

371-378  
尖峰岭热带山地雨林生态系统  
碳平衡的初步研究\*

S718 5.4.2

李意德 吴仲民 曾庆波 周光益 陈步峰

(中国林业科学研究院热带林业研究所 广州 510520)

方精云\*\*

(中国科学院生态环境研究中心 北京 100085)

**摘要** 报道了我国海南岛目前保存面积较大、林分的组成和结构复杂的热带山地雨林生态系统的C素库和群落的CO<sub>2</sub>排放动态。通过在尖峰岭林区进行为期3a的研究,结果表明:热带山地雨林的碳素库主要有3个方面,即森林生物量中的C为234.3056t/hm<sup>2</sup>,森林凋落物现存量中的C为2.98t/hm<sup>2</sup>以及土壤层中的C为104.696t/hm<sup>2</sup>,合计为341.9816t/hm<sup>2</sup>。森林生态系统中的CO<sub>2</sub>平衡的基本动态为:每年用于群落总第一性生产力所同化的CO<sub>2</sub>总量为74.28t/hm<sup>2</sup>,其中42.69t/hm<sup>2</sup>的CO<sub>2</sub>又通过群落呼吸作用而释放出来,用于净第一性生产力为31.59t/hm<sup>2</sup>。另一方面,凋落物层每年通过呼吸而释放的CO<sub>2</sub>量为3.27t/hm<sup>2</sup>,土壤的释放(不包括根系的呼吸)量约为26.96t/hm<sup>2</sup>。收支相抵,热带山地雨林生态系统每年对大气中的CO<sub>2</sub>的固定量为1.366t/hm<sup>2</sup>,折合C为0.3725t/hm<sup>2</sup>。由此可见,恢复、发展和保护热带林生态系统是解决大气中CO<sub>2</sub>浓度升高、温室效应等全球性的生态问题的重要途径之一。

**关键词:** 热带林生态系统, C素库, CO<sub>2</sub>收支平衡, 呼吸, 生产力。

## CARBON POOL AND CARBON DIOXIDE DYNAMICS OF TROPICAL MOUNTAIN RAIN FOREST ECOSYSTEM AT JIANFENGLING, HAINAN ISLAND

Li Yide Wu Zhongmin Zeng Qingbo Zhou Guangyi Chen Bufeng

(The Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou, 510520, China)

Fang Jingyun

(Research Center for Eco-environmental Sciences, Academia Sinica, Beijing, 100085, China)

**Abstract** Summarized the results of carbon pool and carbon dioxide dynamics of the pristine ecosystem of tropical mountain rain forest at Jianfengling, Hainan Island. The results indicate that: (1) the carbon pool of the forest ecosystem consisted of three main parts

\* 林业部重点项目“尖峰岭热带林生态系统定位研究(90-08-11)的研究内容,及国家“八五”攻关项目子专题“热带山地雨林二氧化碳排放通量测定(85-913-01-02-01)”的一部分。

参加野外工作的还有杜志鹤,林明献,刘国华,张舒环,陈焕强,蒋忠亮等,尖峰岭热带林自然保护区张振才站长对野外工作给予了大力支持,特致谢意!

\*\* 现工作单位,北京大学城市与资源环境系。

收稿日期:1996-03-18,修改稿收到日期:1996-06-23。

with a total amount  $342\text{t}/\text{hm}^2$  (converting into carbon dioxide up to  $1254\text{t}/\text{hm}^2$ ), of which the forest biomass pool occupied  $234.31\text{t}/\text{hm}^2$ , litter fall pool  $2.98\text{t}/\text{hm}^2$  and forest soil pool  $104.696\text{t}/\text{hm}^2$ ; (2) the basic dynamics of carbon dioxide in the forest ecosystem lists as, the  $\text{CO}_2$  amount assimilated for gross productivity by forest community was up to  $74.28\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ , of which the respiration consuming by the community was calculated about  $42.69\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ , and the net amount of assimilated  $\text{CO}_2$  remained of  $31.59\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ . On the other hand, the forest community released the  $\text{CO}_2$  by respiration of litter fall layer and forest soil which the amount was  $3.26$  and  $26.96\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$  respectively. So the  $\text{CO}_2$  budget of forest ecosystem could be known, that was  $1.366\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$   $\text{CO}_2$  or  $0.3725\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$  C to be fixed in forest ecosystem.

It is obvious that recovering, developing and protecting the tropical forest is one of the most important steps to solve the globe ecological problems especially the consistent increase of  $\text{CO}_2$ .

