

橡胶林固定 CO₂ 和释放 O₂ 的服务功能及其价值估计

蒋菊生, 王如松 *

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 橡胶树除生产橡胶和提供优质木材外, 还有长期不为人们注意的生态服务功能。以中国的橡胶林为研究对象, 采用标准样木生物量法, 对橡胶林固定 CO₂ 和释放 O₂ 的生态服务功能及其价值估计进行了研究。结果表明中国橡胶林目前每年从大气中固定的 CO₂ 总量为 411 万 t, 所释放的 O₂ 为 299 万 t。经分别采用 C 税法和工业制氧成本法估计了 CO₂ 和 O₂ 的价值达到 1238 亿元和 12 亿元。二者价值之和相当于中国橡胶林每年生产橡胶和提供木材等直接产品价值的 28.7 倍。橡胶林 CO₂ 的固定能力是热带山地雨林的 4.7 倍。50a 来中国橡胶林已累计固定 CO₂ 达到 11292 万 t, 释放 O₂ 达 8212 万 t, 对短期内缓解大气的温室效应发挥了巨大的作用。

关键词: 橡胶林; 固定 CO₂; 释放 O₂; 价值估计; 中国

Function of Carbon Sequestration and Oxygen Release of Rubber Plantations and Its Value Estimation

JIANG Ju-Sheng, WANG Ru-Song * (Research Centre for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1545~1551.

Abstract: Rubber trees can not only produce rubber and high quality wood but also provide significant ecological service that has been neglected for a long time. The ecological service and its value of the rubber plantations were studied. The carbon sequestration in the rubber tree was determined by means of biomass of mean rubber tree, and the oxygen release was then derived based on the photosynthesis. The results showed that the carbon sequestration from the atmosphere totaled 4.11 million tones/year and that the oxygen release totaled 2.99 million tones/year. The values of the CO₂ and O₂ were estimated RMB 123.8 billion yuan and RMB1.20 billion yuan when calculated by using the methods of the carbon tax and the cost of oxygen production respectively. The sum of the values was 28.7 times of that of their direct products (such as rubber, timber, etc). The CO₂ sequestration of the rubber plantations was 4.7 times of that of the tropical rainforest. The CO₂ sequestration and O₂ release of the rubber plantation in China has totaled 112.9 million tones and 82.1 million tones respectively over the last 50 years, which has been playing important role in reducing the global green house effect.

Key words: rubber plantation; carbon sequestration; oxygen release; value estimation; China

文章编号: 1000-0933(2002)09-1545-07 中图分类号: Q948, S718.5, S794.1 文献标识码: A

C 在生物圈中的循环和平衡主要有两条途径: 一是通过植物光合作用同化大气中的 CO₂, 二是生物有机体的新陈代谢、化石燃料或新型燃料的燃烧释放出 CO₂。然而, 释放到大气中的 CO₂ 最终将被植物重新固定, 同时随着大气中 CO₂ 浓度的升高, 植物的光合作用增强, 固定的 CO₂ 量也会相应增加。橡胶林通过光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (39930040)

收稿日期: 2001-06-15; 修订日期: 2002-06-27

作者简介: 蒋菊生, 男, 博士, 研究员。主要从事生态及生态工程研究。

* 通讯作者 Author for correspondence

合作用消耗的 CO_2 与一个原始森林消耗 CO_2 的效果几乎是一样的,同时也产生维持生命所必需的 O_2 ^[1]。

我国现有橡胶林 63.12 万 hm^2 ,是中国热带地区最大的人工森林生态系统之一,对中国热带地区的生态系统服务功能起到了巨大的作用。

经过橡胶林具有经济和生态双重功能。其经济功能不再只是产胶,当橡胶木材改性利用技术后,使作为薪柴的橡胶木现已成为高档家具木材而供不应求。橡胶林还具有重要的生态服务功能^[2,3],如调节气候、调节水文、涵养水源、保持水土,作为生物避难所、保存基因资源,并成休闲游乐场所和科研教育基地等。

