

森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用

方运霆,莫江明*,彭少麟,李德军

(中国科学院华南植物研究所,广东肇庆鼎湖山树木园 526070)

摘要:研究了鼎湖山南亚热带森林同一演替系列中 3 个不同演替阶段(马尾松针叶林、马尾松荷木混交林和季风常绿阔叶林)生态系统碳贮量和分配格局特征,并探讨了该地区森林演替过程中生态系统碳吸存潜力和速度。结果表明:(1)针叶林各组分碳素含量高于阔叶林对应组分的碳素含量(后者是前者的 72.0%~94.5%)。两个森林植物碳素含量,不同层次比较,均为乔木层>灌木层>草本层,不同器官比较,以根或干最高。(2)乔木层生物量随森林演替进展而增加。针叶林、混交林和阔叶林乔木层生物量分别为:143.5 t/hm²、270.1 t/hm²和 407.8 t/hm²,其中大部分由干和皮组成(各器官占乔木层生物量的比例平均为:叶 2.8%、枝 19.3%、干和皮混合 57.0%、根 20.9%)。林下层生物量为 4.23~14.10 t/hm²,是乔木层的 1.0%~9.8%,随森林演替进展而减少。(3)土壤容重随深度增加而增加,但随森林演替进展而减少。与土壤容重相反,土壤有机碳含量随深度增加而明显减少,但随森林演替进展而增加。(4)3 种类型森林生态系统碳总贮量分别为 135.8 t/hm²、215.1 t/hm²和 259.7 t/hm²。生态系统碳贮量在各组分的格局十分相似,植被、土壤和凋落物层所占比例均分别约为 67.6%、30.2%和 2.2%。与其它地带森林比较,鼎湖山保护区森林植被与土壤碳贮量之比和表层(0~20cm)的土壤碳占整个土层比例都较高。(5)南亚热带生态系统碳吸存潜力随森林演替进展增长巨大。针叶林发展到混交林,生态系统碳吸存量为 79.3 t/hm²,演替到阔叶林则为 123.9 t/hm²,其中大部分分配在植被层(67.0~69.5%)。其中针叶林演替到混交林过程中,植被碳吸存速度为 0.83~7.37 t/(hm²·a),平均 2.48 t/(hm²·a)。

关键词:森林演替;碳贮量;碳吸存;南亚热带;鼎湖山

Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical China

FANG Yun-Ting, MO Jiang-Ming*, PENG Shao-Lin, LI De-Jun (South China Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Zhaoqing, Guangdong 526070, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1685~1694.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30270283);中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目;中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目;广东省自然科学基金资助项目(021524)

收稿日期:2003-03-25;**修订日期:**2003-07-10

作者简介:方运霆(1976~),男,博士生,主要从事森林生态系统 C、N 循环及其与全球变化关系研究。

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: mojm@scib.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30270283); Director Foundation of South China Institute of Botany, CAS; Field Frontiers Project of CAS Knowledge Innovation Program; and the Provincial Natural Science Foundation of Guangdong, China (No. 021524)

Received date: 2003-03-25; **Accepted date:** 2003-07-10

Biography: Fang Yun-Ting, Ph. D. candidate, Research field: carbon and nitrogen cycling in forest ecosystems and their relationships with global changes.

Abstract: There is the potential to reduce carbon sources and increase carbon sinks from management of the world's forests. Carbon emissions from forests can be reduced by protecting and conserving the carbon pools in existing forests. Carbon sinks can be created by expanding carbon storage capacities through increasing the area and/or carbon density of native forests, plantations and agroforests. With the implement of Natural Forest Protection Program and Forest Reservation Project in the near future, it can be predicted that Chinese forest ecosystems will act as a huge carbon sink. However, there is little information available about carbon sequestration on forest ecosystems, especially on forest ecosystems of subtropical China.

This research was conducted in Dinghushan Biosphere Reserve (DHSBR), which is located in lower subtropical China. There are mainly three types of forest, including Pine Forest (PF), Pine and Broadleaf Mixed Forest (PBMF), and Monsoon Evergreen Broadleaf Forest (MEBF), which represent three stages of a series of forest succession. The carbon storage and its distribution pattern in these forest ecosystems were studied, and the potential, rate and allocation of carbon sequestered by forest ecosystems based on this study were also discussed in this paper. Results showed as follows:

(1) The mean carbon concentrations of vegetation decreased with the development of PF ecosystem. Carbon concentrations for plant organs except for leaves were generally 20 percent higher in PF than those in MEBF. Both PF and MEBF, carbon concentrations were significantly higher in tree layer than those in other layers comparing with different layers, and generally highest in root or branches comparing with different organs.

(2) Biomass of trees in the studied forests increased with development of forest succession, and was estimated to be: 143.5t/hm² (PF), 270.1t/hm² (PBMF) and 407.8t/hm² (MEBF). This biomass was mostly distributed in the component of stem and bark. The percentages of different organs accounted for tree biomass were: 57.0% stem and bark, 20.9% root, 19.3% branch, 2.8% leaves, respectively. Biomass of understory plant was 4.23~14.10t/hm², decreasing with development of forest succession. Similar to biomass of understory, standing stock of litters on the forest floor decreased with development of forest succession, ranging from 3.92 to 10.91t/hm².