**Key words:** tropical forest, carbon pool, carbon dioxide release, respiration, productivity.

当今,工业化的发展、人口剧增、大量使用化石燃料和对森林的过度采伐而造成的大气  $\text{CO}_2$  浓度的增加、温室效应等一系列全球性的生态问题,已成为严重影响人类自身生存的大敌,控制工业性的  $\text{CO}_2$  排放量、保护和恢复森林生态系统是解决这些生态问题的重要手段。森林不仅在涵养水源、保持水土、净化空气、保护生物多样性等有关方面起着重要的作用,而且在全球性的  $\text{CO}_2$  固定量上起着举足轻重的作用,据估计,在全球陆地生物系统的第一性生产力中固定的 C 总量高达  $121.7 \times 10^9\text{t}$  干物质<sup>[1]</sup>。

国外对森林与 C 的关系研究已有几十年的历史,较著名且成果丰富的要数日本学者吉良龙夫(Kira Tatsuo)及其研究小组自60年代以来在东南亚热带地区所作的研究<sup>[2]</sup>,他们的研究方法和结论对后来的研究均起到了非常重要的作用;在森林 C 动态及其数学模拟方面有, Oikawa 对热带雨林的 C 储量动态作的一系列的研究<sup>[3~5]</sup>; Bossel 等对我国广东的大叶相思林、欧洲云杉林的养分循环(包括 C 循环)模型的研究<sup>[6]</sup>等。我国对森林生产力与  $\text{CO}_2$  库和排放量的关系研究得甚少,近年来有学者对温带针阔叶混交林 C 储量动态进行了模拟<sup>[7]</sup>;然而在我国热带地区,这方面的研究基本上为空白,许多内容需要从最基础的工作做起。近几年来,作者所在的研究小组对海南岛热带林作了一些群落生物量的测定和比较<sup>[8~11]</sup>,为森林生态系统的生产力的研究作了一些前期性的工作,并通过设置长期观测的固定样地及凋落物收集与分解测定装置,以了解森林群落的生长、更新、演替和群落发育的动态,初步测定了森林群落的呼吸量、土壤和凋落物的呼吸量等  $\text{CO}_2$  源的排放过程。本文根据上述几方面的研究将有关资料综合整理而成,旨在为我国森林生态系统碳平衡及动态模拟提供基础数据,同时也为我国热带森林的保护政策的制定提供科学依据。

## 1 研究地概况

研究地位于海南岛西南部的尖峰岭林区,地处北纬  $18^{\circ}23' \sim 18^{\circ}52'$ ,东经  $108^{\circ}36' \sim 109^{\circ}02'$ ,总面积约  $600\text{km}^2$ ,分布有热带半落叶季雨林、热带常绿季雨林、热带山地雨林及山顶苔藓矮林等自然森林植被类型,其中热带山地雨林是尖峰岭地区面积较大、保存较为完好、且群落的种类组成和结构最为复杂的类型<sup>[12]</sup>。热带山地雨林分布海拔约为  $650 \sim 1200\text{m}$ ,气候条件非常适合植物的生长和群落的发育。据尖峰岭天池(海拔  $820\text{m}$ )的气象站的观测资料,年平均气温  $19.7^{\circ}\text{C}$ ,温度年较差小,年平均降水量  $2651\text{mm}$ ,相对湿度  $88\%$ ,湿润系数高达  $4.0$ ,属极湿类型<sup>[13]</sup>。本研究是在位于天池林场附近的热带山地雨林中进行的,海拔  $800 \sim 850\text{m}$ ,属未经干扰破坏的原始林。

## 2 研究方法

**2.1 样地设置** 在保存好而未受人为干扰破坏的热带山地雨林中设置固定样地  $1\text{hm}^2$ ,调查样地内胸径

(DBH)  $\geq 5.0$  cm 的所有乔木、棕榈科的高山蒲葵 (*Livistona saribus*) 和大型的木质藤本植物, 准确量测胸径、模型法计算树高、记载生长状况, 并尽量在现场鉴定植物种名, 不能鉴定的则采集标本请有关专家鉴定。样地内的所有树木均挂上印有号码的塑料标签, 固定在胸径测量处, 以便样地复查时能准确量取同一位置。

**2.2 群落生物量及净增量的测定和计算** 根据热带山地雨林生物量估测模型<sup>[11]</sup>而计算群落的总生物量及树干、树枝、树叶和树根的生物量; 两次调查生物量的差值加上小乔木的进径生长量、减去大树、老树的枯死量即为生物量的净增量。

**2.3 林木、土壤和凋落物的呼吸量测定** 由于研究经费和野外条件的限制, 采用密闭吸收法进行测定<sup>[14]</sup>, 即用一密闭的容器(树叶的测定还要求不透光), 内置 KOH 溶液、被测样品、温度计等, 样品呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 被 KOH 吸收, 然后再用 HCL 进行滴定, 以此求算样品的呼吸速率。土壤和凋落物的呼吸测定则是用容器盖于土壤或凋落物层上进行吸收测定, 其测定过程与植物样品的测定相同。