橡胶林对大气的调节作用方面,马来西亚橡胶研究院的 Sivakumaran and Yew^[2]研究了橡胶树对大气中的 C 的固定和缓解大气的温室效应。他们首先分析了橡胶树各个部位的 C 的含量。并在 6 个不同的地区不同的无性系年龄在 30a 左右的橡胶树进行伐倒按部位实测,计算了橡胶林一生的生命周期里可固定大气中的 C 为 318.7t/ hm^2 ,但是他们没有进行价值估算,也未对橡胶林所放出的氧气进行估计。

国内就橡胶林对大气的研究不多,仅在 20 世纪 70 年代和 80 年代在那场橡胶林取代天然植被后对环境利弊的争论中作了一些零散的研究^[3]。王录基对海南岛北部台地草原植胶后对降水的影响进行了研究,通过对红光农场及邻近气象台站资料的多方面对比分析,认为相对周围邻近台站而言,其降水逐年变化性较小,干季降水略有增加,降水强度略有减弱,从而说明海南岛北部台地植胶后对降水气候有一定的良好作用。莫善文的研究与其结论也基本一致。20 世纪 80 年代以后对胶园生态系统的研究主要集中在养分及养分循环、胶园小气候等方面,而对大气的调节作用方面中日合作在中国儋州市进行了 3a 的定位观测,但其结果在国内未进行报道。深入研究橡胶林的生态系统服务功能能够提高人们对促进橡胶业的可持续发展的认识。

1 中国橡胶林发展概况

橡胶树(*Hevea brasiliensis*)原产于巴西亚马逊河流域的热带丛林。1902 年爱国华侨将其引种到我国云南,1903 年引种到台湾种植,1906 年由何麟书先生引种到海南岛的乐会(今琼海市)。到 1949 年底我国共有橡胶林 2993 hm^2 ,年产量仅 199t。1950 年,西方国家对我国实行封锁禁运,天然橡胶也属于禁运之列。我国国防需要橡胶,国民经济建设和恢复也需要橡胶。在此背景下,原苏联建议中苏合作在中国南方建立天然橡胶生产基地,由苏方提供资金和技术装备,在 3a 内种植橡胶树 20 万 hm^2 。1950 年 8 月广东省组织了几百名专家对海南和雷州半岛的老胶园进行了考察。1951 年国家林业部又组织了全国各大高校及研究单位的千余名专家和技术人员对海南、雷州半岛和广西的部分地区进行了为期半年的考察,为我国橡胶林的发展作好了充分的现状调查。1951 年 8 月中国开始了橡胶产业的大规模创业。经过三代人 50a 的奋斗,到 1999 年底中国橡胶林已发展到 63.12 万 hm^2 (其中国营 38.27 万 hm^2 ,民营 24.85 万 hm^2),橡胶总产达到 49.00 万 t(其中国营 36.20 万 t,民营 12.80 万 t),单位面积产量已从 1949 年的 150kg/ hm^2 ,提高到 1172.25kg/ hm^2 (其中国营 1220.1kg/ hm^2 ,民营 1055.4kg/ hm^2)。中国第一代橡胶林大多是在 20 世纪 50~60 年代在次生林或热带灌丛草地上建立起来的,现在第一代橡胶林已到了大规模更新阶段^[4]。

2 橡胶林对大气的调节作用

橡胶林对大气的调节作用是复杂的多方面的,本文主要探讨橡胶林固定大气 CO_2 及向大气 O_2 释放的调节作用。

2.1 橡胶林对大气 CO_2 的固定

2.1.1 单株橡胶树中 C 的固定 利用标准样木生物量法来进行估算。由于未做专门调查,在本研究中采用了年龄在 27~30a 之间的多个橡胶树无性系的平均值^[2],即单株橡胶树中 C 的平均固定值为 268kg(其中叶、嫩枝、二级和三级枝条、一级枝、主干、根分别为 4、27、43、70、80、44kg)。

