

热带森林碳通量研究综述*

赵双菊^{1,2}, 张一平¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:综述了热带森林碳通量的研究结果, 指出随着电子测量和存储技术的发展, 微气象涡度相关法已应用于森林碳通量的测量和研究; 热带森林是碳源还是碳汇仍是一个存在争议的问题, 热带森林的利用方式以及森林火灾在很大程度上决定了热带森林是碳源还是碳汇。夜间通量测量的不准确性, 水平平流以及垂直平流都会在一定程度上影响碳通量测量的准确性, 因此只有尽量减小测量误差, 提高数据分析及处理技术, 才能更准确地了解热带森林的作用。

关键词:碳通量; 碳源; 碳汇; 热带森林; 综述

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1000- 2006(2005) 04- 0096- 05

Review on Tropical Carbon Flux Research

ZHAO Shuang-ju^{1,2}, ZHANG Yi-ping¹

(1. Xishuangbanna Tropical Botanic Garden CAS, Kunming 650223, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The carbon budget of terrestrial ecosystem plays an important role in the global change, especially the forests as the principal part. Tropical forests have a lot of species and large biomass. It's one of important factors that control the global carbon balance. Tropical rain forests cover 12% of the plant's land surface, and they contain 40% of carbon in terrestrial biosphere. They become one of main factors to control the global carbon balance. So, small change of this ecosystem may bring significant changes of the global carbon cycle. Recent years, some ecologists used eddy covariance to study carbon flux in tropical forests. Now, it's a disputed question whether the tropical forest is a carbon source or a carbon sink. To a great degree, using fashion of tropical forest and forest fire are important factors that can decide the role of tropical forest. Many factors influence the accuracy of flux measurement, such as inaccurate flux measurement in the nighttime, horizontal and vertical flow. If we can decrease the measurement error in the most and improve our data analysis technology, we'll know the role of tropical forest more accurate. It is a fact that the flux towers are very limited, for the whole tropical forests we can find out their important role through the calculated model. This paper presented some results of tropical forest researches. It's good both for CO₂ flux measurement and tropical forest research in our country.

Key words: Carbon flux; Carbon source; Carbon sink; Tropical forest; Review

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, 而森林作为陆地生态系统的主体, 无论从面积、生物量还是碳储量上, 森林都是地球生物圈的重要组成部分, 是陆地生态系统的主体, 在整个陆地生态系统的结构和功能中居于重要的地位。森林绿色植物通过光合作用吸收大气中的 CO₂, 森林是重要的碳汇; 另一方面, 森林中的动物、植物和微生物的呼吸及枯枝落叶的分解氧化等过程以 CO₂、CO 等形式向大气排放碳, 森林又是碳的释放源。热带森林物种丰富多样, 群落结构复杂, 并且有巨大的生物量, 成为支配全球碳平衡的主要因素, 是许多生态环境领域科学研究的焦点区

* 收稿日期: 2004- 05- 17 修回日期: 2004- 11- 24

基金项目: 国家重大基础研究“973”项目(2002CB412501); 中国科学院知识创新重大项目(KZCX-SW-01-01A4)

作者简介: 赵双菊(1979-), 女, 硕士生。

* 通讯作者(Corresponding Author): 张一平, 研究员, 博士。

域。热带雨林的面积为 1.0×10^4 万 hm^2 , 约占陆地面积的 7%^[1], 涵盖了地球表面植被面积的 12%^[2]。未受干扰的热带森林通过其物理特性和生理活动对全球的 CO_2 和水循环有重要的潜在影响, 热带森林以陆地生物量的形式拥有约 40% 的碳储量^[3], 占陆地初级生产力的 30%~50%。热带森林对生物圈 CO_2 的吸收起着重要的作用。近年来, 热带森林对大气中 CO_2 和水汽浓度的影响已经成为一个非常值得思索的问题。目前全球 CO_2 浓度变化已引起世界的关注, 如何正确认识热带森林生态系统的碳通量特征和变化规律, 已成为全面认识各种生态系统在全球碳平衡中作用的关键问题之一, 但就目前的研究现状看, 有关热带森林气体交换方面的研究远比对温带森林和北方森林的研究要少。

