

更新期橡胶人工林生态系统碳贮量及分布

王春燕^{1,2}, 陈秋波¹, 彭 懿³, 刘建波⁴, 杨礼富¹, 王真辉^{1*}

(1. 中国热带农业科学院橡胶研究所/农业部橡胶树生物学重点开放实验室,海南 儋州 571737;

2. 海南大学环境与植物保护学院,海南 儋州 571737; 3. 遵义师范学院,贵州 遵义 563002;

4. 海南省建设项目规划设计研究院,海南 海口 570203)

摘要:对处于更新期30年橡胶人工林含碳量、生物量、碳贮量及其空间分布进行研究。结果表明:橡胶树组分的含碳量在29.94%~52.90%之间,大小表现为:树叶>树干>树根>树枝>树皮>胶乳,相同器官的含碳量枯样的要比鲜样的高。凋落物层含碳量平均为51.90%,林下植物为46.09%。土壤含碳量平均为0.54%,随着土层深度的增加,各层次土壤含碳量逐渐减少,相邻土层差异不显著。橡胶林生态系统现存碳贮量为219.68 t·hm⁻²,其中乔木层为140.21 t·hm⁻²,占整个生态系统碳贮量的63.82%,凋落物层和林下植被层为3.99 t·hm⁻²,仅占1.82%,土壤(0~100 cm)的碳贮量为75.48 t·hm⁻²,占34.36%。橡胶树各器官的碳贮量与其生物量成正比关系。树干的生物量最大,其碳贮量也最高,占乔木层碳贮量的55.67%。

关键词:橡胶林;碳贮量;含碳量;更新期

中图分类号:S794.1;S718.55

文献标识码:A

Carbon Storage and Distribution in Rubber Plantation during Regeneration

WANG Chun-yan^{1,2}, CHEN Qiu-bo², PENG Yi³, LIU Jian-bo², YANG Li-fu², WANG Zhen-hui²

(1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Danzhou 571737, Hainan, China;

2. Environment and Plant Protection Department of Hainan University, Danzhou 571737, Hainan, China;

3. Zunyi Normal College, Zunyi 563002, Guizhou, China;

4. Hainan Provincial Institute of Construction Project Planning & Design, Haikou 570203, Hainan, China)

Abstract: The carbon content and its distribution in rubber (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Muell. Arg.) plantation in regeneration period were studied. The results showed that the carbon content in different organs of rubber trees ranged from 29.94% to 52.90% and decreased with the order of leaves > trunk > root > branch > bark > latex. The carbon content of dry samples from the same organ was higher than that of fresh samples. The carbon content in litter layer and understory plant layer were 51.90% and 46.09%, respectively. The carbon content in the soil was 0.54% and decreased with soil depth, and no significant difference was found between the adjacent two soil layers. The total carbon storage in rubber plantation was 219.68 t·hm⁻², of which 140.21 t·hm⁻² in the aboveground arbor, about 63.82%, 3.99 t·hm⁻² in the litter, about 1.82%, and 75.48 t·hm⁻² in the soil layer (0~100 cm), accounted for 34.36%. The carbon storages in different organs were positively related to the biomass of corresponding organs. The trunk accumulated the highest carbon storage and comprised 55.64% of carbon storage in aboveground arbor.

Key words: *Hevea brasiliensis*; carbon storage; carbon content; regeneration period

收稿日期:2011-03-28

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金橡胶研究所资助项目(项目编号:XJSYWEZX2008-18、XJSYWFZX2009-30)

作者简介:王春燕(1983—),女,广东清新人,在读硕士,主要从事人工林生态学研究。E-mail:wyling123@163.com

* 通讯作者:E-mail:wzh-36@163.com

森林本身维持着巨大的碳库(约占全球植被碳库的 86% 以上)^[1],同时也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的 73%)^[2-3]。森林生态系统每年固定的碳贮量约占整个陆地生态系统的三分之一^[4]。因此,森林生态系统对全球碳循环和碳平衡具有不可替代的调控作用。森林群落的生物量及其组成树种的含碳量是估算森林生态系统对大气吸收与排放含碳气体的关键因子^[5-6],对它们的准确测定或估计是估算区域森林生态系统碳贮量的基础,对区域气候变化的预测具有重要意义。