2.1.2 单位面积橡胶林 C 的固定 中国橡胶林的初植密度一般为 495 株/ hm^2 ,在进入开割和中龄阶段以后,由于台风、寒害和旱害等自然灾害的影响以及群落中个体橡胶树的竞争所引起的自然稀疏的作用,其单位面积株数平均下降到并稳定在 375 株/ hm^2 左右。由此可以计算出橡胶林 C 的固定值为 90500 kg/ hm^2 (其中国营 81000 kg/ hm^2 ,民营 9500 kg/ hm^2)。由于这是采用标准样木生物量法测定和计算出来净含 C 量的数值,实际上已经排除了在光和作

用过程中的呼吸消耗,因此不用再扣除呼吸作用所释放的二氧化碳。

2.1.3 单位面积橡胶林在经济生命周期里生产干胶所固定的 C 橡胶树的经济生命周期一般从第 6 年开割算起,30 年后开始更新,其经济生命周期为 25a 左右。橡胶树开割初期产量逐年上升,到更新前几年产量逐年下降(但更新前一般采用强割,以拿到更多的产量),中间长达 20a 的时间产量比较稳定。同时橡胶林的产量受多种因素影响,如品种、栽培管理措施、割胶技术、气候条件等。可见根据中国全国的年均产量计算比较合理。1999 年全国干胶产量平均为 1172.25kg/hm²,据测定干胶的平均含 C 量为 88%^[1]。据此,可以计算出单位面积橡胶林在经济生命周期里生产干胶所固定的 C 值为 25789.5kg/hm²。

2.1.4 每年凋落物中固定和返回土壤中的 C 据任泳红等^[15]在西双版纳的测定,橡胶林每年的凋落物(包括叶、枝、果)在 9.07~10.63t/(a·hm²),平均为 9.85t/(a·hm²)。中国的橡胶林生态环境条件比较类似,橡胶树长势也基本一致,所以其每年的凋落物总量采用平均值。另据测定,叶及凋落物的含 C 量为 53.32%^[1]。由此可计算出单位面积凋落物中固定的 C 总量为 5.252t/(a·hm²),每年冬天返回土壤,研究表明,在中国橡胶树叶完全腐烂需 1a 左右。对于一个生命周期为 30a 的橡胶林,其凋落物中固定的 C 有 157.56t/hm²。

2.1.5 单位面积橡胶林在 30a 生命周期中固定 C 的总值 橡胶林在 30a 生命周期中固定 C 的总值为 273.85t/hm²(见表 1),平均为 9.1283t/(a·hm²)。注意其中树干部分的 56.25t 木材在砍伐时被拿走并被下游的家具制造商制成家具,因此这部分 C 将以一种内在形式锁定几十年。相类似的固定在橡胶中的 C 也将被下游的橡胶制品锁定,虽然橡胶制品的生命周期较短,这种 C 的循环释放比木材中的 C 要快。在砍伐时没有被拿走的固定在其他生物量中的 C 达 44.25t(木质部分)和 157.56t 被归还到土壤中,它们在胶树的生命期中是逐年分解的。

2.1.6 单位面积橡胶林的 C 平衡及其与热带雨林的比较 在本文中橡胶林生物量和生产的橡胶中的 C 值是除去呼吸消耗后的净含量。但是枯枝落叶在完全分解进入土壤后要要进行呼吸,其 CO₂ 又重新释放到大气中,因此在考虑单位面积橡胶林的 C 平衡问题时必须扣除土壤呼吸而释放出来的 C^[6~12]。据李意德等对尖峰岭热带山地雨林生态系统的定位研究,土壤释放的(不包括根系的呼吸)CO₂ 量约为 26.96 t/hm²,相当于每年有 7.3527 t/hm²C 又返回到了大气^[13~15]。由此,可以得出单位面积橡胶林每年从大气中固定的 C 为 1.7756t/(a·hm²),相当于热带山地雨林(0.3725 t/(a·hm²))的