**2.4 凋落物现存量和生产量的测定** 每月定期收集林地上的凋落物, 求算凋落物的现存量; 用样框法收集凋落物生产量, 样框大小为 0.5 m<sup>2</sup>, 共设置样框 20 个; 对于较大的凋落枝和树干, 则采用 2 × 5 m<sup>2</sup> 的大样方 8 个进行收集, 将收集的凋落物在 85℃ 下烘干至恒重, 按月计算单位面积凋落物总量, 并抽取混合样品测定 C 含量。本测定从 1982 年至 1995 年前后共进行了 8a。

**2.5 森林群落总生产力的估算** 根据群落的净生产量、凋落物产量、呼吸消耗量 3 项指标进行计算, 不包括尚未进行测定的第二性生产量。

**2.6 土壤 C 含量的测定** 在样地内挖取了 7 个土剖面, 按 10 cm 为一层取土壤样品, 带回实验室用燃烧法进行 C 含量分析, 根据土壤含 C 量用容重法计算土壤 C 素库总量。

**2.7 植物量与 C 的转换系数** 用燃烧法测定植物和凋落物 C 含量, 植物生产 1 单位重量的干物质需同化的 CO<sub>2</sub> 量为: 树干 2.1230、树皮 1.6727、树枝 1.6807、树叶 1.6807、树根 1.9763, 按生物量的分配比例加权平均后的系数为 1.9470、树干树皮加权平均为 2.0346、凋落物的系数为 1.8759。

### 3 结果分析

#### 3.1 森林群落生物量

**3.1.1 生物量估测模型的选择** 据研究<sup>[9-11]</sup>, 海南岛热带山地雨林山地上部分生物量与胸径的平方乘树高呈良好的幂函数关系, 这些模型均为多树种的混合模型; 树根的生物量模型根据在相似的湿润条件区域中其生物量估计模型较为相近的结论<sup>[11,15]</sup>, 选用泰国北部的 Khong Chong 雨林的根系生物量模型<sup>[16]</sup>来作为计算尖峰岭热带山地雨林根系生物量的估计值。其估测方程为:

树干  $W_w = 0.022178 (D^2 H)^{1.005174}$ , 树皮  $W_b = 0.004412 (D^2 H)^{0.943871}$ , 树枝  $W_r = 0.011633 (D^2 H)^{0.892514}$ , 树叶  $W_l = 0.007247 (D^2 H)^{0.750336}$ , 树根  $W_r = 0.0264 (D^2 H)^{0.775}$

式中,  $D$  为林木的胸径,  $H$  为树高,  $W$  的单位为 Kg。根据多次调查资料而的拟合结果, 树高与胸径的模型可用双曲线函数表示:

$$H^{-1} = 0.026048 + 0.772186/D$$

根据作者资料拟合的棕榈科植物高山蒲葵的生物量估计模型为:

$$\text{茎干 } W_w = 0.075254 (D^2 H)^{0.81644}, \text{叶及叶柄 } W_l = 0.001647 (D^2 H)^{0.794684}$$

大型木质藤本植物的生物总量的模型为<sup>[9]</sup>:

$$\text{总量 } W = 0.113063 (D^2 L)^{0.706095}$$

式中,  $D$  为藤粗度(离藤根头约 1.3 m 处量取, 单位 cm),  $L$  为藤长度, 单位为 m。

**3.1.2 林分生物量及其增量** 据 1 hm<sup>2</sup> 固定样地 1992 年和 1993 年的两次调查材料, 依据上述有关模型, 计算得出的生物量值(干重, t/hm<sup>2</sup>) 列于表 1。从表 1 可看出, 1 hm<sup>2</sup> 样地上, 林分总生物现存量为 420~430 t/hm<sup>2</sup> 的范围, 与世界热带各地的生物量资料相比<sup>[1,17]</sup>, 这个数值是合理的。但从生物量分配比例来看, 枝和叶的生物量可能被低估<sup>[9,10,15]</sup>。

**3.1.3 样地复查时林木进径生长生物量** 样地于 1993 年底进行复查时, 有一部分乔木和木质藤本植物进

入了起径范围,这部分的生物量结果列于表2。

表1 1hm<sup>2</sup>固定样地两次调查生物量及其分配(t/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Forest biomass in two year censuses and the net increment