(3) Soil bulk density was 0.86~1.54g/cm³, and increased generally with depths (1.07g/cm³, 1.25g/cm³, 1.30g/cm³ and 1.30g/cm³ for 0~10cm, 10~20cm, 20~40cm and 40~60cm soil depth, respectively) in all forests. Soil bulk density in all levels of soil depths in PF were similar to those in PBMF, however, in both forests they were higher than those in MEBF. Soil carbon concentrations in all forests decreased with soil depths (2.23%, 1.13%, 0.71% and 0.49% for 0~10cm, 10~20cm, 20~40cm and 40~60cm soil depth, respectively) and exhibited in the following order: MEBF > PBMF > PF.

(4) The total carbon storage of three forest ecosystems was estimated to be: 135.8t/hm² (PF), 215.1t/hm² (PBMF) and 259.7 t/hm² (MEBF), of which 67.6 percent was contributed by vegetation, 30.2 percent by soil, and only 2.2 percent by standing litters on the floor. Comparing with other similar forests, the carbon storage in vegetation was relatively higher in the studied forests, the carbon storage in soils, however, was relatively lower in the studied forests. The ratio of vegetation carbon to soil carbon in these forests was very high (2.24), comparing with the average value for Global forest and Chinese forest (0.46 and 0.36, respectively). In addition, the proportion of carbon storage in the upper 20cm soil to that in the whole soil in the studied forests was also higher, comparing with the average value for Global forest and Chinese forest.

(5) The carbon sequestration increased significantly with development of forest succession in lower

subtropical China. Carbon storage would increase by 58 percent (from 135.8t/hm² to 215.1t/hm²), if PF developed to PBMF through succession, and would increase by 91 percent (from 135.8t/hm² to 259.7 t/hm²), if developed to MEBF. In Dinghushan forests, the rate of carbon sequestration increment was estimated ranging from 0.83 t/(hm² · a) to 7.37 t/(hm² · a), with a mean value of 2.48 t/(hm² · a), during the period from PF to PBMF through succession.

Key words: forest succession; carbon storage; carbon sequestration; lower subtropical China

文章编号:1000-0933(2003)09-1685-10 中图分类号:Q948,S718.55 文献标识码:A

近代,由于石化燃料大量使用和土地利用变化的原因,大气中的 CO₂ 浓度已由工业革命前之 280ml/L 上升到现在的 360ml/L,而且目前每年仍以 0.5ml/L 的速度快速增加。预计未来 100a 这种趋势将会继续,甚至可能变得更为强烈^[1~4]。CO₂ 在大气层中的积累引发了全球变暖、降水格局改变和海平面上升等系列全球性问题,在威胁着全球生态环境和人类自身生存与发展,因而引起国际社会普遍关注^[1~4]。为了使大气 CO₂ 含量稳定在目前的水平,需要大幅度地减少其排放量(约降低 60%或更多),这也是世界各国已达成的共识和面临的主要挑战之一^[-5]。一些国家已开始研究和实施如何减少温室气体的排放,从而减缓全球大气 CO₂ 浓度上升及其伴随的全球变暖速度^[3~6]。

森林生态系统在维护区域生态环境和全球碳平衡方面均起着极其重要的作用^[3~5]。森林植物光合作用过程中吸收大气 CO₂,因此在一定程度上可通过森林管理来降低大气 CO₂ 浓度。这些森林碳减排管理措施主要有 3 种:(1)减少采伐森林、改变现有的采伐体制和保护森林,以保存现有的森林碳库;(2)增加天然林、人工林、农林复合林的面积和(或)碳密度以扩大碳库^[3~5];(3)把生物积累的碳转化为生物燃料以替代石化燃料或长寿命的木材产品以转移碳库。研究认为 1995~2050 年全球森林植被保存和吸收碳的潜力可达 60~87 Pg C,可以吸收同期经济正常发展情况下石化燃料排放碳的 11%~15%^[1, 3~5]。因而实施通过森林管理把大气中的碳积累在森林生态系统中的措施,在全球减缓碳排放的策略中有重大现实意义。我国目前和未来 50a 大力进行的封山育林、天然林保护工程、公益林和人工林基地建设工程,将有利于我国森林生态系统总碳贮量的提高^[7~10]。因此,不难预测未来 50a 里,我国森林生态系统也将是一个重要的碳汇,遗憾的是目前还没有研究能用数字来说明我国森林未来的碳汇功能的大小和分布情况。

当人为干扰停止后,森林会趋向于恢复到受破坏前的原生状态。在此过程中,随着生态系统的物质生产,其碳贮量不断提高。这种碳积累方式属于上述森林碳减排管理的第二种。南亚热带次生演替一般遵循针叶林到针阔混交林再到阔叶林的规律,在鼎湖山保护区具体表现为马尾松(*Pinus massoniana*)针叶林→马尾松荷木(*Schima superba*)针阔混交林→季风常绿阔叶林^[11]。鼎湖山保护区由于地理、历史和社会文化等原因,不但较好地保存了具 400a 历史的地带性植被类型——南亚热带常绿阔叶林,而且在周围分布着马尾松针叶林和马尾松、荷木针阔混交林等森林类型^[12]。自 1956 年保护区建立以来,不少生态学家对鼎湖山森林生物量和生产力进行了研究^[13~15],但是目前我国对区域性尤其是南亚热带的森林碳循环的研究仍然十分薄弱。前期,为揭示南亚热带主要类型森林生态系统碳循环规律,分别报道了鼎湖山主要类型森林生态系统碳贮量和分配特征^[16~18]。鼎湖山保护区完好的顶级植被类型、针叶林和混交林在过去 50a 来植物种组成变化及其坚实研究基础为分析南亚热带森林演替过程中生态系统碳吸存提供了良机。本文在过去研究基础上,分析了鼎湖山保护区马尾松针叶林、针阔混交林和季风常绿阔叶林生态系统碳贮量和分布特征,探讨南亚热带森林演替过程中生态系统碳吸存速度和潜力,为我国区域森林生态系统碳贮量的估算提供数据支持,为评价我国南亚热带森林碳汇功能贡献及其森林资源管理等提供素材。

