Delta T_i/\Delta Z$ in dray season was more than that of the rainy season. Because of daily $\Delta C_H/\Delta Z$ inner forest was negative, so flux was upward from the forestland of tropical mountain rain forest, and $\Delta C_H/\Delta Z$ value of rainy season was more than that of dry season corresponding in the both weathers. It was found that the space-time of optimal photosynthesis and purgative function in the tropical mountain rain forest was by height of 28 m. At the same time, there was a correlation between temperature and CO₂ content above the canopy that model was $C_{CO_2} = a10^{bT}$. The mechanism of water vapor's exchanging and morning rain inner forest was explained by daily space-time character of the water vapor pressure.

Key words: tropical mountain rain forest; CO₂ content and microclimate grads; space-time character

文章编号: 1000-0933(2001)12-2089-07 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) 研究内容, 尖峰岭热带林定位研究 (2001-08)

热带林试验站周 翔, 朱贻彬和尖峰岭热带林保护站的蒋忠亮先生参加了部分野外观测, 一并致谢!

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、热效应研究。

森林的光合、呼吸的生理生态净化和调节大气 CO_2 作用效果,可直接反映在森林生态系统内、外界面空间,诸如森林冠层上下、林内空间的 CO_2 含量及环境的变化,界面通量动力特征和空间气体含量及环境因素的变化特征;近些年来,有关森林近冠层 CO_2 浓度及微气象环境的研究已取得一些进展,我国东北天然林内的已初步研究了林冠层附近的 CO_2 及近地表 CO_2 浓度变化^[1-3],最著名的是 Wofsy and Harriss 研究了能牵动世界气候变化的世界上最大的亚马孙河流域热带雨林植物内 CO_2 浓度廓线和在大气中的循环^[4]等。

我国的热带林属于热带北缘的一种森林类型,主要分布在海南和云南南部,尖峰岭热带山地雨林原始林区是目前保存最为完整、最典型的地带性热带雨林群落,林分平均树高达 28m,生物多样性高、生产力大,在区域的生态环境中发挥着巨大的支撑作用^[5];前期曾研究了碳排放量的生物量法估算^[6-8];云南西双版纳热带次生林窗及冠层的微气象环境近期也陆续看到报道^[9],热带森林的消长对全球气候变化具有密切的相关影响,首次实施海南尖峰岭热带山地雨林 CO_2 浓度及微气象要素的梯度观测,即具有一定的前沿研究探索意义,又包含着难以想象的难度,即使一昼夜的观测结果均包含着真实的雨林垂直 CO_2 含量及微气象因子的梯度变化、时空特征,乃至垂直梯度上的动量和质量交换,加之目前陆地上森林界面的水热及质量交换研究已趋于减弱和萎缩,因此本文报道的研究结果,旨在从较为拓宽的角度了解热带林内微气象因子尤其是 CO_2 梯度含量的时间和空间特征,以至了解热带林光合、呼吸作用强弱的时空特征。

1 研究地概况及研究方法

1.1 研究林区概况

1.1.1 自然概况 测定区位于海南岛的西南($18^{\circ}23' \sim 18^{\circ}52' \text{N}$, $108^{\circ}36' \sim 109^{\circ}05' \text{E}$),海拔高度 800~930m 的热带山地雨林,热带季风气候,年均气温 19.5°C ,海陆的交替影响明显,年均降水量 2600mm,旱、雨季明显,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^[10]。

1.1.2 林分特征 观测区热带山地雨林原始林组成复杂($D > 10\text{cm}$ 乔木 154 种/ hm^2),以大叶白颜(*Gironniera subaequalis* Planch.),中华厚壳桂(*Cryptocarya chinensis* Hemsl.),谷姑茶(*Mallotus hookerianus* Muell. Arg.),盘壳栎(*Cyclobalanopsis patelliformis* Chun)等 20 多个种为优势,平均胸径 24.1cm,上层木平均高度达 28m,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,冠幅高分别在 6~11.5m、10.5~19m、18~22m、22~28m。

1.2 观测研究方法 采用梯度观测法,在热带山地雨林冠上 2.8m、0.8m 和林内 23m、16m、5m 高处设置 CO_2 浓度和温度、湿度、风速观测,选择旱、雨季典型的晴天、晴间少云、晴间多云、多云等天气,连续 7 个 24h 全天候重复观测,数采的间隔 30min 或 1h。

1.2.1 CO_2 浓度测定 采用 CID 公司的 CI-301PS 光合作用测定仪,使用两通道 CO_2 绝对值(ml/m^3)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,测定中漂移极小。测定时除仪器本身自动调零标定外,用 $347\text{ml}/\text{m}^3$ 的标准 CO_2 气体进行跨度标定(Span 标定后,单通道返测标准气 10 次均为 347.6×10^{-1} ,漂移小),每 30min 或 1h 测定 1 次,每次重复 6 次。

1.2.2 微气象观测 光合有效辐射采用澳大利亚 SKP 215 PAR 光量子传感器,适应波长在 400~700nm,光反应时间少于 1ns;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 EY-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,每 30min 或 1h 观测或采集 1 次,温湿每次 6~12 个重复。