组 分 Component	1992年生物量 Biomass in 1992	1993年生物量 Biomass in 1993	生物量比例 Ratio(%)	增量 Increment	
乔木层 Tree layer	树干 Stem	301.9203	308.7880	71.97	6.8677
	树皮 Bark	30.7921	31.4901	7.34	0.6980
	树枝 Branch	46.7583	47.8098	11.14	1.0515
	树叶 Leaf	6.5907	6.7318	1.57	0.1411
	树根 Root	30.9169	31.5864	7.36	0.6695
高山蒲葵 <i>Livistona saribus</i>	茎干 Stem	1.1752	1.3249	0.31	0.1497
	叶和叶柄 Leaf	0.0505	0.0576	0.01	0.0070
木质藤本植物(全株,不含根) Woody liana(excluding root)		1.2375	1.2582	0.30	0.0208
林分合计 Total	419.4415	429.0468	100.00	9.6053	

表2 进径生长植株的生物量(t/hm<sup>2</sup>)

Table 2 The in-growth biomass between two investigation

类别 Component	树干 Stem	树皮 Bark	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	总量 Total
乔木 Tree layer	0.3697	0.0539	0.1096	0.0332	0.1376	0.7040
木质藤本植物 Woody liana						0.0820

3.1.4 立木死亡损耗 在两次调查之间,样地上的立木共有2株死亡,这期间损耗的生物量为(t/hm<sup>2</sup>):树干0.5346、树皮0.0597、树枝0.0969、树叶0.0158、树根0.0728,总计为0.7527t/hm<sup>2</sup>,年死亡损耗为0.5013t/hm<sup>2</sup>,表1中的增量已减去了死亡损耗量。

表3 尖峰岭热带山地雨林生物量净增量(t/hm<sup>2</sup>)

Table 3 The biomass yearly net increment of the forest

项 目 Item	两次调查差值* Increment	进径生长 In-growth	净增值 Net increment	年增长值 Yearly net increment	
乔木 Tree layer	树干 Stem	6.8766	0.3697	7.2374	4.8205
	树皮 Bark	0.6980	0.0539	0.7519	0.5008
	树枝 Branch	1.0515	0.1096	1.1611	0.7734
	树叶 Leaf	0.1411	0.0332	0.1743	0.1161
	树根 Root	0.6695	0.1376	0.8071	0.5376
	小计 Sum	9.4278	0.7040	10.1318	6.7484
高山蒲葵 <i>Livistona saribus</i>	茎干 Stem	0.1497		0.1497	0.0997
	叶(柄) Leaf	0.0070		0.0070	0.0047
	小计 Sum	0.1567		0.1567	0.1044
木质藤本植物(全株,不含根) Woody liana(excluding root)		0.0208	0.0820	0.1028	0.0685
合 计 Total	9.6053	0.7860	10.3914	6.9213	

\* 林木死亡损耗部分已被减去。Excluding died tree biomass.

3.1.5 群落生物量净积累量 在两次森林群落调查期间(共548d),生物量的增值部分为净积累量,它是净第一性生产力中最主要的组成部分。本研究中,生物量的净积累应包括表1中的增量和表2中的进径生长量,详细资料列于表3。从表可以看出,尖峰岭热带山地雨林乔木层的年平均增积累量为6.748t/hm<sup>2</sup>,高山蒲葵0.1044t/hm<sup>2</sup>,木质藤本植物0.0685t/hm<sup>2</sup>,总计为6.9213t/hm<sup>2</sup>,这个值与在同一地区用不同的方法所作的测定值(乔木层6.2421t/hm<sup>2</sup>. a)<sup>[10]</sup>以及泰国热带雨林的值(乔木层6.4433t/hm<sup>2</sup>. a)<sup>[16]</sup>相当,而高于南

美委内瑞拉的 tierra firme 林(4.383t/hm<sup>2</sup>·a<sup>[16]</sup>。本文测定的这个值,不包括胸径小于5cm的下木层、草本层、寄生和附生植物,尽管它们在整个生态系统中的比重很小<sup>[9]</sup>。

### 3.2 凋落物生产量及现存量

从1982年~1995年2月的不连续的8a多观测时间(部分年份未观测)内,尖峰岭热带山地雨林的年平均凋落物产量为9.38t/hm<sup>2</sup>·a,这个数值稍高于前期的一些研究<sup>[9]</sup>,凋落物的现存量一般保持在5.9t/hm<sup>2</sup>左右。

### 3.3 森林群落的呼吸消耗量

3.3.1 林木呼吸量测定的计算公式 树叶的呼吸量计算公式为平均呼吸速率与单株林木的树叶总鲜重(W<sub>l</sub>)相乘就可:

$$R_l = 70.640631(\text{mgCO}_2/\text{h kg}) \cdot W_l(\text{kg}/\text{株}) = 0.000619 \times W_l(\text{t}/\text{a} \cdot \text{株})$$