4.7 倍,这主要归因于橡胶林的物质生产功能,即割胶生产和木材生产,每年单位面积橡胶林要生产橡胶 1172.25kg/(a·hm²),相当于 1.032t/(a·hm²)的 C 以橡胶制品形式固定;每年有 1/30 的橡胶林需要更新,其树干和一级枝作为木材生产所固定的 C 为 1.875t/(a·hm²),并以木材制品形式锁定。如果扣除这一部分 C,那么橡胶林每年比热带雨林固定的 C 要少 1.5039t/(a·hm²)。

2.2 橡胶林对大气 O₂ 平衡的作用

利用中国现有橡胶林每年对大气 CO₂ 的净固定量换算出中国橡胶林每年所释放出的净 O₂ 总量为 299 万 t。

3 橡胶林对大气调节作用的价值估计

橡胶林对大气的调节作用是橡胶林服务功能的一部分,属于隐形生态资产。对生态系统服务功能的价值估计其实质就是对隐形生态资产的价值进行评估。关于生态资产,它具有多种属性,可以有多种表现形式,如物质质量、能量、资金量、空间值、时间值以及信息量等。本文仅对中国橡胶林每年固定 CO₂ 和 O₂ 释放

表 1 单位面积橡胶林在 30a 生命周期中固定 C 的总值
Table 1 The total value of sequece carbon during 30 year's life cycle for 1 hm² rubber trees

植物器官/组成 Plant Organs/Components	总量(t/ hm ²) Total Value (t/ hm ²)
胶树生物量 Biomass of Rubber Tree	90.5
干枝+一级枝 Stem+Main Branch	56.25
二级、三级枝 Secondary Branches	16.125
根 Roots	16.5
嫩枝 Fresh branch	10.125
叶 Leaves	1.5
生产的橡胶 Produced Rubber	25.79
凋落物 Litter	157.56
合计 Total	273.85

价值作一粗略的估计。

3.1 对 CO₂ 价值的估计

橡胶林 CO₂ 平衡及其分配途径主要有 3 条(图 1),一是由生产胶乳变成橡胶及其橡胶制品,每年为 $R=199$ 万 t;二是通过每年的胶林更新生产的木材及其木制品,每年为 $W=699$ 万 t;三是由枯枝落叶的形式回归土壤,每年为 $L=1216$ 万 t。中国橡胶林每年固定 CO₂ 的总量 $T=R+W+L=2113$ 万 t。但是橡胶林通过土壤呼吸释放返回到大气中的 CO₂ 为 1702 万 t^[13,14]。则中国橡胶林每年的 CO₂ 净固定量为 $T-B=411$ 万 t。

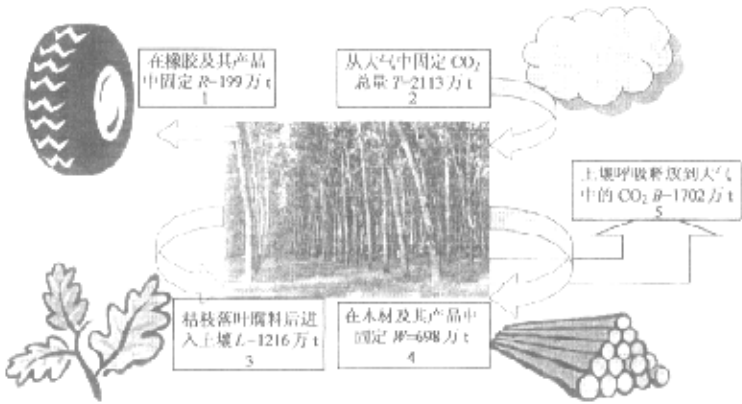


图 1 中国橡胶林 CO₂ 平衡及其分配途径

Fig.1 Annual carbon sequence of rubber plantation ecosystem in China and its distribute approaches