2 结果与分析

2.1 热带山地雨林 CO_2 浓度时空及季节特征

依据旱、雨季各类天气 CO_2 含量梯度实时观测叠加,雨季(晴天)平均含量(见图 1),11:00~18:00 林内 16~31m 冠上测定区 CO_2 浓度小于 $350\text{ml}/\text{m}^3$,山地雨林的第一、二个冠层(23~28m 和 16~22m)空间 CO_2 浓度小于 $345\text{ml}/\text{m}^3$ 的时域在 12:30~18:00(最小浓度涡区 $333\text{ml}/\text{m}^3$),反映出雨林的光合效率最高时空,对大气 CO_2 浓度产生的同化效应显著,低浓度涡区反映出由冠上向林冠层、由近林地向上的 CO_2 浓

度梯度特征明显,而且 14:00~15:00 扩展至整个森林垂直高空间,尤其在林内 16m 至冠顶的 12m 林冠空间形成明显的 CO₂ 的汇区;夜间 1:00~8:00 尤其是夜间 4:00~6:00,整个森林垂直空间 CO₂ 浓度由冠层上 (390ml/m³) 向林地递增 (419ml/m³),形成由林地向上递减的 CO₂ 浓度梯度特征,反映出近林地土壤、地被物层 CO₂ 排放对空间的影响效应。

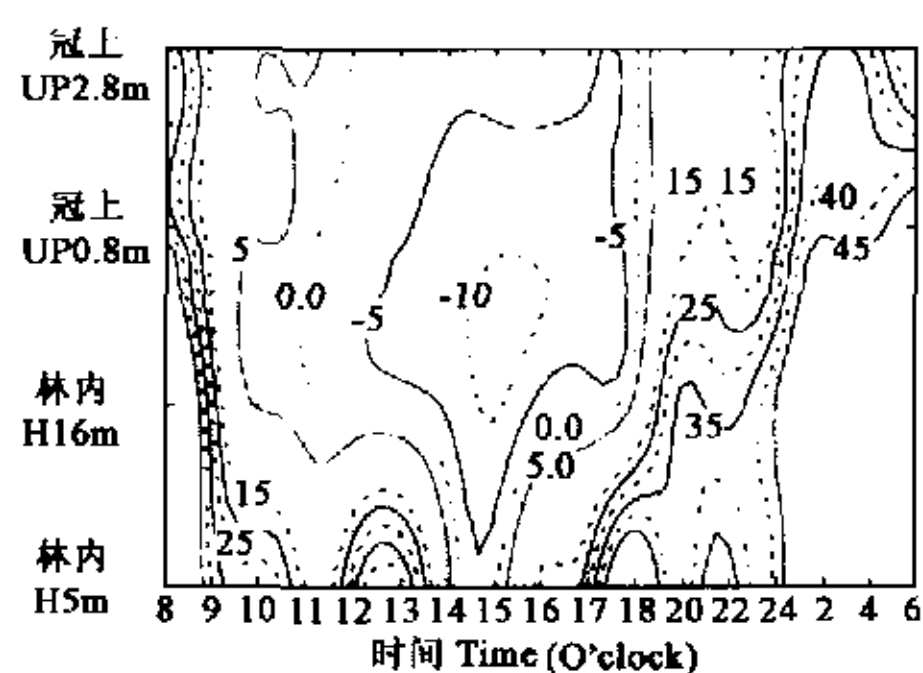


图 1 雨季(晴天)平均 CO₂ 浓度(减去 350ml/m³)时空
Fig. 1 CO₂ space-time at the fine of rainy season (C_a-350ml/m³)

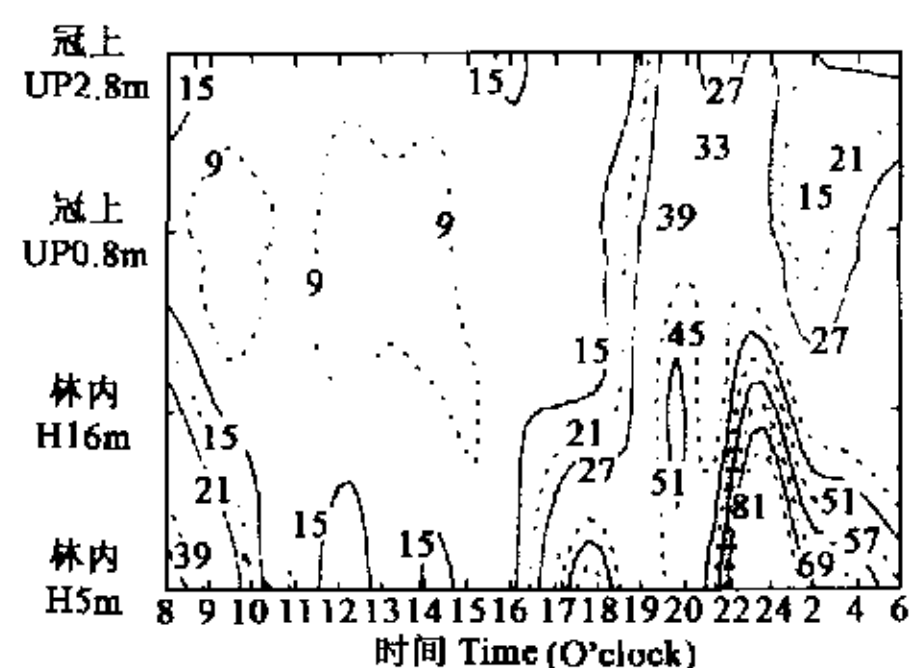


图 2 旱季(晴天)平均 CO₂ 浓度(减去 350ml/m³)的时空
Fig. 2 CO₂ space-time at the fine of dry season (C_a-350ml/m³)