林木的非同化器官(干、枝、根)呼吸量的计算较为复杂,根据Piper Model理论<sup>[20,21]</sup>,首先要通过样木资料求出各木质器官直径频度(即某一直径范围内的总长度)分布中的 $\alpha$ 值、最大直径 $D_{\max}$ 和最小直径 $D_{\min}$ 值,呼吸速率与直径大小的回归关系中的回归系数等有关参数<sup>[22]</sup>,在本研究中,回归方程以幂函数式 $R = AD^B$ 为最好,根据对13株样木的测定,这些参数列于表4。

表4 热带山地雨林中呼吸测定有关计算参数

Table 4 Some parameters for calculating the respiration of tree woody organs

器官 Organ	$\alpha$ 值	$D_{\max}$	$D_{\min}$	A	B
树干 Stem	0	1.1328DBH	0.4685DBH	25.15099	-0.502774
树枝 Branch	2.0	0.4140DBH	0	23.91822	-0.721542
树根 Root	1.5	1.5178DBH	0	14.03406	-0.284971

木质器官呼吸速率的回归式和呼吸量计算的通用公式为<sup>[24]</sup>:

$$R = \int AD^B K' \Phi(D) D^2 dD = K K' A \int D^{2+\alpha-B} dD \\ = W(3-\alpha)/(D_{\max}^{3-\alpha} - D_{\min}^{3-\alpha}) \times A/(3-\alpha+B) \times \left[ \begin{matrix} D_{\max}^{3-\alpha+B} \\ D_{\min}^{3-\alpha+B} \end{matrix} \right]$$

式中W为木质器官的生物量鲜重值。将表4中有关参数代入此公式,则计算式分别为:

$$\begin{aligned} R_{st} &= 3W_{st}/(D_{\max}^1 - D_{\min}^1) \times A/(3+B) \times [D_{\max}^{2+B} - D_{\min}^{2+B}] \\ \text{树干:} &= 0.000264681 \times W_{st} \times (D_{\max}^{2.497225} - D_{\min}^{2.497225}) / (D_{\max}^1 - D_{\min}^1) \\ \text{树枝:} &R_{br} = W_{br}/D_{\max}^2 \times A/(1+B) \times (D_{\max}^{1+B}) = 0.000752443 \times W_{br} \times D_{\max}^{2.4343} / D_{\max}^1 \\ \text{树根:} &R_{rt} = 1.5W_{rt}/D_{\max}^{1.5} \times A/(1.5+B) \times (D_{\max}^{1.5+B}) = (0.000151783 \times W_{rt} \times D_{\max}^{2.5229}) / D_{\max}^1 \end{aligned}$$

3.3.2 群落呼吸总量的计算 根据上述公式的计算及2.7节的转换系数,热带山地雨林群落乔木层的年总呼吸量和干物质消耗量列于表5。从年呼吸量来看,本文的呼吸测定值(42~43t/hm<sup>2</sup>·a)属正常范围,其他热带森林测定值为(38~95t/hm<sup>2</sup>·a<sup>[16]</sup>。

### 3.4 森林群落第一性生产力的初步计算

第一性生产力具极其复杂的概念和测定内容,以公式表述为: $P_g = P_n + R$ ,式中, $P_g$ 为总生产量, $P_n$ 为净生产量, $R$ 为呼吸消耗量。

$P_n$ 是一个非常复杂的分量,假定在对森林群落进行两次调查测定期间内的生物量净增量为 $\Delta B$ ;凋落物量为 $L$ (包括林木死亡量);第二性生物的消耗量为 $I_g$ ,森林干物质的输出量为 $Exp$ ,输入量为 $Imp$ ,则净生产量应为: $P_n = \Delta B + L + I_g + Exp - Imp$ 。

在测定的热带原始林生态系统中, $Exp$ 项不存在, $Imp$ 项也几乎没有,由于作者条件所限, $I_g$ 目前尚未作测定,因此 $P_n$ 项是将两次生物量调查的净增值 $\Delta B$ 与凋落量 $L$ 相加而得出,所以本文得出的总生产量是一个并不全面的估计数值。

根据上述几节的测定,森林群落的生物量净增量为6.9213t/hm<sup>2</sup>·a,因呼吸而消耗的干物质量为22.7~

23.2t/hm<sup>2</sup>.a,平均约为22.9341t/hm<sup>2</sup>.a,凋落量为9.38t/hm<sup>2</sup>.a,因此总生产量估计值约为39.2354t/hm<sup>2</sup>.a,与世界各地热带森林年总第一性生产力的值相当(约为10~40t/hm<sup>2</sup>.a)<sup>[1]</sup>,如果加上第二性生物的消耗量,则总生产应稍高于此值。

表5 尖峰岭热带山地雨林群落(乔木层)呼吸总量(t/hm<sup>2</sup>.a)