1 样地概况

鼎湖山国家级自然保护区始建于 1956 年,位处广东省肇庆市东北郊,东经 112°33',北纬 23°10',总面积约为 1155hm²。保护区气候具有明显的季风性,年平均降雨量为 1927mm,其中 75%分布在 3 月到 8 月份,而 12 月降雨量仅占 6%。年平均相对湿度为 80%。年平均温度为 21.4℃,最冷月(1 月份)和最热月(7 月份)的平均温度分别为 12.6℃和 28.0℃^[19]。

本研究样地为鼎湖山自然保护区马尾松针叶林、马尾松阔混交林和季风常绿阔叶林永久样地。这些样地分别于 1978 年(混交林和阔叶林)和 1990 年(针叶林)严格遵照生态学原则设计建立,它们具有相同或相似的海拔高度、土壤类型和坡向。有关南亚热带森林演替的理论研究大部分都在这些样地里进行。

针叶林样地位于保护区东南角缓冲带,坡度约 25°,海拔 150~300m。森林由政府林场于 1930~1950 年间营造,在过去(1964~1990 年期间)允许当地农民砍小树和收割林下层作为薪柴。林下层植物稠密,以桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、岗松(*Baechea frutescens*)等为优势。样地的母岩为沙岩,土壤为砖红壤性红壤,pH 值 3.99~4.07,土层深度一般较浅(30~70cm)^[20, 21]。混交林在保护区的缓冲带旱坑山脊处。坡度约 30°,海拔 300m。森林起源于 20 世纪 30 年代营造的马尾松林,因得到良好保护,荷木、锥栗(*Castanopsis fissa*)和黎蒴(*Castanopsis chinensis*)等阔叶树种逐渐入侵而成^[12]。群落结构较为简单,乔木Ⅰ层为马尾松,Ⅱ层主要种为荷木,更新层及灌木层为荷木、变叶榕(*Ficus variolosa*)、三叉苦(*Evodia lepta*)、豺皮樟(*Litsea rotundiflora*)和桃金娘等植物种。地形起伏较大,母岩为砂页岩,土壤为赤红壤,pH 3.79~3.92,土层也较薄(40~70cm)^[18]。阔叶林样地为季风常绿阔叶林永久样地,位于三宝峰东北坡,海拔 250~350m,坡度 26~30°。该群落是南亚热带常绿阔叶林代表性类型,保存较完好,已有 400 多年的保护历史。森林植物种类丰富,主要为锥栗、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)。结构复杂,垂直结构可分为 7 层,即乔木 4 个亚层、幼树灌木层、草本苗木层和层间植物层。层间植物主要为木质藤本植物和少量的附生植物。土壤为砂页岩发育的赤红壤,pH 3.76~3.81,土层厚(30~90 cm)^[12, 14, 15, 20]。

2 研究方法

2.1 植物组成和群落结构

2001 年 10 月分别调查针叶林(20 个 10m×10m 样方)和混交林(8 个 10m×10m 样方)里乔木层植物个体的冠覆、胸径和高度。马尾松种群年龄结构根据回归模型推算^[21]。混交林的马尾松个体的年龄、树高和胸径平均值均高于针叶林,但密度明显低于针叶林,充分反映出森林演替的发展过程(表 1)。

表 1 鼎湖山保护区马尾松林和混交林乔木层群落结构一些参数

Table 1 Indices of the structure of Pine Forest and Mixed Forest in DHSBR											
样地 Plot	树种 Species	年龄 Age (a)			胸径 DHB (cm)			树高 Height (m)			乔木密度 Stem density (tree/hm ²)
		范围	平均值	标准误	范围	平均值	标准误	范围	平均值	标准误	平均值
		Range	Mean	S. E.	Range	Mean	S. E.	Range	Mean	S. E.	Mean
针叶林 Pine Forest	马尾松*	13~75	39	1.43	5.5~35.1	18	0.66	4.2~16.2	8.6	0.3	515
混交林 Mixed Forest	马尾松*	30~79	61	4.4	17.0~37.1	28.3	2.09	11.5~19.5	14.4	0.93	125
	荷木**				2.2~24.8	8.7	0.76	2.6~16.5	7.0	0.47	725

针叶林和混交林的调查样地面积分别为 2000m² 和 800m² Area of plot in Pine Forest and Mixed Forest was 2000 and 800m², respectively; * *Pinus massoniana*, ** *Schima superba*. S. E. Standard error

2.2 植物体和地表凋落物碳素含量

分层分种采集阔叶林和针叶林植物样品。阔叶林分乔木层、灌木层、草本层和层间植物(主要是藤本),其中乔木层又分 4 个亚层(按高度分:Ⅰ>20cm、Ⅱ15~20m、Ⅲ10~15m、Ⅳ5~10m)。针叶林分乔木层、灌木层和草本层,其中乔木层 2 亚层(Ⅰ5~10m、Ⅱ10~15m)。乔木分根、干、枝、皮和叶,灌木层分根、枝、干和叶,草本层分叶+干和根(针叶林)或根、叶、茎(阔叶林)。另在林内设置 10 个 1m×1m 的尼龙网以收集凋落物。地表现存凋落物层分未分解(新近凋落的凋落物)和半分解层(难于手捡的凋落物)采样。所有植物样品烘干,磨粉。阔叶林样品 117 个,其中植物 189 个,凋落物 22 个,地表现存凋落物 6 个。针叶林样品 63 个,其中植物 105 个,凋落物 5 个,地表现存凋落物 6 个。样品共计 280 个。有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法(外加热)测定,结果以 105℃恒重为基准^[22]。