与旱季相应天气的平均含量(见图 2)比较:雨季 16m 以上空间 CO₂ 浓度由 10:00 的小于 10ml/m³ 逐渐递增到 16:00~18:00 小于 21ml/m³, 15:00~17:00 第一冠层竟小于 20ml/m³ 以上,反映出山地雨林光合生理明显的季节差异,雨季森林植物生长旺盛,光合作用相对于旱季强,尽管旱季热带森林植物仍在生长,但相对雨季较弱一些,光合作用的强弱可映射在空间 CO₂ 含量;夜间 2:00~6:00 林内 16m 以上空间,雨季 CO₂ 浓度高出旱季 20~27ml/m³,相反旱季则 19:00~24:00 林内 16m 以上空间高出雨季 12~16ml/m³,而且林内近地面在此时段 CO₂ 浓度分别达到最高;表现出雨林生态系统呼吸排放高峰的旱雨季时域差异。

雨季晴天少云(见图 3)与相应的晴天 CO₂ 浓度时空比较,小于 350×10⁻⁶的时间空间相同,前者仅浓度高出 4×10⁻⁶,光合效应较后者弱;夜间 20:00~22:00 近林地 5m 高空间出现日最大 CO₂ 浓度,22:00~02:00 冠上 0.8m 出现 CO₂≤350ml/m³ 区域,与后者相差较大,近林地空间 CO₂ 呼吸排放效应较后者为弱。与旱季同类天气测定结果比较,冠上 2 个观测层、林内 16m 空间白昼 8:00~18:00 的 CO₂ 浓度平均值,雨季分别小于相应旱季 14.5ml/m³ (+5.7, -7.8)、15.7 (+4.8-8.6)ml/m³,光合作用效应也是显著高于旱季,旱季整个林分空间在 22:00~24:00 有最高的 CO₂ 浓度。

2.2 山地雨林 CO₂ 浓度垂直梯度特征

山地雨林垂直高度的气体湍流运动不仅在于动力风、而且空间密度不均也导致气体的迁移,因此分析雨林 CO₂ 浓度垂直梯度,便可清楚地判断 CO₂ 气体的垂直扩散机制和趋势,进一步证实白昼山地雨林冠层不断的光合固定 CO₂,形成由大气至近冠层、林地向上 CO₂ 连续流动、扩散通量机制,也就是在近第一、二冠层空间成为 CO₂ 气体的汇;同时也可反映出山地雨林

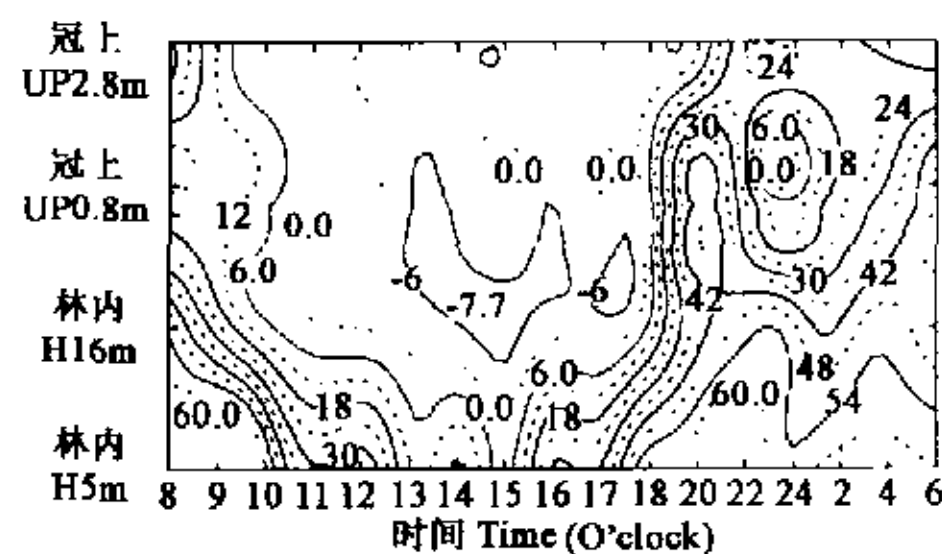


图 3 雨季晴天少云类天气日平均 CO₂ 浓度时空 (ml/m³)
Fig. 3 CO₂ space-time at the fine with a few cloud of rainy season