1 影响热带森林碳通量的主要因素

1.1 土地利用变化

土地利用变化和气候变化直接影响着热带森林的碳通量。不同的土地利用方式对植被和土壤有着不同的影响。研究表明, 当森林转化成其他利用方式时就会向大气中释放 CO_2 ^[4]; 土地利用变化的时间也是不固定的, 热带地区伴随着森林清除所进行的燃烧会使部分被砍伐植被迅速转化成为 CO_2 ; 而当一片森林被清除后, 几年之内残留植被的腐烂和土壤中有有机成分的减少也会使大气中的 CO_2 增加; 植被中所含有的碳一般不会进入到大气中, 但可以被木材、灰烬和木炭所滞留(sequestered)。多数被清除的热带森林都开发成了轮歇耕地, 这些森林一般是耕种 1~3 a, 之后再度弃 8~20 a。在这个循环的休耕期, 树木移植并且生长成为次生林, 这种森林植被的恢复可以吸收一部分由于清除而释放的 CO_2 , 因此, 区分热带森林是暂时性清除还是永久性清除对研究碳通量十分重要, 原因是前者所带来的 CO_2 释放量远小于后者。

1.2 森林毁坏

热带森林毁坏是碳循环的重要组成部分, 森林砍伐会增加大气中的 CO_2 , 而且会影响到区域气候^[5]。由于森林中的 CO_2 浓度高于农业耕地, 因此由森林转变为农田或者牧地会造成向大气中的 CO_2 净通量的增加。Skole 的研究表明, 在过去的 20 年中, 约 50% 的原始热带森林被毁坏, 这主要是农业扩张的结果^[5]; 据估算, 全球热带森林毁坏由 1980 年的 69 000 km^2/a 上升到了 80 年代末的 165 000 km^2/a 。而位于亚马逊的世界最大的连续性热带森林, 其森林毁坏占世界热带森林毁坏面积的 50%~70%^[6], 热带森林的毁坏造成了大量碳的释放。IPCC 估计全球热带森林由于人为毁坏所造成的碳损失量为 1.6 Gt/a , 在近 10~20 年内这个数值已经被认可^[7,8]。全球热带森林由于人为毁坏所造成的碳损失量, 20 世纪 80 年代为 0.6 Gt/a , 90 年代为 0.9 Gt/a ^[9,10]; 由于应用了不同的森林面积、森林采伐率和碳密度等指标, 不同研究者对每年因森林砍伐所造成的碳损失量的估计存在一定的差别(表 1)。

Table 1 The estimation of carbon losing in result of deforestation of tropical forest Gt/a				
地域	I (1980~1990)	II (1980's)	III (1981~1990)	IV (1980~1995)
美洲	0.55±0.3	0.37	0.94	0.94
非洲	0.29±0.2	0.10	0.42	0.36
亚洲	1.08±0.5	0.18	0.66	1.08
总和	1.90±0.6	0.65	2.00	2.40

注: I, II, III, IV 数据分别来自文献[9, 18, 29]。

2 热带森林碳源/汇的争议

世界森林碳源/汇效应一直是具有争论性的问题。许多科学家都认为热带森林可能是很重要的碳汇^[2,11-13]; 有研究表明, 虽然热带森林受退化和破坏的影响, 其面积在不断减少^[1,5], 但仍占陆地生物量的 40%^[1], 使得热带森林仍然是一个实质性的碳库; 由于人为释放 CO_2 、氮和其他物质沉降率的增加, 热带森林的碳汇功能在提高, 其储碳的能力还有可能不断增长^[14]。Tian 等认为巴西热带森林生态系统有时也会成为大气的一个碳汇^[13]; 对亚马逊热带雨林 CO_2 通量的直接观测表明, 该地区在短期内至少是 CO_2 汇^[11], 而且可能整年均是碳汇^[2,12]。

但并非所有的研究者都认同陆地生态系统的碳汇功能^[15,16]。有研究表明热带地区为净碳源^[17]; Houghton 等也阐述了 1989~1998 年间亚马逊流域由于森林退化和耕地的废弃所造成的碳源大约为 $0.2 \times 10^9 \text{ t/a}$ ^[18]。在干旱年由于火灾会使碳源的大小增加两倍; 另外, 土地利用的变化和火灾会使该地区自然生态系统每年的碳源发生偏移^[13,19]。Houghton 等估算了热带地区由于森林被砍伐和森林火灾向大气中排放的 CO_2 量, 认为热带森林是大气中 CO_2 的一个重要源^[20]。