因混交林绝大部分植物种在针叶林或阔叶林里出现,本文混交林碳素含量取两种森林类型其相应的平均值。

2.3 植被生物量

本研究中生物量仅指一定面积上某个时间存在着的活体生物量^[23],不包括地表现存凋落物层。针叶林和混交林乔木层中各树种的生物量采用回归模型计算,其中马尾松和荷木的回归模型分别来自文献^[13, 18]。在混交林中还分布有其它的乔木层树种,对其生物量的计算方法是先全收获 8 株植株,建立相对生长关系式: $W=a(D)^b$, a 、 b 为参数, D 为胸径,然后以此关系式计算其它所有树种的生物量^[18]。由于阔叶林为地带性顶级群落,生物量相对稳定,但彭少麟等^[14]和温达志等^[15]对其生物量的研究结果略有不同,本文取两者的平均值。在针叶林和混交林样地里随机设置 4 个 1m × 1m 小样方,全收获以获得林下灌木和草本植物以获得其植物生物量。阔叶林数据引自文献^[14, 15]。

2.4 地表凋落物现存量

在收割其灌木层和草本层植物后接着收集地表现存凋落物,回实验室烘干,换算为每公顷的量。现存凋落物分未分解层、半分解两层,结果以 105℃ 恒重为基准。

2.5 土壤容重和有机碳含量

保护区森林土壤厚度在 30~80cm 间,平均约 60cm,深层(>40cm)土壤有机碳含量普遍较低,而且不同植被类型相差较小^[16~18],另外考虑到森林随着演替其土层厚度不会发生变化,本研究分析土壤碳贮量只考虑 0~60cm。研究时,在样地随机选择 5 个采集点,挖 0~60cm 深的剖面,然后每个土壤剖面按 4 个层次(0~10cm、10~20cm、20~40cm 和 40~60cm),采用土壤环刀法测定各层土壤容重。所有土壤样品风干磨细后重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量^[23]。

2.6 生态系统碳贮量的计算

植被和地表现存凋落物碳贮量以其生物量或现存量乘以其碳含量计算得到,土壤碳贮量则是土壤有机碳含量、土壤容重和土壤厚度三者的乘值。

3 结果和分析

3.1 植被各组分碳素含量、生物量和碳贮量特征

3.1.1 碳素含量 针叶林和阔叶林两类型森林植物碳素含量具有以下特点(图 1):

(1)植物各器官不同其碳素含量不同,但其差异因林分和层次不同而异。在阔叶林,所有层中植物各器官碳素含量的差异均不明显(乔木各亚层、灌木层和草本层各器官的最大与最小的比值分别为 1.07、1.03 和 1.08)。然而,针叶林植物各器官碳素含量差异则十分明显(乔木各亚层、灌木层和草本层依次为 1.36、1.11 和 1.11)。两个森林类型各器官碳素含量,乔木层以根或干最大,叶或皮最小,其它层则基本上以叶最高。

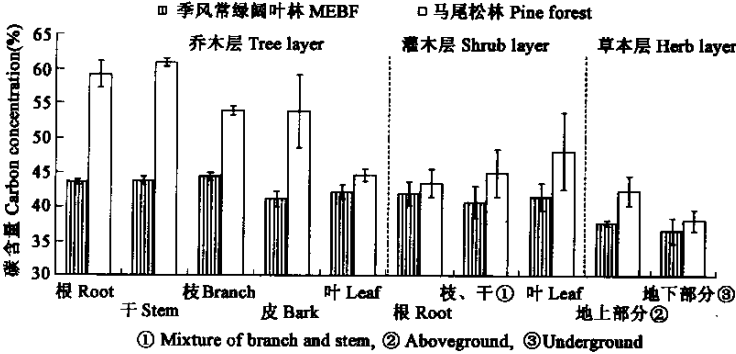


图 1 马尾松林和季风常绿阔叶林各层植物碳素含量

Fig. 1 Carbon concentration of plants in Pine Forest and Monsoon Evergreen Broad-leaved Forest (MEBF) in Dinghushan Biosphere Reserve (DHSBR)

(2)层次不同碳素含量不同,基本上表现为乔木层 > 灌木层 > 草本层,其差异随森林类型和器官不同而异。阔叶林不同层间各器官总平均值呈现:乔木层略高于灌木层,但显著高于草本层和藤本($p<0.05$),乔木各亚层间、以及灌木层、草本层和藤本植物之间差异均不显著。针叶林则表现为:乔木层 > 灌木层 > 草本层 ($p<0.05$)。就根、枝和干器官碳含量的比较,阔叶林仅草本层显著低于其它层次($p<0.05$),而针叶林则与其各器官总平均值符合:乔木层 > 灌木层 > 草本层($p<0.05$);叶的碳含量比较,两类型各层间的差异均不显著。

(3)森林类型不同,植物碳素含量不同。针叶林各组分高于阔叶林相对应的各组分,其中以乔木层各器官表现得尤为明显,后者只有前者的 72.0%~94.5%。从两类型森林植物碳素含量的差异来看,本研究显示出针叶林演替到阔叶林,整个生态系统植物体的碳素含量逐渐下降。