生态系统呼吸排放影响强弱的时序。

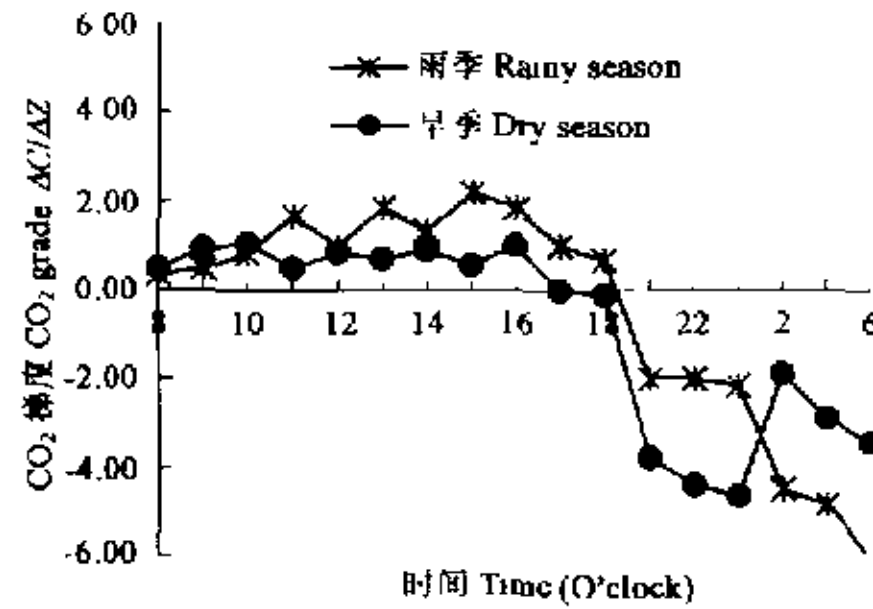


图4 冠上0.8~2.8m的CO₂浓度梯度变化

Fig. 4 CO₂ content grade above the canopy from 0.8 m to 2.8 m

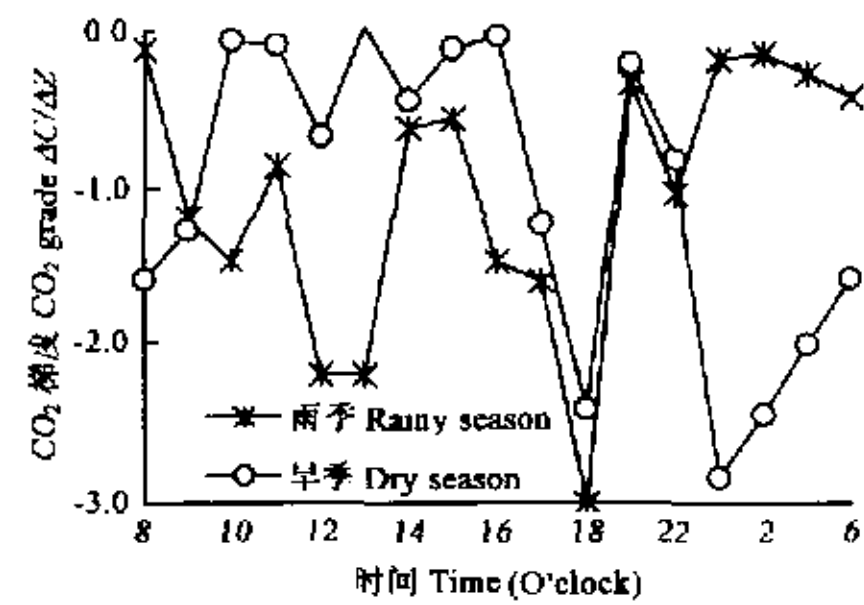


图5 林内高5~16m CO₂浓度梯度变化

Fig. 2 CO₂ grade inner forest height from 5 m to 16 m

图4、5给出了晴天类型天气山地雨林林冠上、林内各两层间的CO₂浓度梯度时序变化,对于林冠上0.8m至2.8m CO₂浓度梯度 $\Delta C/\Delta Z$,早、雨季在白昼8:00~18:00的 $\Delta C/\Delta Z > 0$,即由冠上大气至冠层的二氧化碳通量特征,且在11:00~18:00雨季的 $\Delta C/\Delta Z$ 大于相应的早季的 $\Delta C/\Delta Z$;夜间的 $\Delta C/\Delta Z < 0$ 即CO₂由冠上0.8m流向2.8m,且19:00~24:00早季的 $\Delta C/\Delta Z$ 大于相应的雨季,2:00~6:00则为雨季的 $\Delta C/\Delta Z$ 大于相应的早季梯度,密度梯度 $\Delta C/\Delta Z$ 的大小,不仅为决定气体质量交换的大小和流向重要因素之一,而且是辨别影响空间含量大小的森林植物的光合、呼吸作用强弱的时间、季节差别的重要依据之一。林内垂直高度5m至16m,早、雨季二氧化碳垂直梯度($\Delta C/\Delta Z$)昼夜均小于零(见图5),证实了无论白昼、夜间均有从林内近地面垂直向上的二氧化碳通量,季节的浓度梯度差异明显,9:00~22:00雨季二氧化碳梯度的绝对值显著大于早季,23:00~6:00则早季显著大于雨季,一方面反映了茂密高大热带山地雨林原始林,雨季上层林冠层易接受较大光合有效辐射,光合作用效应较旱季为显著,另则旱季的夜间林地呼吸排放影响较雨季显著。