另外一些研究则显示, 热带碳源/汇是不确定的^[21,22]。用微气象法研究的结果表明, 在亚马逊成熟热带森林存在一个净碳汇, 但是由于观测空间和时间的限制还没有确凿的证据; 而应用大气传输模型来测量全球的 CO_2 、 O_2 及其同位素^[15], 得到了与之相反的结论。Oliver 应用永久样地法估算碳的潜在储量, 结果表明, 成熟的热带森林约有 40% 可以称为碳汇^[23]。

3 热带森林中微气象法通量研究的现状

近年来巴西热带森林生态系统的碳循环研究受到了重视。以前在亚马逊河流域主要进行辐射平衡、水汽和热通量等方面的研究^[24,25], 着重探讨能量和林冠范围气孔导度等因子。随着涡度相关技术的不断发展, 进行长期通量观测已

经成为可能, Shuttleworth 等对水汽通量^[24,25]、CO₂通量进行了观测^[11], 为量化森林作为全球的碳源还是碳汇提供了有效的途径^[3]。20 世纪 80 年代末, 科学家们开始应用涡度相关方法对热带森林的碳通量进行观测并深入研究。Fan 等人最先在巴西 Manaus 附近 Ducke 保护区中的热带雨林应用涡度相关法进行了观测, 结果表明, 在 9~13 h 中 CO₂ 平均摄入量的最大值约为 18 μmol/(m²·s), 夜间的呼吸为 5.94 μmol/(m²·s); 林冠上日出前最大的 CO₂ 浓度仅有 370 μL/L, 显示出此观测点的稳定层较弱, 即夜间层结不稳定; 下午出现的最小的浓度为 340 μL/L, 比海拔 3 000 m 大气 CO₂ 的浓度低 7~8 μL/L^[11]。

Grace 在雨季和旱季对亚马逊盆地中部一块最大的热带雨林进行了通量观测^[12]。结果显示: 一天中 CO₂ 浓度变化的幅度通常比较大, 尤其是在清晨, 林冠顶的 CO₂ 浓度可达 450~500 μL/L, 呈现“清晨 CO₂ 通量突增现象(flushing)”；而在下午降至 350 μL/L 左右。近地层 CO₂ 浓度的脉动比较明显: 有风时其浓度在 400 μL/L 以下, 而弱风天气时 CO₂ 维持较高数值; 早晨风速增加时 CO₂ 在冠层中的储量变化比较大。分析认为造成这种状况的部分原因为日出后的光合作用, 又由于日出后湍流的传递的增强, 引起了“清晨 CO₂ 通量突增现象”。Grace 还指出, CO₂ 浓度在林冠内有较大的变化幅度, 近地层的 CO₂ 浓度平均值非常高, 证实了森林地面的 CO₂ 浓度是大气中“双倍”趋势的说法, 并成为雨林的一个特征^[27,28]。Wofsy 等在 Manaus 站及 Brasilia 在 Cerrado 站(海拔较高, 并且有许多林窗结构)的观测没有发现类似现象^[30]。笔者认为这是由于土壤中的 CO₂ 通量较高^[29]、植被浓密和较高的湍流传递高度以及夜间的小气候状态稳定的结果。

Grace 根据巴西 Rondônia 热带雨林的观测, 估算出热带森林生态系统的碳平衡以及除去气候状态中一些年际间微小变化后的碳平衡变化; 指出估算误差很可能来自测量通量过程中稳定的气象状态, 这种情况尤其在夜间发生的频率更高^[26]。他还估算了 1992 年 3 月热带森林的 GPP(203.3 mol/(cm²·a)), 生态系统的呼吸为 194.8 mol/(cm²·a), 生态系统碳平衡 8.5 mol/(cm²·a), 相当于失汇 1.0 t/(Ch²·a); Grace 的研究还表明, 夜间释放的 CO₂ 在较浅、较稳定的边界层(大概 100 m)被阻截, 因此近地层的浓度上升到很高(大于 500 μL/L)。白天, 太阳对几千米的气层进行加热, 通过强大的热对流充分混合, 地面附近的 CO₂ 通过自由对流进入到空气中。因此, CO₂ 浓度下降到了和大气中 CO₂ 浓度非常相近的值, 并且不受表面光量子通量的影响。研究指出: 大气 CO₂ 浓度在大面积范围内主要是受边界层的影响, 而不是受光量子活动的影响, 这个结果为 CO₂ 和水汽通量模型建立提供了线索。Grace 的相关研究结果还为森林对光和温度的响应提供了重要信息, 并证实了这片森林为碳的净汇。但是, 由于研究样地的典型性以及生态系统各年间和季节间碳平衡的变化等多方面的原因, 使得研究结果还存在一定的不确定性^[31]。