3.1.2 生物量 到调查时,混交林乔木层的生物量为 276.40 t/hm²,是针叶林的 1.9 倍,是阔叶林的 67.8%(表 2)。可见,混交林乔木层的有较高的生物量。各器官对乔木层生物量的贡献不同,干和皮混合贡献最大(51.3%~63.3%,平均 57.0%),枝、根的贡献较为接近(分别为 17.3%~21.7%和 17.0%~24.9%,平均 19.3%和 20.9%),叶子贡献最小(2.1%~3.9%,平均 2.8%)。由针叶林经混交林发展到阔叶林,阔叶树种增多,各器官生物量的比例发生不同变化,其中叶片表现为先增加后减少,枝和根表现为增加,而干和皮混合逐渐减少(表 2)。

表 2 鼎湖山保护区森林植物碳含量、生物量和碳贮量

	碳素含量 Carbon concentration			生物量 Biomass (t/hm ²)			碳贮量 Carbon storage		
	(%)						(t/hm ²)		
	针叶林 Pine forest	混交林 Mixed forest	阔叶林 Broad-leaved forest	针叶林 Pine forest	混交林 Mixed forest	阔叶林* Broad-leaved forest	针叶林 Pine forest	混交林 Mixed forest	阔叶林 Broad-leaved forest
乔木层 Tree layer									
叶 Leaves	44.6(1.92)	43.4(0.96)	42.2(0.91)	3.46	10.80	8.70	1.54	4.69	3.67
枝 Branches	54.0(0.56)	49.1(0.60)	44.2(0.63)	24.84	52.48	88.55	13.40	25.76	39.14
干 Stem	60.8(0.58)	52.3(0.60)	43.8(0.58)	81.90	143.79	209.12	49.80	75.20	91.59
皮 Bark	53.9(5.22)	47.5(3.15)	41.2(1.09)	8.93	12.09		4.81	5.75	
根 Root	(59.12.03)	51.4(1.15)	43.7(1.92)	24.40	57.24	101.46	14.43	29.43	44.34
小计 Subtotal				143.53	276.40	407.82	83.98	140.82	178.74
林下层 Understory layer									
地上部分 Aboveground	44.4(3.74)	43.7(2.66)	43.0(1.77)		8.94	4.78		3.97	2.09
地下部分 Underground	40.8(1.79)	40.9(1.78)	41.0(1.58)	5.16	2.76		2.10	1.13	
小计 Subtotal				14.10	7.54	4.23	6.08	3.22	1.78
总计 Total				157.63	283.94	412.05	90.06	144.04	180.52

* 生物量数据来自文献^[14~15] Data of biomass for Broad-leaved forest from references^[14~15]; 括号里为标准误差 Standard error in parenthesis

林下层植物生物量为 4.23~7.54 t/hm²,是其乔木层的 1.0%~9.8%,随森林演替进展逐渐减少。这是因为随森林演替,林冠逐渐密集,林下光照减弱,林下层植物开始减少。

3.1.3 碳贮量 3 种类型森林的乔木层碳贮量,阔叶林最高(178.74 t/hm²),分别是针叶林和混交林的 2.2 倍和 1.3 倍(表 2)。乔木层碳贮量中,各器官所占的比例为:叶 1.8%~3.3%,平均 2.4%;枝 16.0%~21.9%,平均 18.7%;干和皮混合 51.2%~65.0%,平均 57.9%;根 17.2%~24.8%,平均 21.0%。可见,乔木层碳贮量在各器官分配比例与乔木层生物量在各器官的分配比例十分相似。整个植被层碳贮量分别为 90.06~180.52 t/hm²,其中乔木层占 91.0%~99.0%,林下层植物仅占 1.0%~9.0%。随森林演替,乔木层植物的碳贮量比例增大,而林下层减少(表 2、3)。

3.2 地表凋落物碳素含量、现存量和碳贮量

地表凋落物碳素含量为 41.58%~57.78%,针叶林高于阔叶林。3 种类型森林地表凋落物量平均为

7.30 t/hm²,最大(10.91t/hm²)是最小(3.92t/hm²)的 2.8 倍。地表现存凋落物碳贮量为 1.60~5.89 t/hm²,其中未分解部分所占比例依次为 47.6%、64.5%和 33.4%。相比之下,阔叶林未分解部分比例较低(表 3)。随森林演替,地表凋落物层现存量和碳贮量的变化与其林下层生物量表现趋势相同,逐渐减少,可能与其凋落物量和分解速率有关。

表 3 鼎湖山保护区森林地表凋落物碳素含量、现存量和碳贮量

	碳素含量 Carbon concentration (%)			现存量 Standing stock (t/hm ²)			碳贮量 Carbon storage (t/hm ²)		
	针叶林 Pine forest	混交林 Mixed forest	阔叶林 Broad-leaved forest	针叶林 Pine forest	混交林 Mixed forest	阔叶林 Broad-leaved forest	针叶林 Pine forest	混交林 Mixed forest	阔叶林 Broad-leaved forest
未分解 Fresh	57.78	48.70	39.62	4.86	4.48	1.35	2.81	2.18	0.53
半分解 Decomposing	51.02	46.30	41.58	6.05	2.59	2.57	3.09	1.20	1.07
合计 Total				10.91	7.07	3.92	5.89	3.38	1.60