图6给出的是晴天少云天气不同季节山地雨林的林冠上及林内CO₂浓度的垂直梯度日平均变化,结果显示:冠上二氧化碳8:00~18:00的垂直梯度($\Delta C/\Delta Z$)在早、雨季均为正值,表明CO₂气体由冠上流向冠层的通量特征,且在早、雨季,CO₂浓度梯度大小交替出现,仅雨季的13:00和11:00明显高出相应旱季;夜间 $\Delta C/\Delta Z$ 且以旱季在22:00~4:00的浓度梯度绝对值高出相应雨季较为明显特点;林内两个高度CO₂浓度的垂直梯度($\Delta C/\Delta Z$)日变化均为负值,表明了CO₂气体白昼此时段由林内近地面垂直向上迁移的通量特征,雨季的 $\Delta C/\Delta Z$ 绝对值在10:00~14:00大于相应旱季明显,即说明此时段雨季林内较高的林冠层光合固定CO₂效应较相应旱季强。同时雨季夜间的 $\Delta C/\Delta Z$ 也略高于相应旱季。

以上的观测研究及分析结果,揭示出了热带山地雨林原始林不同季节、不同天气的CO₂浓度垂直梯度时空特征,映射出近30m高的森林垂直梯度上,植物光合固定CO₂最大而导致空间浓度最低的季节、天气、时间和空间,也增补了热带山地雨林生态系统生态环境光合呼吸时空动态效应的科学依据。

2.3 山地雨林气温垂直梯度及与梯度CO₂浓度的关系

冠层界面作为热能辐射的第一接触面,界面层上下存在着热量的传导和气温的垂直梯度,而且热传导通量与温度梯度成正比,气象学上认为,当 $\Delta T/\Delta Z \neq 0$,即存在垂直温差,造成垂直方向的热输送。因此,从热带山地雨林冠层上0.8~2.8m的温度梯度观测结果,来分析冠上热量传递的规律和特征,对于近28m的热带雨林林内的气候要素的时空变化也是极具意义的。图7给出了山地雨林冠上0.8~2.8m(晴天天气)气温的垂直梯度季节性日变化。

图7结果反映出,无论旱季还是雨季,在白天冠层界面受热时,气温随高度增加而降低, $\Delta T/\Delta Z$ 为负

值,显示出热量传递指向 Z 坐标的正方向,由冠层向大气传递;夜间,冠层表面冷却,近冠层的温度低于邻近大气层的温度,热传递方向是从大气指向林冠层的。同时图 7 的结果也反映出冠上气温梯度 $\Delta T/\Delta Z$ 大小的季节差别,8:00~16:00,旱季的 $\Delta T/\Delta Z$ 明显大于相应的雨季,因为热通量与 $\Delta T/\Delta Z$ 成正比,故旱季的晴天天气,山地雨林冠上指向大气的热通量大于相应的雨季;20:00~23:00 两个季节的 $\Delta T/\Delta Z$ 较小,方向纷乱;0:00~2:00 时段——雨季的 $\Delta T/\Delta Z$ 大于相应的旱季,而 2:30~6:30 旱季的 $\Delta T/\Delta Z$ 大于相应的雨季即由大气向冠层的热通量大于相应的雨季,其中雨季的 3:00~6:30 时段的 $\Delta T/\Delta Z = 0$ 即无垂直温差和热量输送。

依据山地雨林垂直高度上昼夜气温与相应 CO₂ 浓度,经多重方法反复拟合研究发现:在雨季晴天,林冠层上 2 个高度、林内 16m 高度,气温与相应 CO₂ 浓度存在有极其显著的相关关系,而旱季则不显著。从植物光合作用温度环境理解可见,热带常绿树木或植物的光合作用最适温度在 25~30℃,业已观测的日最高气温为 30℃,故雨季近林冠层空间气温愈高、光合作用愈强,光合作用愈强、森林固定空间的 CO₂ 气体愈多,则相应空间的 CO₂ 浓度就愈低即成连锁反应结果;图 8 给出了山地雨林冠上 0.8m、2.8m 在雨季晴天昼夜间气温与相应 CO₂ 浓度相关关系,模式简单清楚且准确地反映出,当任意时的气温倒数愈小时,则相应空间的 CO₂ 浓度也是较小的,即当 $10^{-17} < 1.096$ 时,近冠层(0.8m) CO₂ 浓度在 $330 \times 10^{-6} \sim 350 \times 10^{-6}$ 间、距冠层略远点的(2.8m) CO₂ 浓度在 $340 \times 10^{-6} \sim 353 \times 10^{-6}$ 间,模式估计的置信度在 99%,可见,模式极适宜作冠上 CO₂ 浓度的估算。

2.4 山地雨林梯度空气湿度及晨雨机制

山地雨林垂直空间水汽分布取决于空间的乱流、对流和分子扩散,蒸发和扩散均与温度相关,水汽压即为空气中水汽的压力,在热带山地雨林垂直高度上,具有明显的 4 个林冠层,雨季是乱流、蒸发和扩散相对较强的季节,蒸发的水汽多停留在近冠层空气中;图 9 是雨季晴天昼夜雨林垂直水汽压测定结果,时空特征为 15:00~16:00 时段林内 16m 高度的最高值和冠上 0.8m 高度的次高值,即 10:00~13:00 间,林内 20m 高度以上,温度高、蒸腾速率和乱流交换强度增大,水汽向上输送的作用大于蒸腾蒸发增强的作用,冠层界面的水汽对流和扩散结果,使冠层空间出现较低的水汽压区;而当林冠层植物蒸腾蒸发作用大于水汽输送作用时,则近冠层不断形成水汽积累的湿空气、水汽压增大即如图 9 中的 14:00~16:00 近最上冠层和第三冠层,此后蒸腾蒸发作用减弱,水汽压逐渐降低。