由于它们在 C 循环中的周期长短是不同的,因此在估计橡胶林所固定的 CO₂ 的价值时应该分别计算。据调查,在木材及其木制品中的 CO₂ 将被锁定 50a 以上,在橡胶及其制品中的 CO₂ 被锁定的时间相对较短,平均为 10a 左右,而在枯枝落叶中的 CO₂ 在中国这种热带雨林的气候条件下 1a 即可全部分解而又回到大气,其它元素则回归土壤。因此认为 CO₂ 被锁定的时间越长,其对缓解大气的温室效应的价值就越大,可以认为是一种正比的关系。在考虑所固定 CO₂ 的价值的同时,必须扣除因土壤呼吸而释放并返回大气中的 CO₂ 的价值。因此,其橡胶林固定 CO₂ 的净价值可用如下代数式进行估计:

$$V = P \sum_{i=1}^3 Qi \cdot Yi - P \cdot Sr \quad (i = 1, 2, 3)$$

式中, V 为橡胶林固定 CO₂ 的净价值(万元), Qi 为第 i 种途径 CO₂ 固定量(万 t), Yi 为第 i 种途径 CO₂ 被锁定的年数, Sr 为土壤中释放的 CO₂ 数量(万 t), P 为 CO₂ 的价格。

关于 CO₂ 的价格有人提出用造林成本法,也有人采用碳税法,也有人采用这两种方法再取以平均值。本文认为以采用碳税法比较好,目前瑞士采用的是每吨 C 的价钱是 150 美元^[16,17], 每吨 CO₂ 里面含有碳的量为 273kg, 这样可换算成每吨 CO₂ 的价钱为 40.95 美元(约 339.885 元人民币)。由此将所有数据代入(1)式,得到中国橡胶林每年固定 CO₂ 的净价值为 1238 亿元。平均为 19.6 万元/(a · hm²)。

3.2 对 O₂ 价值的估计

中国橡胶林每年释放 O₂ 的净总量为 299 万 t。在本文中使用工业制氧法可估算出中国岛橡胶林释放 O₂ 的价值。目前氧气工业成本为 400 元/t。则中国橡胶林每年释放 O₂ 的总价值为 12 亿元。平均为 0.19 万元/(a · hm²)。

3.3 50a 来中国橡胶林固定 CO₂ 和释放 O₂ 的累计贡献

中国天然橡胶 1949 年的 0.30 万 hm² 面积和 199t 产量起步,经过 50a 的发展,到 1999 年全国总面积已达到 63.12 万 hm²(列世界第 4 位),总产量达到 49 万 t(列世界第 5 位)。50a 来天然橡胶产业不但为中

