



橡胶人工林碳储量变化和固碳潜力分析

熊子蕙, 王旭, 杨怀, 翁国杰, 吴昊, 于磊, 马优

引用本文:

熊子蕙, 王旭, 杨怀, 等. 橡胶人工林碳储量变化和固碳潜力分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2025, 33(2): 159–166.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4860>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于BIOME-BGC模型的秦岭北坡太白红杉林碳源/汇动态和趋势研究](#)

Carbon Source/Sink Dynamics and Trend of *Larix chinensis* in Northern Slope of Qinling Mountains Based on BIOME-BGC Model
热带亚热带植物学报. 2019, 27(3): 235–249 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4008>

[土壤有机碳形成机制的探索历程](#)

Exploration History of Soil Organic Carbon Formation Mechanisms
热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 481–490 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4094>

[氮磷添加对华南地区2种人工林土壤氮磷循环酶活性的影响](#)

Effects of Long-term Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Enzyme Activities Related N and P Cycle in Two Plantations in South China
热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 244–250 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4293>

[雷州半岛尾巨桉人工林土壤呼吸动态变化及其对气象因子的响应](#)

Soil Respiration of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation and Its Response to Meteorological Factors in Leizhou Peninsula
热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 346–354 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3833>

[广州红锥-马占相思林物种组成与多样性研究](#)

Studies on Species Composition and Diversity of *Castanopsis hystrix*-*Acacia mangium* Mixed Forest in Guangzhou
热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 494–502 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4361>

[向下翻页，浏览PDF全文](#)

橡胶人工林碳储量变化和固碳潜力分析

熊子蕙¹, 王旭^{1*}, 杨怀², 翁国杰¹, 吴昊¹, 于磊¹, 马优¹

(1. 海南大学生态与环境学院, 海口 570228; 2. 国际竹藤中心三亚研究基地, 海南 三亚 572000)

摘要: 研究不同林龄橡胶林(*Hevea brasiliensis*)碳储量变化对了解橡胶林生态系统固碳潜力和碳循环过程具有重要意义。该研究以海南省儋州市不同林龄橡胶林为研究对象, 分析不同林龄(6、12、18、23、27、35 a)橡胶林生长过程中乔木层、林下植被、枯落物、土壤及生态系统碳储量的变化, 比较橡胶林生态系统固碳速率与固碳潜力。结果表明, 乔木层碳储量为14.87~63.53 t C/hm², 依次为35 a>27 a>23 a>18 a>6 a。林下植被碳储量为0.30~0.75 t C/hm², 35 a林下植被碳储量显著高于其他林龄。枯落物碳储量为1.72~2.03 t C/hm², 18 a和35 a林的枯落物碳储量最高。土壤碳储量为81.21~156.68 t C/hm², 依次为27 a>18 a>23 a>12 a>35 a>6 a。在35 a的生命周期中有25.27 t C/hm²被固定在土壤中, 存在一个以碳固定为主到碳排放为主的转变过程。橡胶林生态系统总碳储量为98.30~214.74 t C/hm², 依次为27 a>18 a>23 a>35 a>12 a>6 a。6 a幼林龄碳储量显著低于27 a成熟林。土壤和乔木层碳储量是橡胶林的重要碳库, 分别占生态系统总碳储量的68.16%~91.27%和16.71%~40.59%, 枯落物碳储量小于2.1%, 林下植被小于1%。橡胶林生态系统具有较大的固碳速率和固碳潜力, 是营造高效固碳人工林、推动区域有效减排战略的理想树种。

关键词: 橡胶林; 碳储量; 固碳速率; 生态系统

doi: 10.11926/jtsb.4860

CSTR:32235.14.jtsb.4860

Analysis of Carbon Stock Changes and Carbon Sequestration Potential in Rubber Plantation

XIONG Zihui¹, WANG Xu^{1*}, YANG Huai², WENG Guojie¹, WU Hao¹, YU Lei¹, MA You¹

(1. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Sanya Research Base of International Centre for Bamboo and Rattan, Sanya 572000, Hainan, China)

Abstract: It is of great significance to study the carbon storage changes of rubber forest (*Hevea brasiliensis*) at different ages for understanding the carbon sequestration potential and carbon cycling process in rubber plantation ecosystems. Rubber forests of different ages (6, 12, 18, 23, 27, 35 years old) in Danzhou City, Hainan Province were studied to analyze the changes of tree layer, understory vegetation, litter, soil and ecosystem carbon storage during the growth of rubber forests, and compare the carbon sequestration rate and carbon sequestration potential of rubber forest ecosystems. The results showed that the carbon stock in the tree layer ranged from 14.87 to 63.53 t C/hm², in the order of 35->27->23->18->6-years old. The carbon stock of understory vegetation ranged from 0.30 to 0.75 t C/hm², and which at 35 years old was significantly higher than that of other stands. The litter carbon stock ranged from 1.72 to 2.03 t C/hm², and which in the 18- and 35-year-old forests were the highest. Soil carbon stock varied from 81.21 to 156.68 t C/hm² in the order of 27->18->23->12->35->6-years old. During the life cycle of 35 years, approximately 25.27 t C/hm² of carbon was fixed in the soil, and there is a transition process from carbon fixation to carbon emission. The total carbon stock of rubber forest ecosystems ranged from

收稿日期: 2023-10-21 接受日期: 2024-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD2200404)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFD2200404).