Table 5 The respiration at 24.5°C and dry-matter consumption in tree layer of the forest

项 目 Item		树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	合计 Total
1992 年 样地调 查数据	月 CO <sub>2</sub> 呼吸量 <sup>①</sup>	1.6900	0.7762	0.8117	0.2418	3.5197
	月干物质消耗量 <sup>②</sup>	0.8306	0.4550	0.4830	0.1224	1.8910
	年 CO <sub>2</sub> 消耗量 <sup>③</sup>	20.2802	9.3143	9.7411	2.9023	42.2379
Data in 1992	年干物质消耗量 <sup>④</sup>	9.9677	5.4598	5.7959	1.4685	22.6919
	%	43.93	24.06	25.54	6.47	100
	1993 年 样地调 查数据	月 CO <sub>2</sub> 呼吸量	1.7275	0.7916	0.8293	0.2468
Data in 1993	月干物质消耗量	0.8490	0.4640	0.4934	0.1249	1.9313
	年 CO <sub>2</sub> 消耗量	20.7296	9.4989	9.9514	2.9620	43.1419
	年干物质消耗量	10.1885	5.5680	5.9210	1.4987	23.1762
	%	43.96	24.02	25.55	6.47	100

①Monthly CO<sub>2</sub> respiration, ②Monthly Dry-matter consumption, ③Yearly CO<sub>2</sub> respiration, ④Yearly Dry-matter consumption

### 3.5 土壤和凋落物中的呼吸测定

用密闭吸收法测定了林地(包括土壤层和凋落物层)的 CO<sub>2</sub>排放速率,根据2a 逐月实测资料,拟合呼吸速率与地温的回归方程而计算逐月和年排放量。测定结果表明,林地凋落物层 CO<sub>2</sub>的年平均排放量为 3.269t/hm<sup>2</sup>.a,土壤中的排放总量为29.888t/hm<sup>2</sup>.a,其中包括了植物根系平均呼吸量约2.9321t/hm<sup>2</sup>.a(见表5),因此土壤中的实际排放量为26.9559t/hm<sup>2</sup>.a(主要为土壤动物和微生物的呼吸量及根系凋落物分解的释放量)。

### 3.6 森林生态系统中的 C 贮量

**3.6.1 森林植被中的 C 贮量** 根据表1中的生物量资料,乘以2.7节中提供的转换系数,可得出森林植被中的固定的 CO<sub>2</sub>总量如表6,CO<sub>2</sub>的平均贮存量约为859.1205t/hm<sup>2</sup>,折合 C 量为234.3056t/hm<sup>2</sup>。

**3.6.2 凋落物现存量中的 C 素库** 尖峰岭热带山地雨林生态系统中的凋落物现存量5.9t/hm<sup>2</sup>,按照2.7节中的转换系数计算,则凋落物层的 CO<sub>2</sub>库总量为10.92678t/hm<sup>2</sup>,折合 C 量为2.98t/hm<sup>2</sup>。

**3.6.3 土壤中 C 素库的测定** 森林土壤 C 素库的源主要是凋落物(地上和地下两部分)和动物尸体经微生物分解后以有机 C 的形式贮存于土壤中,以及由雨水带入的 C 素。经测定,土壤中 C 素含量随着土壤深度的增加而减少,并呈良好的幂函数关系:

$$C_c = 8.21665 \times H^{-0.865168}$$

式中 C<sub>c</sub> 为土壤各土层的碳含量(%),H 为土层深度。通过容重法计算土壤中 C 素库总量为104.696t/hm<sup>2</sup>。

**3.6.4 热带山地雨林生态系统中的 C 总贮量** 根据森林生态系统中的 CO<sub>2</sub>或 C 总量的测定,植被层中的 C 总量为:859.1205 × (12/44) = 234.3056t/hm<sup>2</sup>;凋落物层中为:10.9267 × (12/44) = 2.98t/hm<sup>2</sup>;土壤中为 104.696t/hm<sup>2</sup>,合计为341.9816t/hm<sup>2</sup>的 C,折合成 CO<sub>2</sub>则为1253.9325t/hm<sup>2</sup>。森林土壤层(包括土壤和凋落物)中的 C 总量占植被生物量中 C 量的30.61%,在热带其他地区的研究中,不同森林类型这个比值变化较大,据 Anderson 等学者报道<sup>[21]</sup>,在苏里南等地,这个比值约变化在20%~50%之间。

### 3.7 森林群落 CO<sub>2</sub>净同化量增值的计算

表6 热带山地雨林植被中固定的 CO<sub>2</sub>总量(t/hm<sup>2</sup>)Table 6 The total amount CO<sub>2</sub> to be fixed in the forest vegetation