3.3 土壤容重、有机碳含量和碳贮量

3.3.1 土壤容重 3 种类型森林土壤容重为 0.86~1.54g/cm³。0~10cm、10~20cm、20~40cm 和 40~60cm 4 个层次依次平均为 1.07 g/cm³、1.25 g/cm³、1.30 g/cm³、1.30 g/cm³,总平均为 1.23 g/cm³。另外,图 2 还反映出,除混交林外,土壤容重随深度增加而增加,但森林类型不同其变化趋势不同,其中阔叶林各层依次增加的趋势最明显。土壤容重是反映土壤物理结构的一个重要指标。混交林没有出现随深度增加而增加的趋势,可能是因为混交林样地原有的阔叶林被砍伐后栽种马尾松的行为主要改变了 0~40cm 这段土层结构,但随着植被得到保护,0~10cm 土层结构最先开始好转。不同森林类型比较,土壤容重呈现针叶林 > 混交林 > 阔叶林的规律(阔叶林分别是针叶林和混交林的 65.2%~74.8%和 72.8%~92.2%)。

3.3.2 土壤碳含量 土壤碳含量与其土壤容重相反,随深度增加明显减少(图 2)。0~10cm、10~20cm、20~40cm 和 40~60cm 碳含量平均值分别为:2.23%、1.13%、0.71%和 0.49%,0~10cm 土层是 10~20cm、20~40cm 和 40~100cm 的 2.0、3.1 和 4.6 倍。各层土壤有机碳含量表现为针叶林 < 混交林 < 阔叶林(针叶林和混交林分别是阔叶林的 24.7%~36.6%、41.6%~72.2%,图 2)。与阔叶林比较,针叶林和混交林 0~10cm 土层土壤碳含量比其它土层高得多。

3.3.3 土壤碳贮量 与土壤碳含量一样,3 种类型森林土壤各土层的碳贮量表现为针叶林 < 混交林 < 阔叶林,说明碳贮量高低主要取决于其土壤碳素含量的大小。3 种类型森林土壤碳贮量分别为 39.81 t/hm²、67.67 t/hm² 和 77.59 t/hm²,其中 0~10cm、10~20cm、20~40cm 和 40~60cm 的贡献率平均分别为 36.4%、20.4%、29.4%和 13.8%。森林类型不同,土壤碳贮量分配格局不同。尽管 3 种类型森林土壤在 0~20cm 的碳贡献较为接近(占总量的 55.0%~57.7%),但针叶林和混交林更多的碳分配在 0~10cm 上。此外,3 种类型森林土壤表层碳贮量贡献较大,意味着人为干扰活动容易引起表层水土流失从而导致土壤碳贮量减少。

3.4 生态系统碳贮量及其分配

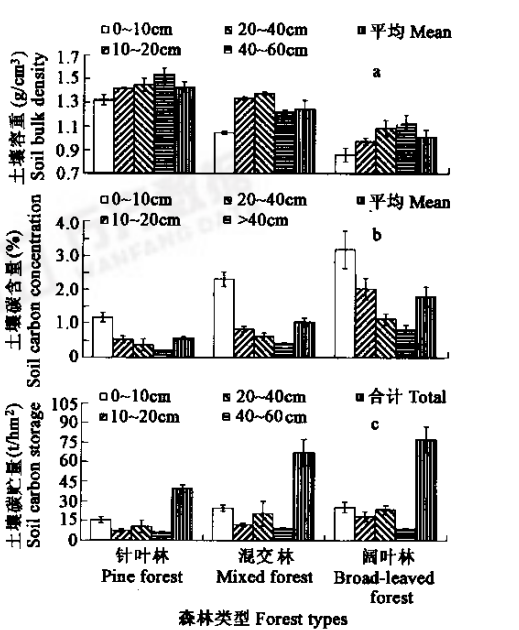


图 2 鼎湖山保护区森林各层土壤容重、有机碳含量和碳贮量
Fig. 2 Soil bulk density (a), organic carbon concentration (b) and carbon storage (c) for four depth layers in DHSBR forests.

3 种类型森林生态系统碳总贮量分别为 135.8 t/hm²、215.1 t/hm²和 259.7 t/hm²,其中植被层的贡献最大(66.3%~69.5%,平均为 67.6%),土壤层次之(29.3%~31.5%,平均 30.2%),地表凋落物层最小(0.6%~4.3%,平均 2.2%),可见,3 个森林生态系统在植被和土壤碳贮量分配格局基本相似。

4 讨论

4.1 鼎湖山保护区森林植被碳贮量较高,而土壤碳贮量较低且表层的比重较高

本研究结果表明,鼎湖山马尾松针叶林植被碳贮量为 90.06t/hm²,该值大大高于广东省(29.4t/hm²)和我国森林(44.9t/hm²)的碳贮量平均水平^[9],高于王效科等^[8]对我国马尾松林过熟林的统计值(62.44 t/hm²),高于热带亚热带针叶林平均水平 63.7t/hm²^[24],高于暖性针叶林平均水平 47.97t/hm²^[25]。鼎湖山马尾松针阔混交林碳贮量为 144.04 t/hm²,该值高于王效科等^[8]对针叶混交林和针阔混交林统计的平均值(分别为 98.87 t/hm² 和 86.85 t/hm²)。可见,鼎湖山马尾松林和马尾松针阔混交林植被碳贮量较高,可能是因为本研究所选的森林林龄较大(60~70 林龄),而混交林在建立保护区后其植被又受到良好的保护^[20,21]。

本研究 3 种类型森林土壤属赤红壤类型,其土壤碳贮量在 39.8~77.6 t/hm²,平均 61.7 t/hm²,明显低于我国东部地区该类型土壤碳贮量(122.8 t/hm²)^[26],也低于周玉荣等对我国类似森林类型的报道(平均分别为 205.23、335.58 和 101.30 t/hm²)^[25],说明鼎湖山保护区森林土壤碳贮量总体上较低。