国的国民经济发展提供了有力的物质保证,而且也为热带地区的环境保护和缓解大气的“温室效应”作出了巨大的贡献。

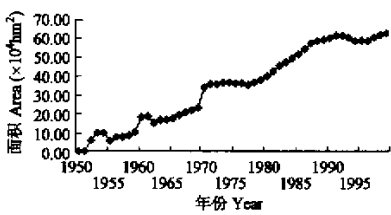


图 2 50a 来中国天然橡胶林面积变化

Fig. 2 Annual area of rubber plantation for last fifty years

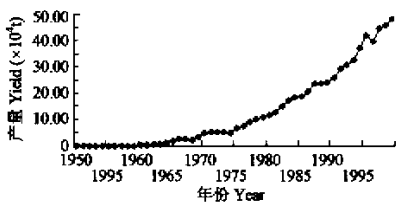


图 3 50a 来中国天然橡胶产量变化

Fig. 3 Annual yield of natural rubber for last fifty years

图 2 和图 3 分别展示了过去 50a 来中国天然橡胶的面积和产量变化情况。从中可以看出中国的天然橡胶发展并不是一帆风顺的,在 20 世纪 70 年代以前的时间中国的天然橡胶产业还是处于一种不断摸索和发展的阶段,面积和产量波动较大。进入到 20 世纪 80 年代以后由于中国摸索出了一套适合中国热带生态环境特点的橡胶树栽培技术,使橡胶树能够在北纬 18~24°范围内大面积种植成功并获得高产,从而使中国的橡胶产业得以持续稳定发展。50a 来在为国家建设提供天然橡胶的同时,也为热带地区的生态环境建设与保护起到了良好的作用。利用以上研究结果对 50a 来中国橡胶林的 CO₂ 净固定量和 O₂ 的释放量进行了估计。

3.3.1 50a 来中国橡胶林的 CO₂ 固定总量估计 用下式估计 50a 来中国橡胶林的 CO₂ 固定总量:

$$Q_c = \sum_{i=1950}^{1999} M_i \cdot S \quad (i = 1950, 1951, \dots, 1999) \tag{2}$$

式中, Q_c 为 50a 来中国橡胶林的 CO₂ 固定总量; M_i 为 1950~1999 年间历年的橡胶林面积; S 为单位面积橡胶林 CO₂ 的净固定量。

从本研究得知单位面积橡胶林 C 的净固定量为 1.7756t/(a · hm²),经换算可得到 CO₂ 的净固定量为 6.5105t/(a · hm²),再将历年的面积代入(2)式即得 50a 来中国橡胶林的 CO₂ 固定总量为 11292 万 t。

3.3.2 50a 来中国橡胶林的 O₂ 释放总量估计 用下式估计 50a 来中国橡胶林的 O₂ 释放固定总量:

$$Q_o = \sum_{i=1950}^{1999} M_i \cdot R \quad (i = 1950, 1951, \dots, 1999) \tag{3}$$

式中, Q_o 为 50a 来中国橡胶林的 O₂ 释放总量; M_i 为 1950~1999 年间历年的橡胶林面积; R 为单位面积橡胶林 O₂ 的净释放量。

从本研究得知单位面积橡胶林的 O₂ 净释放量 4.735 t/(a · hm²),将历年的面积代入(3)式即得 50a 来中国橡胶林的 O₂ 释放总量为 8212 万 t。

4 结论

本研究初步估计出了中国橡胶林单位面积 CO₂ 净固定量为 6.5105t/(a · hm²), O₂ 释放量为 4.735 t/(a · hm²);并用碳税法 and 工业制氧成本法分别估计出了目前中国橡胶林固定 CO₂ 和释放 O₂ 的价值为 1238 亿元(平均为 19.6 万元/(a · hm²))和 12 亿元(平均为 0.19 万元/(a · hm²))。与热带山地雨林比较,由于橡胶林每年要从系统内输出大量的橡胶,故其单位面积橡胶林固定大气 CO₂ 的能力是热带山地雨林的 4.7 倍。如果扣除橡胶中固定的 C,那么橡胶林比热带雨林固定的 C 要少 1.5039t/(a · hm²),因为橡胶林毕竟是单纯的人工林。通过对 50a 来中国橡胶林固定 CO₂ 和释放 O₂ 的总量进行了估计,其值分别为 11292 万 t 和 8212 万 t。