雨林的“雨”一直是人们关注的独特之处,适逢旱、雨季节昼夜住于原始林综合塔观测,每逢晴间少量云天气或是大晴天后的多云天气,4:00~6:00 或 23:00~24:00 林内出现的一定时间降雨,图 10 仅给出一个例证,实质上此时段林内相应空间的气温已经等于露点温度、具备了水汽凝结的条件,加上雨林的树叶常年形成滴水叶尖结构、不断凝结的水滴聚集一定的质量,便滴下形成雨,凝结过程消耗热量使温度下降、湿度增至 100%,凝结也使空间的水汽压速快降低,因此水汽压反映最为直观,比如图 9、图 10 中的水汽压

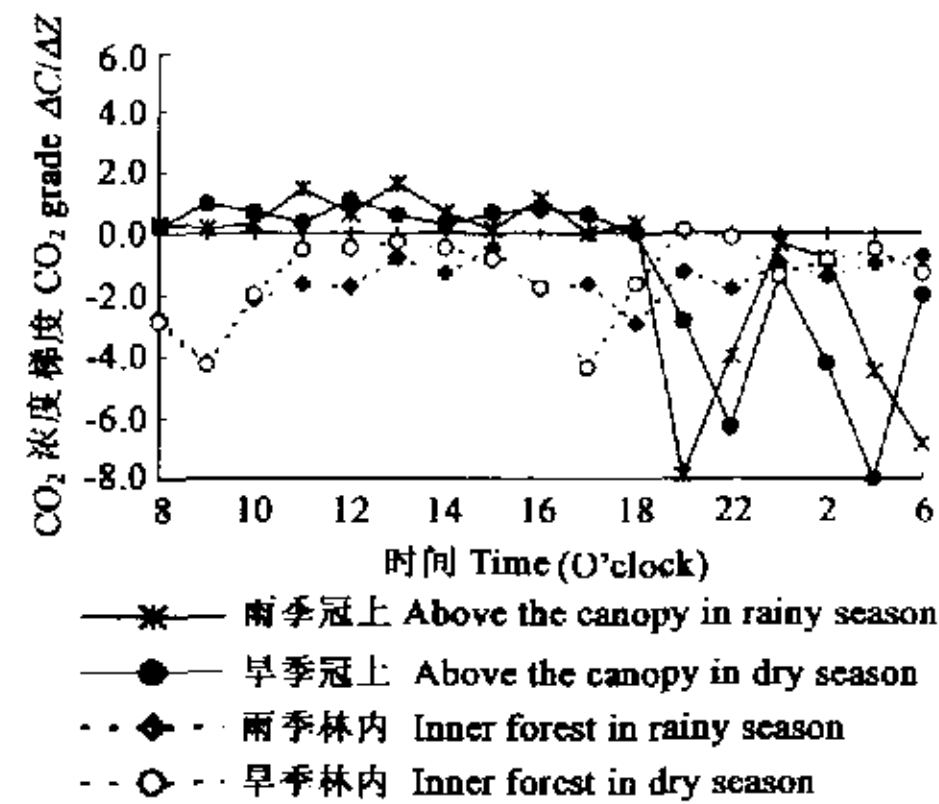


图 6 山地雨林(在晴间少云天气)林冠上 0.8m 至 2.8m、林内 5m 至 16m CO₂ 垂直梯度日变化

Fig. 6 Daily CO₂ grade between above the canopy from 0.8 m to 2.8 m and inner forest from 5 m to 16 m at the fine with a few cloud in TMRF

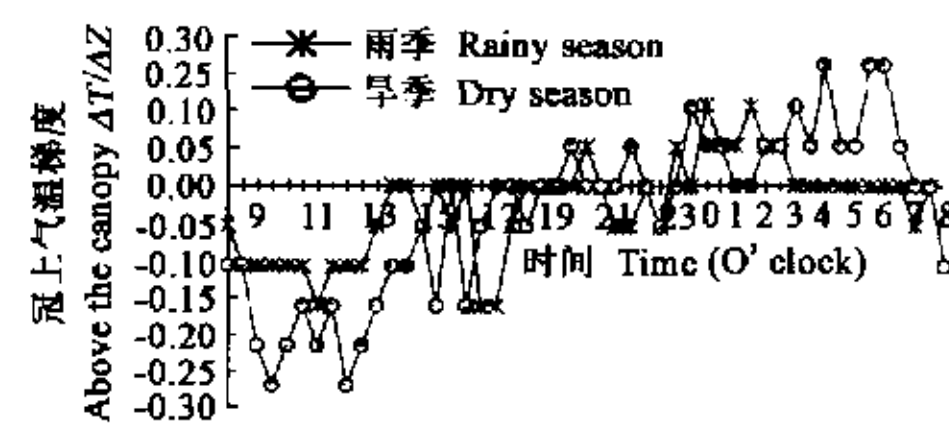


图 7 山地雨林冠上 0.8~2.8m(晴天)气温的垂直梯度日变化

Fig. 7 Daily variety of temperature grade above the canopy from 0.8m to 2.8m at the fine in TMRF