组 分 Component	1992年数据 Data in 1992		1993年数据 Data in 1993		
	生物量 Biomass	折合成 CO <sub>2</sub> 量 Converting CO <sub>2</sub>	生物量 Biomass	折合成 CO <sub>2</sub> 量 Converting CO <sub>2</sub>	
乔木层 Tree layer	树干 Stem	301.9203	640.9768	308.7880	655.5569
	树皮 Bark	30.7921	51.5059	31.4901	52.6735
	树枝 Branch	46.7583	79.7697	47.8009	81.5635
	树叶 Leaf	6.5907	11.0770	6.7318	11.3141
高山蒲葵 <i>Levstonsa saribus</i>	树根 Root	30.9169	61.1011	31.5864	62.4242
	茎干 Stem 叶和叶柄 Leaf	1.1752	2.4130	1.3249	2.8223
木质藤本植物(全株,不含根) Woody liana(excluding root)	0.0505	0.0853	0.0576	0.0983	
林分合计 Total	1.2375	2.4094	1.2582	2.4497	
	419.4415	849.3385	429.0468	868.9025	

根据固定样地两次调查结果(详见表3),乘以2.7节中的转换系数,得出群落中每年净固定的 CO<sub>2</sub>量为(t/hm<sup>2</sup>·a):乔木树干10.2339、树皮0.8377、树枝1.3194、树叶0.1951、树根1.0625;高山蒲葵茎干为0.2047、叶为0.0080;大型木质藤本植物为0.1334,群落总计为13.9947t CO<sub>2</sub>/hm<sup>2</sup>·a。

### 3.8 热带山地雨林生态系统的 C 收支平衡问题

根据上述研究结论,尖峰岭热带山地雨林生态系统的 CO<sub>2</sub>排放通量和 C 平衡过程的一些初步数据列于表7。

由表中数值可见,保存完好的热带山地雨林的 CO<sub>2</sub>年同化总量可达74.2243t/hm<sup>2</sup>,但其中有42.6899t/hm<sup>2</sup>又从植物的呼吸过程中释放出去,因此年固定总量为31.5544t/hm<sup>2</sup>。另一方面,森林生态系统中除植物的呼吸作用外,还从凋落物层、土壤中释放大量的 CO<sub>2</sub>,最后整个森林生态系统固定的 CO<sub>2</sub>量为1.3660t/hm<sup>2</sup>·a,折合成净 C 量为0.3725t/hm<sup>2</sup>·a。

表7 热带山地雨林生态系统 C 平衡的估算(t/hm<sup>2</sup>·a)

Table 7 The carbon budget estimation in forest ecosystem

项 目 Item	干物质量 Dry-matter	转换成 CO <sub>2</sub> 量 Convert CO <sub>2</sub>	折算成 C 量 Convert C
收入项:群落生产同化量总计 Income: Total assimilation by community	39.2354	74.2802	20.2852
其中(1)生物量净增量 Net increment of biomass	6.9213	13.9947	3.8167
(2)凋落物生产量 Litter fall production	9.38	17.5956	4.7988
(3)用于群落呼吸消耗量* Respiration consumption	22.9341	42.6899	11.6427
支出项:总计 Total release by respiration		72.9142	19.8857
其中(1)群落呼吸消耗量* Respiration by community		42.6899	11.6427
(2)凋落物层呼吸量 Respiration by litter fall	22.9311	3.2684	0.8914
(3)土壤呼吸量 Respiration by soil layer		26.9559	7.3516
收支结余 Budget		1.3660	0.3725

\* 呼吸测定温度24.5℃, Temperature at 24.5℃.

## 4 结语

本文报道了海南岛尖峰岭热带山地雨林生态系统的 C 素库和 C 平衡的一些初步结论,结果表明,在热带山地雨林的林分生物量为420~130t/hm<sup>2</sup>的系统中,C 素库的总量是巨大的,合计约为342t/hm<sup>2</sup>的 C,换算成 CO<sub>2</sub>则高达1254t/hm<sup>2</sup>,其中植被层中的 C 总量为:234.31t/hm<sup>2</sup>;凋落物层中为:2.98t/hm<sup>2</sup>,土壤中为104.696t/hm<sup>2</sup>。

在森林总第一性生产力的分配中,每年净增生物量为 $6.9213\text{t}/\text{hm}^2$ ,固定 $\text{CO}_2$ 量为 $13.9947\text{t}/\text{hm}^2$ ;凋落物年产量为 $9.38\text{t}/\text{hm}^2$ ,固定 $17.59\text{tCO}_2/\text{hm}^2$ ,而呼吸消耗则用掉 $42.69\text{tCO}_2/\text{hm}^2$ ,合计为 $74.28\text{tCO}_2/\text{hm}^2$ 。第二性生物的消费量未作测定。