5 讨论 万方数据

(1)关于橡胶林对大气 CO₂ 固定和释放 O₂ 的估计问题 在此以前国内一些学者对森林的 CO₂ 固定和

O₂ 的释放多采用尽生长量法,再根据光合作用的原理换算成 CO₂ 和 O₂ 的数量,基本上忽略了林产品及次生产品,如果实与枯枝落叶等。笔者认为这对于在未掌握充分资料的情况下,不失为一种比较合理的方法,然而这种估计方法对 CO₂ 和 O₂ 的低估是显而易见的。橡胶林作为一种高度集约经营的人工林,在不遇到大的自然灾害的情况下,其密度基本上是不变的;而且橡胶林不但可以提供木材,更重要的是还要进行橡胶生产,即每天还要从橡胶树中输出大量的胶乳,这也是光合作用的重要产物,是不能忽略的;另外,橡胶林作为一种典型的热带季雨林,其枯枝落叶量高达 10t/(a·hm²) 以上,其含碳的数量巨大。所以,本研究充分考虑森林的中间产品和次生产品在內,对于比较准确和合理估计橡胶林对大气 CO₂ 固定和 O₂ 的释放来说是一种很好的方法,所得到的结果是比较合理的。

(2)关于橡胶林对大气 CO₂ 固定和释放 O₂ 的价值量估计问题 本文采用的是碳税法 and 工业制氧成本法来推导出他们的价值,其总价值为 1250 亿元,相当于中国橡胶林的直接产品(橡胶和木材)价值(44.15 亿元)的 28.7 倍。就价值量的估算方法而言,目前国内许多学者认为是比较合理的,然而国内的学者在计算时未考虑森林在固定 CO₂ 后的循环途径及其被锁定的时间长短,本文认为不同的途径和不同长短的循环时间,对锁定的 CO₂ 的价值应该是不同的。在本研究中构建了 $V = P \sum_{i=1}^3 Q_i \cdot Y_i - P \cdot S_r$ 这样一个线性方程式,这在一定程度上比以前的估计方法要合理得多,但是,也存在不尽人意的地方,即 CO₂ 在其锁定的时期内其价值始终一样,而实际上它的价值应该随着时间的推移而变化。

(3)橡胶林不只是一种纯粹为了生产橡胶和提供木材的经济林,它在调节大气温室效应方面的服务功能是非常强大的,这为今后大力发展橡胶林提供了有利的生态证据。同时,在森林生态系统(如橡胶林)的 C 平衡中,它的 C 库主要就是生物活的有机体及其收获的中间产品(如橡胶),而过去将土壤作为生态系统的长期的 C 库,认为对稳定全球大气 CO₂ 浓度具有重大作用,但从本文的研究结果来看不太可能,从表 1 可见 57.53% 的 C 在凋落物里,它们很快分解进入土壤参与土壤呼吸并释放回到大气,其数值(在本文和热带雨林为 7.3527 t/(a·hm²))几乎接近生态系统从大气中所固定的 C,要不是中间产品(本文中的木材和橡胶)所固定的 C 每年从系统内转移到系统外,森林生态系统的 C 平衡实际上就会出现“赤字”。可见在森林生态系统中将土壤作为 C 库并认为在全球 CO₂ 平衡中发挥巨大作用是不太可能的。这一结论也进一步证实了 Willam 和 John^[18] 在《Nature》杂志上所公布的研究结果。

(4)关于橡胶林取代天然植被后的生态服务功能问题 中国的橡胶林是在热带灌丛草地、次生林和雨林上发展建立起来的人工林,其生态服务功能则不同于天然林,例如在固定大气 CO₂ 的功能方面,如果考虑橡胶林每年的中间产品(橡胶和木材)向外输出并锁定的 C,其功能不但没有降低,反而增强了。按全国现有胶林面积 63.12 万 hm² 计算,每年则要多固定 CO₂ 323.81 万 t,当然,如果时间继续往前推移的话,这种多固定的 CO₂ 将随着固定在橡胶制品和木材制品中的 C 的逐渐在别的地方释放而失去其功能优势,可见橡胶林(或森林)的固定 CO₂、缓解“温室效应”的作用只能是短期的、有限的;如果不考虑橡胶林每年的中间产品(橡胶和木材)向外输出并锁定的 C,则其固定大气 CO₂ 的功能比热带雨林要弱的多。由于橡胶林是高度集约经营的人工林,在其它服务功能方面则会有所减弱,如生物多样性、涵养水源、抗干扰能力等方面有不同程度的下降。橡胶林(或其他人工林)的经济生产功能是以牺牲部分生态服务功能而换来的。