此外,鼎湖山保护区森林土壤碳贮量不但较低,而且在 0~40cm,特别是 0~20cm 所贮存的碳量的比重相对于其它地区要大。根据 Baties^[27]对全球各类型森林土壤碳贮量的研究,0~100cm 的土壤碳贮量中,0~30cm 和 0~50cm 所占的比例在 37%~59%和 62%~81%间,平均为 49%和 67%。另根据 Detwiler^[28]的热带和亚热带地区土地利用变化对土壤碳库影响的研究,0~40cm 所贮存的碳占 0~100cm 的比例为 35%~80%,平均为 57%。而本研究结果显示,鼎湖山保护区 3 种类型森林土壤 0~10cm、0~20cm 和 0~40cm 的土壤碳贡献率为 36.9%~39.0%、55.0%~57.7%和 84.1%~88.5%,平均达到 36.4%、56.8%和 86.2%之多。鼎湖山森林土壤表层碳贮量比例较高,从侧面反映出土壤更加脆弱,人为干扰活动更容易造成土壤碳损失,这也可能是针叶林和混交林土壤碳含量大大低于具 400 多年历史的阔叶林的主要原因。

以上分析表明,鼎湖山保护区森林生态系统中,森林植被碳贮量较高而土壤碳贮量较低,这一特征导致了森林生态系统的植被与土壤碳贮量比(即植被碳贮量与土壤碳贮量的倍数)非常高(鼎湖山保护区针叶林、混交林和阔叶林分别为 2.26、2.13 和 2.33,平均为 2.24)。根据 Dixon 等^[4]对全球森林生态系统碳库和通量的研究可知,亚洲低纬度地区(0~25°)植被与土壤碳贮量比为 0.95~1.25,我国(按其划分属于中纬度地区,25~50°)平均 0.84,全球范围内为 0.46。另外,周玉荣等^[25]对我国主要森林生态系统碳贮量的研究表明,我国森林植被与土壤碳贮量比值为 0.19~0.95,平均为 0.36。可见,无论是全球范围内还是全国范围内,土壤碳贮量是植被的两倍多。而鼎湖山保护区恰好相反,植被碳贮量是土壤的两倍多,该分配比例与我国热带尖峰岭的热带雨林极为接近(2.24)^[29]。

4.2 南亚热带森林演替过程中生态系统的碳吸存

目前,在我国南方存在大面积的针阔叶混交林,它多起源于人工针叶林,是向阔叶林自然演替的必不可少的重要阶段,在森林组成中也占非常大的比重^[11,12]。封山育林使林分得到正常发育生长和演替,其过程中碳不断积累,这种碳吸存方式在我国减缓碳排放的策略中有重大现实意义^[7~10]。

由于对木材和燃料的需求,我国南方地区大片森林遭到的破坏,一些地区森林严重退化。为了使这些退化的森林土地得到恢复,栽种了大面积的马尾松林。据估计,仅广东省马尾松林面积就达 3.0×10⁶hm²。为确保这些退化林地的恢复,已经禁止砍伐树木,但为满足农村对燃料的需求允许收割林下层植物和凋落物^[20,21]。正是因为如此,本研究马尾松林虽然有 60a 林龄,其植被和土壤碳贮量只有混交林(约 70a 林龄,但没有人为干扰)的 60%。马尾松林生态系统碳贮量较低,从另一方面反映了,随森林演替生态系统有较大的碳吸存潜力。因此,如果马尾松林恢复到目前针阔混交林状态,其生态系统可以吸存碳 79.3t/hm²,如果演替到阔叶林时数据存 123.9t/hm²,分别是原有的 58%和 91%。所吸存的碳大部分分配到植被层,占总量的 67.0%~69.5%。可见,通过保护植被,使针叶林经混交林演替到阔叶林,其生态系统碳吸存对固定大

气 CO₂ 以减缓全球气候变暖的速度具有重要的现实意义。

以上分析反映了南亚热带地区森林演替过程中生态系统的碳吸存潜力,其过程中生态系统碳吸存速率也是生态学家和政策决策者十分关心的问题。根据过去关于鼎湖山保护区马尾松林和混交林生物量的研究,可以分析南亚热带森林演替前期阶段生态系统植被的碳吸存过程(图 3)。随着时间的推延,两种森林类型乔木层植被的碳贮量都在增加。混交林在 1955 年时的碳贮量达 92.63 t/hm²,与现在的马尾松林 2001 年时的碳贮量相差不大。如果把混交林在 1955 年后的发展看成为马尾松林 2001 年后的延续,那么马尾松林演变到混交林乔木层的碳积累整个过程是:初期速度很快(4.63~7.37 t/(hm²·a)),然后逐渐减慢(0.83~3.70 t/(hm²·a)),演变到混交林后速度变得更慢(0.98~1.17 t/(hm²·a)),总平均为 2.48 t/(hm²·a)。

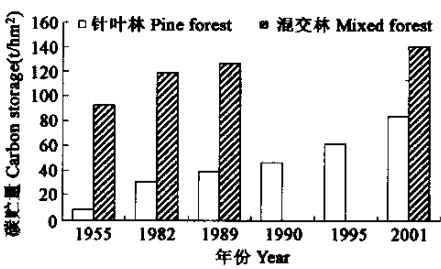


图 3 鼎湖山保护区马尾松林和混交林乔木层碳贮量随时间的变化

Fig. 3 Changes of carbon storage in tree layers of Pine Forest and Mixed Forest over time in DHSBR

References:

[1] Kärner C. Biosphere response to CO₂ enrichment. *Ecological Application*, 2000, **10**(6): 1590~1619.