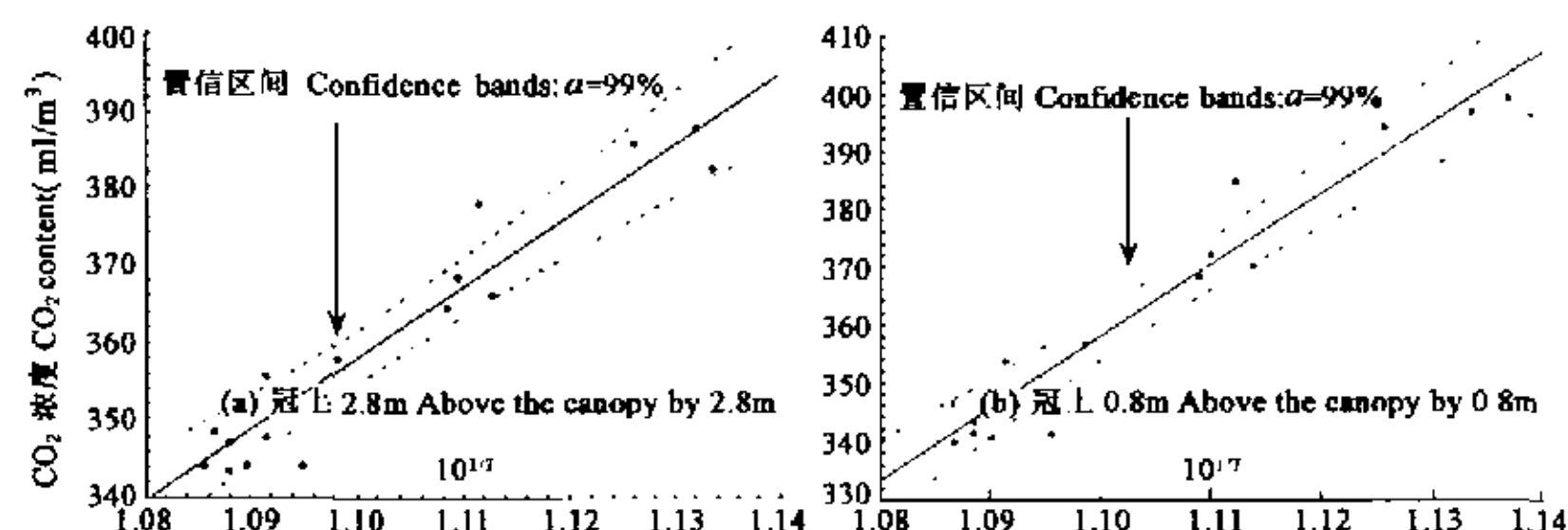


图 8 山地雨林冠上 2 空间(雨季晴天)气温与相应 CO_2 浓度的相关关系

Fig. 8 Correlativity between temperature (T) and CO_2 content above the canopy at the fine in rainy season of TMRF

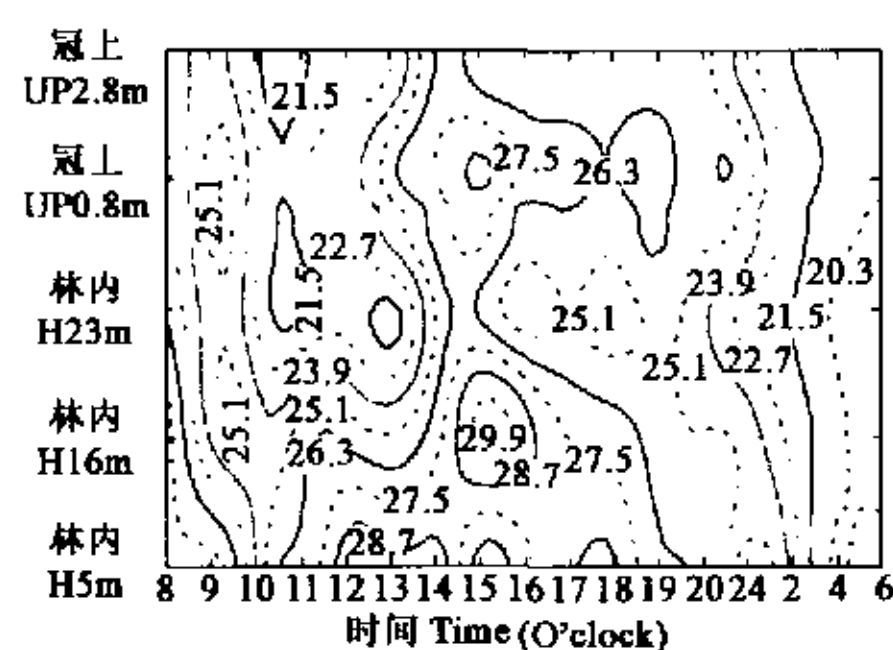


图 9 雨季晴大日水汽压的时空特征(mb)