近年来,随着世界对天然橡胶需求量的增加,橡胶种植得到了迅猛发展,热带地区的橡胶种植面积不断扩大^[7]。橡胶生产不仅是我国热带地区重要的产业与经济来源,也是该地区最大的人工林生态系统之一,随着清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)的推行,其固碳的生态价值更突出。如何准确估算橡胶林生态系统的碳汇大小,是研究橡胶林生态系统碳循环的核心问题之一。目前对橡胶林土壤碳贮量的研究不断增加^[8-11],但有关橡胶林生态系统碳贮量方面的研究较少。本文通过对 30 年生更新期橡胶林生物量和含碳量进行实际测定,并对橡胶林生态系统碳贮量与分布特征进行分析,为进一步研究该生态系统碳平衡的估算和动态模拟提供参考依据。

1 试验地概况

试验区位于海南省儋州市中国热带农业科学院试验场二队(19°31' N、109°28' E),地势平缓,片麻岩发育的砖红壤,土层深厚,质地粘重,是海南具有代表性的土壤类型。历年平均气温 23.2 ~ 23.9 °C,日平均气温 ≥ 15 °C 的活动积温 7 500 ~ 8 500 °C,最冷月平均气温 16.9 ~ 18.0 °C,年降水量 1 500 ~ 2 000 mm(数据来自中国热带农业科学院气象站)。试验区为第二代胶园,单一人工群落,株行距为 3 m × 7 m,群落结构简单,林下为多年生草本植物及当年生草本植物,禾本科草本植物居多,如金腰箭(*Synedrella nodiflora* (L.) Gaertn.)、肖梵天花(*Urena lobata* Linn.)、假败酱(*Stachytarpheta jamaicensis* (Linn.) Vahl)、巢蕨(*Neottopteris nidus* (L.) J. Sm.)、叶下珠(*Phyllanthus urinaria* Linn.)、竹叶草(*Oplismenus compositus* (L.) Beauv.)等,极少见亚灌木、灌木。

2 研究方法

2.1 橡胶树不同器官生物量测定

本试验研究对象为处于更新阶段的 30 年橡胶树无性系 PR107 人工林,平均树高 21.86 m,平均胸径 30.07 cm,割龄为 22 年。在样地(2 hm²)内设置 5 个 50 m × 50 m 小样地,对样地 2 hm² 内的所有橡胶树以 1.3 m 处树围进行每木检尺,在小样地抽取平均木共 35 株橡胶树,采用收获法收获地上部分,并挖取地下根系。伐倒后测定树高,按 100 cm 长分段(截取圆盘)锯开,并测定各分段的树干、树枝、树皮、树叶和树根的鲜质量,同时随机取样(皮、枝、叶、干、根各 0.5 kg)带回实验室测干鲜比,叶样品 105 °C 杀青 0.5 h,65 °C 烘干,其它样品置于 70 ~ 80 °C 烘箱内恒温 24 h 烘干,测算各器官的干物质量,同时用作分析样品。采样时间为 2008 年 11 月的晴天。胶乳开割期按正常割胶采集,测算其产量。

本文样品处理具体如下,树皮由树的主干分离出来,树干是被去皮的剩下部分,除主干外的所有枝条为树枝,树根包括根桩,胶乳采用新鲜采集没经处理直接测定。

2.2 橡胶林凋落量测定

样地内随机设定 5 个 2 m × 2 m 的凋落物收集箱,每月收集 1 次,将叶、枝、花、果分开,装入塑料袋,带回室内,烘干至恒质量后称质量,同时选取一定量的凋落物作为分析样品。

2.3 林下植被生物量测定

橡胶林下植物多为当年生草本植物,在样地内随机取 5 个 2 m × 1 m 小样方,采用完全收获法^[12],收取植物的地上部分和地下部分带回实验室烘干测定,同时取混合样品用作分析。

2.4 样品采集及化学分析方法

橡胶树胶乳和不同器官(叶、枝、干、皮、根)、凋落物层和林下植被层样品,经烘干、粉碎、过 0.25 mm 筛,用重铬酸钾-硫酸氧化法测定含碳量^[13]。土壤样品采用梅花形采样法,在样地随机选取 5 个土壤剖面。土壤剖面深度为 100 cm,按 0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm、30 ~ 45 cm、45 ~ 60 cm、60 ~ 100 cm 五层随机采集土样,同时用环刀法测定土壤密度,土样在室内自然风干后过 0.25 mm 筛,采用重铬酸钾-外加热法测定土壤含碳量^[14]。