为了进一步阐明 CO₂ 浓度与光量子的关系, 从 1995 年开始 Malhi 应用涡度相关法在亚马逊中部 Manaus 附近的 Biologia do Cuieiras 热带森林又进行了新的研究^[2]。研究表明: 亚马逊中部的热带森林日光合速率为 24~28 μmol/(m²·s), 呼吸率为 6~8 μmol/(m²·s), 存在明显的季节性的光合作用高峰, 并且伴随着较大的土壤含水量; 而土壤呼吸没有明显的季节变化。Malhi 的研究还表明, 季节变化是由于光合作用的季节变化引起的。Malhi 指出夜间的 CO₂ 通量变化取决于气象状况。在大气层结稳定的平静夜晚, 呼吸作用所产生的 CO₂ 都积聚在了林冠层内, 在清晨会暴发而出; 但是在稳定状况较差的夜晚, 大部分 CO₂ 会在整个夜间被间歇地释放^[2]。这种说法验证了 Grace 提出的当夜间气象状态稳定时, 通量测量具有不确定性的说法^[26]。

Malhi 还将所得的热带生态系统净 CO₂ 交换量(NEE)的日变化情况与 Fan 等在 Ducke 站点附近以及 Grace 等在亚马逊南部的 Rondonia 附近的研究结果进行了比较, 结果表明: Ducke 森林昼间的 NEE 峰值介于 Cuieiras 森林干季和雨季的数值之间; 比生物量相对较低的 Rondonia 森林的峰值稍小, 且上午和下午存在较大的不对称性; 但夜间呼吸没有什么差异。这些结果表明尽管观测地点有着较大的差异, 但是亚马逊流域的热带雨林在生理生态学功能上表现出了明显的空间稳定性。

对热带生态系统净 CO₂ 交换量(NEE)的研究主要集中在热带雨林和热带(或亚热带)稀树大草原上。亚马逊雨林最大的 NEE 值雨季为 -20 mmol/(m²·s), 干季为 -15 mmol/(m²·s)^[1,11,12]。Vourlitis 等对 Cerradao 热带雨林净生态系统 CO₂ 交换的季节变化的研究结果表明, 森林的 CO₂ 交换大致处于平衡状态, 但是在干湿季交替的季节, 森林转变成了碳源, 每天释放 50~150 mmol/m² 的 CO₂, 而在雨季森林为碳汇, 每天吸收 55~102 mmol/m² 的 CO₂; 研究结果还表明, 季节性降雨变化对 Cerradao 森林 NEE 的季节变化有着重要影响^[32]。

亚马逊流域虽然有世界上最大的雨林面积, 对全球的气候变化有着极其重要的影响, 但其他地区的热带雨林也是不容忽视的。Aoki 等人对东南亚的热带雨林也曾进行了间断性观测, 通过 CO₂ 的垂直廓线估算了 CO₂ 通量, 计算出当入射的太阳辐射为 907 W/m² 时, 森林的 CO₂ 净吸收量为 1.2 mg/(m²·s)^[33]。

20 世纪 90 年代, 日本学者对泰国的 Phangnga 热带雨林进行了实地观测^[34], 其目的在于确定涡度扩散系数和气孔导度等, 并求出太阳辐射、风速、温度、湿度等气象要素与 CO₂ 吸收之间的关系。据此, 能够从热带雨林的生长环境来推测热带雨林对 CO₂ 吸收能力, 并利用观测资料对雨季和旱季进行了比较分析。