Fig. 9 Daily space-time of the water vapor press at the fine in rainy season

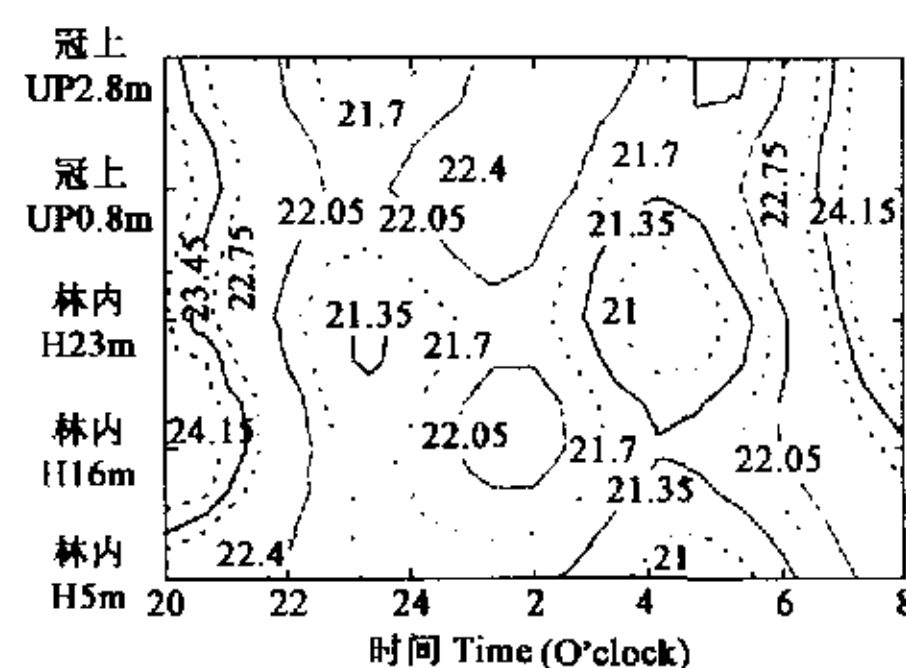


图 10 雨季晴间少云天气夜间水汽压时空(mb)

Fig. 10 Nightly space-time of the water vapor press at the clouds in rainy season

小于 21mb 涡区。

3 小结

3.1 尖峰岭山地雨林 CO_2 含量时空观测结果叠加反映出:雨季晴及晴间少云天气,白天浓度在 $333 \sim 350 \text{ ml/m}^3$ 的时空相同(值差 4 ml/m^3),较相应的旱季同类天气,浓度分别小的范围 $10 \sim 21 \text{ ml/m}^3$ 、 $7 \sim 20.2 \text{ ml/m}^3$,雨季山地雨林具有相对旱季具较大的光合固定 CO_2 效应、显著的时间空间确定(8:00~18:00 林内 16m 至冠顶);夜间呼吸影响空间最大浓度均为林地上 5m,时段差别大,雨季晴天在 00:00~6:00、旱季晴天在 23:00~00:00、晴间少云天气则在 20:00~22:00,揭示了土壤和地被层呼吸排放的季节和天气差别。

3.2 山地雨林冠上 2 个高度,林内 2 层 CO_2 浓度垂直梯度结果分析证实:对于林冠上两个高度,旱、雨季无论是晴天还是晴间少云天气,白天 8:00~18:00 的实时 $\Delta C_t / \Delta Z > 0$,即林冠上有从大气至林冠层的 CO_2 通量特征,且雨季晴天的 $\Delta C_t / \Delta Z >$ 相应旱季晴天的,表明雨季晴天的 CO_2 通量相对较大;夜间 $\Delta C_t / \Delta Z < 0$,则有相反方向的 CO_2 通量特征,晴与少云天气旱雨季的 $\Delta C_t / \Delta Z$ 大小交叉出现。对于林内两个垂直高度,无论旱雨季的晴或少云天气,二氧化碳垂直梯度($\Delta C_t / \Delta Z < 0$)昼夜均小于零,即证实由林地指向上层的 CO_2 通量,且两类天气均表现出雨季的浓度梯度大于相应的旱季。从而,科学地揭示出高 28m 的山地雨林垂直梯度上,植物光合固定 CO_2 最大而导致空间浓度最低的季节、天气、时间和空间。

3.3 山地雨林雨季晴天天气林冠上的垂直气温梯度研究表明,林冠上白天的热通量是向上传递、夜间则相反;旱季白天 8:00~16:00 垂直气温梯度大于雨季相应值即向上大气层的热通量较雨季的为大,旱季夜间 2:00~6:30 由大气指向林冠层的热通量大于相应的雨季;雨季冠上两个高度实时气温与相应 CO₂ 浓度存在着极其显著的数量相关即 $C_{CO_2} = a10^{bT}$,且两者极其相关的检验置信度大 99%。因此,相关模式极适用。

3.4 山地雨林水汽压时空特征,较为直观的解释了山地雨林植物在生长活跃季节雨季蒸腾蒸发、分子扩散和乱流机制影响的效果,同时科学从时空上显示出雨林“雨”形成的水汽压特征。

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 CO₂ 环境初探. 生态学杂志. 1992, 11(5): 56~58.
- [3] L. 理查德. 森林小气候(姚启润等译). 气象出版社. 1996.
- [4] Wofsy 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.
- [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] 李意德, 吴仲民, 曾庆波等. 尖峰岭热带山地雨林群落生产和二氧化碳净同化增量的初步研究. 植物生态学报. 1998, 22(2): 127~134.
- [7] 张一平, 刘玉洪, 马有鑫等. 西双版纳干季晴天次生林林窗气温时空分布特征. 生态学报. 2001, 21(2): 205~210.
- [8] 陈步峰, 曾庆波, 黄全等. 热带山地雨林生态系统的水分生态效应——冠层淋溶、水化学贮滤. 生态学报. 1998, 18(4): 352~360.