2.5 橡胶人工林生态系统各组分碳贮量

根据橡胶树各器官(干、枝、叶、皮、根)和胶乳、

林下植被层以及凋落物层生物量和相应的含碳量,计算其相应碳贮量。本文对土壤碳贮量的估算限定在表土层 100 cm 的深度范围内,不包括地表凋落物。土壤碳贮量具体采用下面的公式^[15]:

$$S = \sum_{i=1}^5 (C_i \times d_i \times H_i)$$

其中 S 表示土壤碳贮量 ($t \cdot hm^{-2}$); C_i 表示土壤含碳量 (%); d_i 表示土壤密度 ($g \cdot cm^{-3}$); H_i 表示土层厚度 (m)。

2.6 数据分析

采用 Excel 2003 软件对数据进行整理和作图,并用 DPS V7.05 版软件进行统计分析。采用单因素方差分析及 Duncan's 多重比较不同数据组间的差异。

3 结果与分析

3.1 橡胶树各器官碳贮量分析

海南橡胶林的初植密度一般为 $495 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,由于台风、寒害和旱灾等自然灾害的影响以及群落中个体橡胶树的竞争所引起自然稀疏的作用,其单位面积株数平均下降到并稳定在 $450 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右。

植物体内碳水化合物含量较高,但是在不同部位其相对比例也有不同。由表 1 可知,胶乳的含碳

量最小为 29.94%,各器官含碳量处于 46.20% ~ 52.90% 之间,平均值为 48.55%。其中树叶和树皮含碳量偏离平均值较大,其余在平均值上下浮动,树干和树根的含碳量最为接近。各组分含碳量大小表现为:树叶 > 树干 > 树根 > 树枝 > 树皮 > 胶乳。树叶的含碳量显著高于其它器官,树干和树根两者间不存在显著差异,却显著高于树皮,树枝与树干、树根及树皮均没有显著差异,胶乳与各器官均存在显著差异。橡胶树的胶乳开割期年产量为 $10.71 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$,各器官的生物量在 $13.62 \sim 354.92 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$ 之间。各组分大小依次表现为:树干 > 树枝 > 树根 > 树皮 > 树叶 > 胶乳,其中胶乳的生物量仅占林分生物量的 1.76%,各器官中树干的生物量最大,占林分生物量的 54.54%;树叶的生物量最小,仅占林分生物量的 2.09%。乔木层的碳贮量为 $140.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。还可知,橡胶树各器官碳贮量在 $3.24 \sim 78.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,其中树干碳贮量最大占乔木层碳库的 55.64%,树叶碳贮量最小仅占乔木层碳贮量的 2.31%,由此说明不同器官的碳贮量主要由生物量的大小决定,树干是乔木层碳贮量的主要贮存器官,树叶虽然是橡胶树光合作用的器官,也是光合同化物最初存放的场所,但是光合作用固定碳大部分均转存到其它器官尤其是枝干贮存。

表 1 橡胶树各器官及胶乳的含碳量、生物量与碳贮量

各器官	含碳量 /%	生物量 /($kg \cdot \text{株}^{-1}$)	平均生物量 /($kg \cdot \text{株}^{-1}$)	碳贮量 /($kg \cdot \text{株}^{-1}$)	碳贮量 /($t \cdot \text{hm}^{-2}$)	碳贮量百分比 /%
树干	48.84 ± 0.42 b	296.17 ~ 473.77	354.92	173.34	78.00	55.64
树枝	46.33 ± 0.51 bc	74.29 ~ 188.15	112.67	52.20	23.49	16.76
树叶	52.90 ± 0.68 a	8.44 ~ 20.92	13.62	7.20	3.24	2.31
树皮	46.20 ± 0.76 c	33.56 ~ 72.20	52.98	24.48	11.01	7.85
树根	48.45 ± 0.50 b	72.61 ~ 166.06	105.10	50.92	22.91	16.34
胶乳	29.94 ± 0.42 d	8.57 ~ 14.29	11.43	3.42	1.54	1.10
(总计)			650.72	311.57	140.21	

3.2 凋落物及林下植被层碳贮量

对橡胶林凋落物层和林下植被层含碳量的测定结果如表 2 所示,凋落物及林下植物含碳量在 46.09% ~ 55.30% 之间,其含碳量的大小依次为:地面落果 > 落叶 > 地面落花 > 枯枝 > 林下其它植物。凋落物不同组分之间含碳量存在显著差异,具体表现为地面落果含碳量显著高于其它器官;而落叶含碳量显著高于地面落花、枯枝;枯枝与地面落花存在显著差异,与林下其它植物差异不显著。凋落物量的大小依次为:落叶 > 枯枝 > 地面落果 > 地面落花,其中花的凋落物量最小为 $0.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,落叶最多