他们认为, 热带雨林的微气象主要取决于热收支状况, 在旱季即使把显热通量和潜热通量二者加起来也达不到净辐

射的通量值,这意味着被群落蓄积的热量相当大,其中不只是树木,还包括群落内的大气、土壤等蓄积的热量。 CO_2 通量在雨季的晴天与旱季具有几乎相同的特征,但是在雨天由于太阳辐射减弱,相应的 CO_2 通量也变的较小,太阳辐射与 CO_2 通量呈现负相关关系。当然通量并不总是增加,当太阳辐射达到一定程度时,通量也会达到饱和。

Yasuda 等在马来西亚的 Pasoh 森林也进行了观测,估算了短期 CO_2 通量,得到了东南亚热带雨林 CO_2 通量的基本特征,并通过 CO_2 通量和观测高度以下空气层内的 CO_2 储存量估算了生态系统的净 CO_2 交换量。研究表明热带雨林是 CO_2 的汇, CO_2 通量大致在 $-1.0 \sim -0.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化为 $-12.55 \sim -5.20 \text{ g}/\text{cm}^2$ ^[35]。

4 结 语

近年来,人们已经认识到了热带森林在全球碳循环和碳平衡中的重要作用,但对热带森林的研究主要集中在对不同热带森林进行基础观测和初步分析上。主要的研究包括: (1) 热带森林中 CO_2 、水汽和热通量与大气之间的交换; (2) 人为的干扰和气候变化对热带森林与大气之间的 CO_2 、水汽、热通量以及能量交换的影响。有关碳通量的研究在温带地区已经较为成熟,多数学者认为温带地区为碳汇。而热带地区的碳通量研究相对较少,而且存在着很大的不确定性,多数研究仍处于基础研究阶段。

在涡度相关通量观测中普遍存在的一个问题是夜间空气层结过于稳定,使得涡度相关仪器无法响应,从而造成了夜间通量测量的不确定性,热带地区也不例外。夜间通量的不确定性的确会带来通量研究上的不准确,加之其他因素(如水平平流以及垂直平流等)也会造成通量误差,所以由此导致的涡度相关观测中的误差是无法避免的,如何解决减少误差乃是值得深入探讨的问题,也是研究的热点;另外,在观测技术上和通量数据的处理上,尽量减小误差,使得通量的观测结果更接近实际,也是人们所关注的问题;只有获得良好的数据,并进行综合分析,才能真正了解热带森林在陆地生态系统碳循环中的作用。

通量观测塔的设置是有限的,通过有限的的数据资料来了解全部热带森林的作用,最直接的办法就是建立相关的模型。首先,应用模型可以对缺失数据进行插补,从而较为准确地了解该热带地区的整体状况;其次,对热带森林植被以及气候等相关资料进行调查,建立热带森林的碳循环模型,有利于更好地把握热带森林的作用。

世界上的热带森林主要集中在美洲、非洲和东南亚,其中巴西拥有世界上最大的热带森林。目前,巴西建立了较为集中的热带森林通量观测站,科学家们对巴西的热带森林也进行了相对较多的研究;日本对马来西亚、泰国、印度尼西亚的热带雨林也开展了相关研究,在其他热带地区也分布着一些通量观测站,这都为热带森林的通量研究工作打下了良好的基础。2002 年 11 月,中国通量网络(ChinaFlux)在云南西双版纳的国家自然保护区内热带季节雨林中 70 m 的观测塔上设置了开路涡度法通量系统,填补了我国在热带森林微气象法碳通量观测研究的空白。目前已获得大量观测数据,相信通过观测数据的分析,可以为评估我国热带森林的碳源/汇及其在森林生态系统中的作用提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] FAO. Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries [R]. Rome: FAO Forestry Paper, 1993.
- [2] Mahli Y, Nobre A, Grace J, *et al.* Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rain forest[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 31593– 31612.
- [3] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263: 185– 190.
- [4] Detwiler R P, Hall C A S. Tropical forests and the global carbon cycle[J]. Science, 1988, 239: 42– 47.
- [5] Skole D, Tucker C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988[J]. Science, 1993, 260: 1905– 1910.
- [6] FAO. The forest Resources of the Tropical Zone by Main Ecological Regions [R]. Rome: FAO, 1992.
- [7] Bolin B, Sukumar R, Ciais P, *et al.* IPCC Special Report on Land Use, Land Use Change and Forestry, chapter 1: Global Perspective [M]. U K: Cambridge University Press, 2000.
- [8] Prentice I C, Farquhar G D, Fasham M J R, *et al.* The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide, chapter 3: IPCC Climate Change 2001, Working Group I, The scientific basis[M]. U K: Cambridge University Press, 2001.
- [9] DeFries R S, Houghton R A, Hansen M C, *et al.* Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2002, 99(22): 14256– 14261.
- [10] Achard F. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forest[J]. Science, 2002, 297: 999– 1002.
- [11] Fan S M, Wofsy S C, Bakwin P S, *et al.* Atmosphere-biosphere exchange of CO_2 and O_3 in the central Amazon forest[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(D10): 16851– 16864.
- [12] Grace J, Lloyd J, McIntyre J, *et al.* Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992~ 1993 [J]. Science, 1995a, 270: 778– 780.
- [13] Tian H, Mellilo J M, Kichilgher D W, *et al.* Effects of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems[J]. Nature, 1998, 396: 664– 667.