[2] PCC. Climate change 2001: the science of climate change. Summary for policymakers, a report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2001. 1~98. Available from <http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>

[3] Dixon R C, Winjum J K, Schroeder P E. Conservation and sequestration of carbon: the potential of forest and agroforest management practices. *Global Environmental Change*, 1993, **2**: 159~173.

[4] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, 1994, **263**: 185~190.

[5] IPCC. Land use, land-use change, and forestry, Summary for Policymakers, a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 1-20. Available from <http://www.ipcc.ch/pub/srllucf-e.pdf>.

[6] Kauppi P, et al. Technical and economic potential options to enhance, maintain and manage biological carbon reservoirs and geo-engineering. In: Davidson O, Metz B, Swart R eds. *Climate Change 2001: Mitigation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

[7] Zhang P C, Shao G F. China's Forest Policy for the 21st Century. *Science*, 2000, **288**: 2135~2136.

[8] Wang X K, Feng Z W. The potential to sequester atmospheric carbon through forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, **19**(4): 72~74.

[9] Fang J Y, Cheng A P. Dynamic forest biomass carbon pools in china and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, **43**(9): 967~973.

[10] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in china between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320~2322.

[11] Peng S L and Wang B S. Studies on forest succession of Dinghushan, Guangdong, China. *Botanical Journal of South China*, 1993, **2**: 34~42.

[12] Zhou H C, Li M J, Zhou Y R, et al. The vegetation map of Ding Hu Shan Biosphere Reserve with reference to its illustration. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1986, **4**: 43~52.

[13] Peng S L, Li M G, Lu Y. A primary study on the biomass and productivity of *Pinus massoniana* population in Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1989, **5**: 75~82.

[14] Peng S L and Zhang Z P. Biomass, productivity and energy use efficiency of climax vegetation on Dinghushan, Guangdong, China. *Science in China (Series B)*, 1995, **38**(1): 67~73.

[15] Wen J, Zhang Q M, et al. Studies on biomass of three lower subtropical evergreen broad-leaved forests in a MAB Reserve of South China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, **23**(Suppl.): 11~21.

[16] Fang Y T, Mo J M. Study on carbon distribution and storage of a pine forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve. *Guihaia*, 2002, **22**(4): 305~310.

[17] Mo J M, Fang Y T, Peng S L, *et al.* Carbon accumulation and allocation of lower subtropical evergreen broadleaf forests in a MAB reserve of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(10).

[18] Fang Y T, Mo J M, Huang Z L, *et al.* Carbon Accumulation and Distribution in *Pinus massoniana* and Schima Superba Mixed Forest Ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, **11**(1): 47~52.

[19] Huang Z F and Fan Z G. The climate of Ding Hu Shan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1982, **1**: 11~23.

[20] Mo J M, Brown S, Peng S L, *et al.* Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China. *Forest Ecology and Management*, 2003, **175**: 573~583.

[21] Brown S, Lenart M T, Mo J M, *et al.* Structure and organic matter dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China. *Biotropica*, 1995, **27**(3): 276~289.

[22] Anderson J M and Ingram J S. *Tropical soil biology and fertility; a handbook of methods*. CAB Internation, Wallingford, Oxford, England, 1989.

[23] Fang J Y, Ke J H, Tang Z Y, *et al.* Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **25**(4): 414~419.

[24] Wang S Q, Zhou C H, Luo C W. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. *Progress in Geography*, 1999, **18**(3): 238~244.

[25] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and buget of major Chinese forest types. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **24**(5): 518~522.

[26] Wang S Q and Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research*, 1999, **18**(4): 349~356.

[27] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 151~163.

[28] Detwiler R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soil. *Biogeochemistry*, 1986, **2**: 67~93.

[29] Li Y D, Wu Z M, Zeng Q B, *et al.* Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinic*, 1998, **18**(4): 371~378.

参考文献:

[8] 王效科,冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力. 生态学报, 2000, **19**(4): 72~74.

[9] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, **43**(9): 967~973.

[12] 周厚诚,李明佳,周远瑞,等. 鼎湖山自然保护区植被图及说明书. 热带亚热带森林生态系统研究, 1986, **4**: 43~52.

[13] 彭少麟,李鸣光,陆阳. 鼎湖山马尾松种群生物生产量初步研究. 热带亚热带森林生态系统研究, 1989, **5**: 75~82.

[15] 温达志,魏平,张倩媚,等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林生物量的研究. 植物生态学报, 1999, **23**(增刊): 11~21.

[16] 方运霆,莫江明. 鼎湖山马尾松林生态系统碳素分配和贮量的研究. 广西植物, 2002, **22**(4): 116~121.

[17] 莫江明,方运霆,彭少麟, Sandra Brown, 周国逸. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林碳素积累和分配特征. 生态学报, 2003, **23**.

[18] 方运霆,莫江明,黄忠良,等. 鼎湖山马尾松、荷木混交林生态系统碳素积累和分配特征. 热带亚热带植物学报, 2003, **11**(1): 47~52.

[19] 黄展帆,范征广. 鼎湖山的气候. 热带亚热带森林生态系统研究, 1982, **1**: 11~23.

[23] 方精云,柯金虎,唐志尧,等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 2001, **25**(4): 414~419.

[24] 王绍强,周成虎,罗承文,等. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理科学进展, 1999, **18**(3): 238~244.

[25] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, **24**(5): 518~522.

[26] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 1999, **18**(4): 349~356.

[29] 李意德,吴仲民,曾庆波,等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学报, 1998, **18**(4): 371~378.