为 $5.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由表 1 和表 2 得知,各器官生物量中鲜叶的量最小,而凋落物的枯叶量最多,这说明橡胶树叶新陈代谢更新的周期很短。同时还可知,凋落物枯枝落叶的含碳量均比新鲜枝叶的含碳量高。在凋落物及林下植被层中,落叶的碳贮量最大为 $2.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是枯枝为 $0.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,然后是林下其它植物为 $0.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,接着是地面落果为 $0.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,地面落花的碳贮量最小为 $0.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由上述可得,与橡胶树各器官的碳贮量相同,凋落物各器官和林下其它植物的生物量大小是凋落物和植被层的碳贮量的关键因子。

表2 橡胶林凋落物层和林下植物层含碳量、生物量和碳贮量

项目	含碳量 /%	生物量 /(t·hm ⁻²)	碳贮量 /(t·hm ⁻²)
地面落果	55.30 ± 0.49 a	0.33	0.18
枯枝	47.81 ± 0.52 d	1.13	0.54
落叶	53.22 ± 0.29 b	5.26	2.80
地面落花	51.25 ± 0.57 c	0.12	0.06
林下其它植物	46.09 ± 0.99 d	0.95	0.44

3.3 土壤层碳贮量及其垂直分布

由表3可知,橡胶林土壤密度处于1.48~1.58 g·cm⁻³之间,不同土层之间土壤密度相差不大,但是随着土层深度增加有下降趋势。不同层次土壤含碳量在3.56~7.28 g·kg⁻¹之间,其中0~15 cm土层有机碳含量约占整个剖面总碳量的26.78%,0~45 cm土层有机碳含量约占整个剖面总碳量的70.36%,而0~60 cm土层中有机碳含量占整个剖面总碳量的86.92%。0~15 cm、15~30 cm和30~45 cm土层有机碳含量高于平均值(5.43 g·kg⁻¹),而45~60 cm土层和60~100 cm土层有机碳含量低于平均值。土壤有机碳含量在整个剖面的垂直分布呈现随土壤深度的增加而降低,大小表现为:0~15 cm土层>15~30 cm土层>30~45 cm土层>45~60 cm土层>60~100 cm土层。从垂直分布差异上看,相邻土层之间均不存在显著性差异。由于各土层密度差异不大,因此相同厚度土层的碳贮量与土壤有机碳含量成正比,土层厚度对土壤碳贮量有很大的影响。5个土层的碳贮量分别为17.25 t·hm⁻²,14.57 t·hm⁻²,12.34 t·hm⁻²,9.99 t·hm⁻²,21.33 t·hm⁻²。

表3 不同土层土壤密度、含碳量和碳贮量

土层深度 /cm	土壤密度 /(g·cm ⁻³)	平均土壤密度 /(g·cm ⁻³)	碳含量 /(g·kg ⁻¹)	碳贮量 /(t·hm ⁻²)
0~15	1.50~1.72	1.58	7.28 ± 0.28 a	17.25
15~30	1.46~1.56	1.52	6.39 ± 0.47 ab	14.57
30~45	1.42~1.59	1.51	5.45 ± 0.35 bc	12.34
45~60	1.41~1.57	1.48	4.50 ± 0.34 cd	9.99
60~100	1.40~1.60	1.50	3.56 ± 0.27 d	21.33
(合计)			27.17	75.48

3.4 橡胶林生态系统碳库及分配

橡胶林凋落物及林下植被层的碳贮量为3.99 t·hm⁻²·a⁻¹,30年橡胶林生态系统碳贮量为219.68 t·hm⁻²,换成CO₂同化量为805.49 t·hm⁻²。由图1可知,乔木层碳贮量占橡胶林生态系统碳贮量的63.82%,土壤碳贮量占生态系统碳贮量的34.36%,