参考文献

- [1] Naimah I, Zainol E and Yoon P K. Rubber; A social economic environment-friendly (SEE) industrial products. *Third World Organization of Women Scientist Conference*, Cairo, Egypt, 1992.
- [2] Sivakumaran S and Yew F K. Carbon Sequestration in Rubber; Implication and Model to Fund Continued Cultivation. *IRRDB*, Bogor-Indonesia, 12~14 Sept., 2000.
- [3] Jiang J S(蒋菊生). Research progress for rubber ecosystem. *Sciences of Tropical Crops(热带作物科学)*, 1997, 5: 56~65.
- [4] He K(何方数据) Z D(黄宗道) ed, *Rubber culture in the northern part of tropical area*(in Chinese). Guangdong Science & Technology Press, 1980. 1~6.

[5] Ren Y H(任泳红),Cao M(曹敏),Tang J W(唐建维), *et al.* A comparative study on litter fall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna. *Acta Phytoecologica Sinica* (in Chinese)(植物生态学报), 1999, **23**(5):370~378.

[6] Liu G H(刘国华),Fu B J(傅伯杰),Fang J Y(方精云). Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报),2000,**20**(5): 733~740.

[7] Jiang Y X(蒋有绪), Lu J P(卢俊培)ed. *Tropical forest ecosystem of Jianfengling, Hainan Island, China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1991. 82~120.

[8] Wu Z M(吴仲民), Zeng Q B(曾庆波), Li Y D(李意德), *et al.* A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soil in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytoecologica Sinica* (in Chinese)(植物生态学报), 1997, **21**(5):416~423.

[9] Wu Z M(吴仲民), Li Y D(李意德), Zeng Q B(曾庆波), *et al.* Carbon pool of tropical mountain rain forest in Jianfengling and effect of clear-cutting on it. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese)(应用生态学报), 1998, **9**(4): 341~344.

[10] Huang C C(黄承才),Ge Y(葛滢),Chang J(常杰), *et al.* Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the East Mid-subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报),1999,**19**(3):324~328.

[11] Jiang Y L(蒋延玲),Zhou G S(周广胜). Estimation of ecosystem services of major forest in China. *Acta Phytoecologica Sinica*(in Chinese)(植物生态学报), 1999, **23**(5):362~369.

[12] Guan D S(管东生). A study on the factors of affecting preliminary productivity and its predicted model for vegetation of South China. *Ecological Science* (in Chinese)(生态科学),2000,**19**(4):11~15.

[13] Li Y D(李意德), Wu Z M(吴仲民),Zeng Q B(曾庆波), *et al.* A preliminary research on the carbon balance of tropical rain forest ecosystem in Jianfengling. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报),1997, **17**(1):45~52.

[14] Li Y D(李意德),Wu Z M(吴仲民), Zeng Q B(曾庆波), *et al.* Estimation of community productivity and net CO₂ accumulation of a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytoecologica Sinica* (in Chinese)(植物生态学报), 1998, **22**(2): 127~134.

[15] Li Y D(李意德),Wu Z M(吴仲民),Zeng Q B(曾庆波), *et al.* Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报),1998,**18**(4): 371~378.

[16] Zhao J Z(赵景柱),Xiao H(肖寒),Wu G(吴刚). Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services. *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese)(应用生态学报),2000, **11**(2):290~292.

[17] Xiao H(肖寒),Zhao J Z(赵景柱),Ouyang Z Y(欧阳志云), *et al.* Forest ecosystem services and their ecological valuation——A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan Island. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese)(应用生态学报),2000, **11**(4):481~484.

[18] Willam H S and John L. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2001,(411) :466~469.