- [14] Korner C. CO₂ fertilization: the great uncertainty in future vegetation development[A]. Vegetation Dynamics and Global Change[C]. Solomon A M, Shugart H H, eds. London: Chapman & Hall, 1993.
- [15] Enting I G, Trudinger C M. A synthetic inversion of the concentration and $\delta^{13}\text{C}$ of atmospheric CO₂[J]. Tellus, 1995, 47B: 318– 325.
- [16] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, *et al.* Interannual extremes in the rate of atmospheric carbon dioxide since 1980[J]. Nature, 1995, 375: 666– 670.
- [17] Ciais P, Tan P P, Troler M, *et al.* A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO₂[J]. Science, 1995, 269: 1096– 1102.
- [18] Houghton R A, Skole D L, Nobre Carlos A, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon[J]. Nature, 2000, 403: 301– 304.
- [19] Prentice I C, Lloyd J. G-quest in the Amazon Basin[J]. Nature, 1998, 396: 619– 620.
- [20] Houghton R A. Terrestrial carbon storage: Global lessons for Amazonian research[J]. Ciencia e Cultura Sao Paulo, 1997, 49: 58– 72.
- [21] Keeling S C, Piper, Heimann M. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration[J]. Nature, 1996, 381: 218– 221.
- [22] Rayner P J, Enting I G, Francey R J, *et al.* Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, $\delta^{13}\text{C}$ and O₂/ N₂ observations[J]. Tellus, 1999, 51B: 213– 232.
- [23] Oliver L P, Malhi Y, Higuchi N, *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots[J]. Science, 1998, 282: 439– 442.
- [24] Shuttleworth W J, Gash J H C, Lloyd C R, *et al.* Eddy correction measurements of energy partition for Amazonian forest[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1984a, 110: 1143– 1162.
- [25] Shuttleworth W J, Gash J H C, Lloyd C R, *et al.* Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1984, 110b. : 1163– 1169.
- [26] 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): 209– 217.
- [27] Allen L H, Lemon E, Muler L. Enviroment of a costa Rica forest[J]. Ecology, 1972, 53: 102– 111.
- [28] Martin C L, Fitzjarrald D, Garstang M, *et al.* Structure and growth of the mixing layer in the Amazonian rainforest[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93: 1361– 1375.
- [29] Grace J, Lloyd J, McIntyre J, *et al.* Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia[J]. Global Change Biology, 1995(1): 1– 12.
- [30] Wofsy S C, Harriss R C, Kaplan W A. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon Basin[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93: 1377– 1387.
- [31] Keller M. Emissions of N₂O, CH₄ from tropical forest soils[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 11791– 11802.
- [32] Vourlitis G L, Priante Filho N, Hayashi M M S, *et al.* Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest[J]. Functional Ecology, 2001, 15: 388– 395.
- [33] Aoki M, Yabuki K, Koyama H. Micrometeorology and assessment of primary production of a tropical rain forest in West Malaysia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1975, 31: 115– 124.
- [34] 文字信貴. 森林における温室効果 $\mu\text{E}\text{m}^2$ 観測手法に関する提言[EB/OL]. http://www-cger.nies.go.jp/cger-j/report/r_index-j.html, 1999– 08– 18.
- [35] Yukio Y, Yoshikazu O, Tsutomu W, *et al.* Measurement of CO₂ flux above a tropical rain forest at Pasoh in Peninsular Malaysia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 114: 235– 244.

(责任编辑 黄润州)