而林下植被层和凋落物层所占比例之和才1.82%。由此说明乔木层碳贮量是橡胶林生态系统碳库的主体,其次是土壤碳贮量。

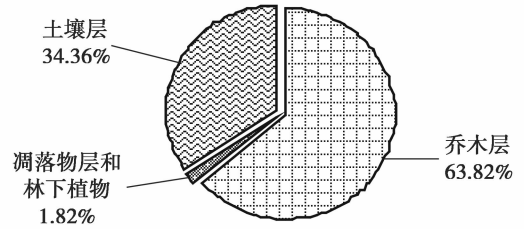


图1 橡胶人工林生态系统现存碳贮量分布

4 讨论

(1)各器官含碳量的大小是研究森林生态系统碳库的基础。湖南9、10、13、87年生杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)各器官含碳量为:皮>叶>干>根>枝^[16-18],而11年生和14年生杉木各器官含碳量大小依次为:叶>皮>根>干>枝^[19],湖南18年生樟树(*Cinnamomum* sp.)各器官含碳量研究结果为:叶>枝>根>干>皮^[20];广西4年生、7年生和11年生马占相思(*Acacia mangium* Willd.)各器官含碳量大小依次为:皮>干(或叶)>枝>根^[21];本文中,海南30年生橡胶树各器官含碳量大小依次为:叶>干>根>枝>皮。无论相同树种还是不同树种,其各器官含碳量存在较大差异,但均呈现叶或皮的含碳量最大,这可能是由于树种特性、生境条件与树龄的不同会引起树木各器官含碳量的变化。橡胶树一般每年开花2次,其中3—4月为主花期,称春花,开花最多;5—7月第二次开花,称夏花,分别结成秋果和冬果,秋果集中在8、9、10月凋落,以9月最多,冬果在11月和12月有少量的凋落,但主要集中在1月和2月凋落,其余月份均没有果实凋落,所以花和果的凋落量明显少于枯枝和落叶。本研究结果还表明,枯枝落叶的含碳量均比鲜枝鲜叶的含碳量高,主要原因可能是鲜样所含的水分较多,且鲜样会进行呼吸作用,在呼吸过程中释放出一定的CO₂,从而导致相同器官鲜样的含碳量均比枯样的低^[22]。

(2)森林凋落物是森林生态系统物质循环的重要组成部分。本研究得出橡胶林凋落物年平均碳贮量为3.55 t·hm⁻²,低于之前估算的单位面积凋落物年固碳总量为5.25 t·hm⁻²^[23]。橡胶林生态系统林下植物,多为当年生草本植物,禾本科草本植

物,橡胶林下植被层固定碳 $0.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究结果与其它成熟人工林林下植被层的固碳量明显较低,如杉木为 $1.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,楠木是 $3.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [24]。这可能是由于胶工每年春、秋两季都会对胶园进行两次统一除草压青的管理措施,林下植物被清除后多以腐殖质的形式返回土壤;而大规模的除草不仅影响胶园的生物多样性,还会加剧胶园的水土流失。因此,胶园应常年保持良好的林下植被覆盖率;实际上,如果在胶园中适当采取间作的种植方式,将有可能取得更理想的固碳效果。

(3) 橡胶林生态系统碳贮量 $219.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 低于中国森林生态系统的平均碳贮量 $258.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [25]、鼎湖山南亚热带常绿阔叶林为 $244.998 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [26] 和尖峰岭热带山地雨林原始林是 $340.467 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [27], 但高于 30 年生杉木林碳库 $190.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [28]。Cotter[29] 对中国橡胶的研究指出,海南的橡胶林(30 年)固碳能力达到 $272 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 远高于云南的橡胶林 $192 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 当然这存在计算方法上的差异。此外,橡胶树因每年割胶导致小部分的树皮脱落,在橡胶树 20 多年的产胶过程中所损失的生物量,本文没有做相应的研究,但这会使橡胶树的固碳总量有所改变,但改变的幅度不会太大。有研究表明[30], 旺产期(26 年)的橡胶林土壤总有机碳和活性有机碳量都处于割胶期的最低水平,而且停止割胶若干年后(40 年)土壤总有机碳含量仍处于较低水平。若能精确测定橡胶林生态系统碳贮量及其各组分的动态变化规律,对橡胶林生态系统碳收支的作用非常关键,将能更深入的解释和证实橡胶林生态系统对 CO_2 的吸收潜力。