对C平衡的问题,据本文的估算值,热带山地雨林生态系统可固定大气中 $\text{CO}_2$ 量为 $1.366\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 。这还是从原始林生态系统测定的初步结论,如果是天然更新林和经营管理得好的人工林生态系统,由于净生产量高,则固定大气中的 $\text{CO}_2$ 量就更多。反之,如果热带林被破坏,不仅每年减少了固定的 $\text{CO}_2$ 量,还要将森林生态系统中的C素库中约 $342\text{t}/\text{hm}^2$ 的C中的大部分通过各种不同的途径以 $\text{CO}_2$ 的形式释放到大气中(合 $\text{CO}_2$ 量为 $1254\text{t}/\text{hm}^2$ )。这无形中增加了大气中的 $\text{CO}_2$ 浓度。由此可见,保护森林生态系统、恢复荒山荒地上的森林植被对全球大气中 $\text{CO}_2$ 浓度升高、温室效应、水土流失、生物多样性的保护等生态问题的解决具有极为重要的现实意义。

### 参 考 文 献

- 1 Lieth H and Whittaker R H. 生物圈的第一性生产力. 王业莲等译. 北京, 科学出版社, 1985. 3~13
- 2 方精云. 肖良龙夫与生态学的发展. 生态学杂志, 1995, 14(2): 70~75
- 3 Oikawa T. Simulation of forest dynamics based on a dry-matter production model. I. Fundamental model structure of a tropical rain forest ecosystem. *Bot. Mag. Tokyo.*, 1985, 98: 225~238
- 4 Oikawa T. Simulation of forest dynamics based on dry-matter production model. I. Effects of dry season on tropical rain forest ecosystem. *Bot. Mag. Tokyo.*, 1985, 99: 213~223
- 5 Oikawa T. Simulation of forest dynamics based on a dry-matter production model. II. Effects of increasing  $\text{CO}_2$  upon a tropical rain forest ecosystem. *Bot. Mag. Tokyo.*, 1985, 99: 419~430
- 6 Bossel H and Schafer H. Generic simulation model of forest growth, carbon and nitrogen dynamics and application to tropical Acacia and European spruce. *Ecol. Model.*, 1989, 49: 221~265
- 7 延晓冬, 赵士洞. 温带针阔混交林林分碳贮量动态的模拟模型 I. 乔木层的碳贮量动态. 生态学杂志, 1985, 14(2): 6~12
- 8 阳 云, 李意德等. 海南岛尖峰岭热带季雨林群落结构及地上部分生物量研究. 海南大学学报, 1988, 6(4): 26~32
- 9 黄 全, 李意德等. 黎母山热带山地雨林生物量研究. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(3): 197~206
- 10 李意德, 曹庆波, 吴仲民等. 尖峰岭热带山地雨林生物量的初步研究. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(4): 293~300
- 11 李意德. 1993. 海南岛热带山地雨林林分生物量估测方法比较分析. 生态学报, 1993, 13(4): 314~320
- 12 黄 全, 李意德, 郑德璋等. 海南岛尖峰岭热带地区植被生态系列研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 1986, 10(2): 90~105
- 13 蒋有绪, 卢俊培等主编. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统. 北京, 科学出版社, 1991. 18~28
- 14 Yoda K *et al.* Estimation of the total amount of respiration in woody organs of trees and forest communities. *Journal of Biology, Osaka City University.* 1965, 16: 15~26
- 15 Brown S *et al.* Biomass of tropical forest south and southeast Asia. *Canadian Journal of Forest Research.* 1991, 223: 1290~1293
- 16 Kira T *et al.* Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand, N. Dry matter production, with special reference to the Khao Chong rain forest. *Nature & Life in Southeastern Asia.* 1967(5): 149~174
- 17 Golley F B. 热带森林的生产量和矿质循环. 李文华译. 植物生态学译丛. 北京, 科学出版社, 1975. 4: 124~134
- 18 Jordan C F. *An Amazonian ran forest.* New York, London and Casterton: The Parthenon Publishing Group, 1989. 139
- 19 吴仲民, 卢俊培等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林及其更新群落的凋落物量与贮量. 植物生态学报, 1994, 18(4): 306~313
- 20 Shinozaki K *et al.* A quantitative analysis of plant from-the piper model theory. I. Basic analysis. *Jap. J. Ecol.* 1964a. 14: 97~105
- 21 Shinozaki K *et al.* Ibid. I. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Jap. J. Ecol.* 1964b, 14: 133~139
- 22 Anderson J M, Thomas S. The carbon, nutrient and water cycles in tropical rain forest. *MAB Digest (Unesco/UN Paris).* 1991, 7: 1~16