森林生态系统类型复杂多样,各种类型的生态系统虽然在碳循环激励过程中具有相似性,但因不同树龄人工林的生长情况由于温度、湿度、光照等环境因素的影响,各种类型人工林光合产量以及每个个体的不同器官以不同的速率进行着呼吸作用和分解率以及碳贮量却有较大的差异[22], 因此在森林碳贮量估算中直接采用 0.45 或 0.50 作为各种森林类型平均含碳率进行计算,得出的森林碳贮量与实际碳贮量间会存在偏差,而对森林生态系统碳循环和碳平衡研究结果产生影响。虽然有研究表明,老龄林无论是地上部分还是地下部分,均贮藏着巨大的生物量,老龄森林生态系统在一定区域或全球尺度上对碳估算均起着重大的作用[31], 但为提高森林生态系统碳贮量的估算精度,应分不同器官,不同林分

类型、不同区域和不同树龄。

参考文献:

- [1] woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1978, 199: 141 - 146
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zone[J]. Nature, 1982, 298: 156 - 159
- [3] 袁嘉祖,范晓明. 中国森林碳汇功能的成本效益分析[J]. 河北林果研究, 1997, 12(1): 20 - 24
- [4] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production[J]. Bio Science, 1981, 31: 29 - 33
- [5] 王效科,冯宗炜. 森林生态系统中生物量和碳贮量的研究历史[M]. 北京: 中国科学与技术出版社, 1995: 335 - 347
- [6] 马钦彦,陈遐林,王娟,等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5): 96 - 100
- [7] Zhang H, Zhang G L, Zhao Y G, et al. Chemical degradation of a Ferralsol (Oxisol) under intensive rubber (*Hevea brasiliensis*) farming in tropical China[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93: 109 - 116
- [8] 杨景成, 黄建辉, 潘庆民, 等. 西双版纳不同热带生态系统土壤有机质的光谱学特性[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 623 - 629
- [9] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 97 - 103
- [10] 周文君, 沙丽清, 沈守良, 等. 西双版纳橡胶林土壤呼吸季节变化及其影响因子[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 317 - 325
- [11] 池富旺, 张培松, 罗微, 等. 中大尺度下橡胶园土壤全氮和有机质含量的空间分布特征[J]. 热带作物学报, 2009, 30(5): 613 - 619
- [12] 杨昆, 管东生. 森林林下植被生物量收获的样方选择和模型[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 705 - 714
- [13] 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算. 中华人民共和国林业行业标准[S]. 1999, LY/T 1237
- [14] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 第三版, 北京: 中国农业出版社, 2000
- [15] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳贮量研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(2): 239 - 243, 267
- [16] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布[J]. 林业科学, 2002, 38(3): 14 - 19
- [17] 康冰, 刘世荣, 张广军, 等. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1320 - 1329
- [18] 钟凌芳, 杨玉盛, 高人, 等. 老龄杉木人工林生态系统碳库及分配[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(2): 11 - 17
- [19] 田大伦, 方晰, 项文化. 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度[J]. 生态学报, 2004, 4(11): 2382 - 2386
- [20] 雷丕锋, 项文化, 田大伦, 等. 樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 25 - 30
- [21] 何斌, 刘运华, 余浩光, 等. 南宁马占相思人工林生态系统碳素密度与贮量[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 6 - 11

- [22] 韩氏杰. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程[M]. 北京: 科技出版社, 2008
- [23] 蒋菊生, 王如松. 橡胶林固定 CO₂ 和释放 O₂ 的服务功能及其价值估计[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1545 - 1551
- [24] 尉海东, 马祥庆. 不同发育阶段楠木人工林生态系统碳贮量研究[J]. 烟台师范学院学报: 自然科学版, 2006, 22(2): 130 - 133
- [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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518 - 522
- [26] 莫江明, 方运霆, 彭少麟, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林碳素积累和分配特征[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 1970 - 1976
- [27] 吴仲民, 李意德, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林 C 素库及皆伐影响的初步研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(4): 341 - 344
- [28] 杨玉盛, 林先富, 俞新妥, 等. 杉木套种山苍子模式结构与生物量初步研究[J]. 福建林学院学报, 1991, 11(4): 341 - 348
- [29] Cotter M, Martin K, Sauerborn J. How do "Renewable Products" impact biodiversity and ecosystem services-the example of natural rubber in China[J]. Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics, 2009, 110(1): 9 - 22
- [30] Zhang M, Fu X H, Feng W T, *et al.* Soil organic carbon in pure rubber and tea - rubber plantations in southwestern China[J]. Tropical Ecology, 2007, 48: 1 - 7
- [31] Suchanek T H, Mooney H A, Franklin J F, *et al.* Carbon dynamics of an old - growth forest [J]. Ecosystems, 2004, 7: 421 - 426