作者简介: 熊子蕙(1998年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为热带森林生态学。E-mail: xiongzihui23@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 990991@hainan.edu.cn

98.30 to 214.74 t C/hm² in the order of 27->18->23->35->12->6-years old. Notably, the carbon storage of 6-years old plantation was significantly lower than that of 27-years old mature plantation. Carbon storage in soil and tree layer was an important carbon reservoir of rubber forest, accounting for 68.16%–91.27% and 16.71%–40.59% of the total ecosystem carbon storage, which in litter was less than 2.1%, and that in understory was less than 1%. Rubber forest ecosystem had a high carbon sequestration rate and carbon sequestration potential, which was an ideal tree for building efficient carbon sequestration plantation and promoting regional effective emission reduction strategy.

Key words: Rubber plantation; Carbon sequestration; Carbon sequestration rate; Ecosystem

橡胶(*Hevea brasiliensis*)原产于亚马逊热带雨林, 由于其所产胶乳是重要的工业原料而广泛种植于全球的热带地区, 目前在全球总种植面积已达到 9.66×10^6 hm²[1-2]。随着气候变化的强烈影响对人类社会造成越来越大的负面效益, 人类社会对于控制碳排放的意愿逐渐增强, 关于核算森林碳储量、增加碳汇、控制碳排放的政治和经济需求逐渐增加[3-4]。橡胶林作为重要人工林, 种植面积较广, 能够提供可观的碳汇, 且在种植园开垦期间因造成土地覆盖类型的变化而强烈影响碳汇[5]。在 2000—2010 年间, 热带森林砍伐和土地利用变化释放了多达 1 Pg C/a[6]。热带森林向橡胶种植园的转变广泛发生在包括中国海南在内的东南亚大陆[7]。因此, 准确核算橡胶林碳储量对明确土地覆盖类型的改变对碳源或碳汇的影响、满足碳交易的经济需求和实现减源增汇的现实需求具有重要意义。

目前关于橡胶林碳储量的研究主要集中在土壤碳储量[7-8]和地上生物量[9-11], 对于包括林下植被、地下生物量、枯落物和整体碳库的变化研究仍较为欠缺, 而这些对于评估林分变化所造成的碳汇差异具有重要意义[12]。相当多的研究根据异速生长关系模型建立了关于地上生物量和林木特征的回归方程[13-15], 但对于凋落物、根等地下生物量的数据较少。此外, 关于林分各部分生物量随时间增长的碳储量变化研究仍存在一些争议, Mandal 等[16]研究表明橡胶林土壤碳储量随种植年份的增加而增加, 且橡胶的种植增强了园区土壤的碳固存能力; 而 Saengruksawong 等[17]认为土壤碳储量随着橡胶种植年份浮动变化。因此, 研究不同林龄橡胶林碳储量变化有利于更好地了解碳循环过程和各层次的固碳能力。

本研究对海南省儋州市 6 种林龄的橡胶林样地进行调查, 计算了乔木层、林下植被层、枯落物和土壤层的碳储量, 比较橡胶林各层次的碳储量并分

析其随林龄的变化特征。估算研究区橡胶林生态系统的固碳速率, 并利用不同林分的碳密度进一步计算成熟橡胶林生态系统的固碳潜力, 以期为系统评估人工林因土地覆盖类型变化而对碳收支所造成的影响提供理论基础, 并为估算区域碳排放、橡胶林生态系统的固碳效益提供科学指导。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

儋州市地处海南省西部, 位于 19°11'~19°52' N, 108°56'~109°46' E, 地貌以山丘为主, 整体地形东南高、西北低。处于东亚大陆季风气候区南缘, 属热带湿润季风气候, 年平均温度 23.5 °C, 年降雨量 900~2 200 mm, 全年雨量充沛, 日照充足, 满足热带作物生长的需要。试验区土壤以砖红壤为主, 为人工经营管理的橡胶林, 选择橡胶林纯林作为研究对象, 橡胶纯林林下无作物种植, 灌木少, 多为草本。林下植被主要有宽叶十万错(*Asystasia gangetica*)、海南杜仲藤(*Parabarium hainanense*)、鸡矢藤(*Paderia scandens*)、火炭母(*Polygonum chinense*)、假蒟(*Piper sarmentosum*)、微甘菊(*Mikania micrantha*)、蜚蜞菊(*Wedelia chinensis*)、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)、番薯(*Ipomoea batatas*)、金丝草(*Pogonatherum crinitum*)等。

1.2 样地设置

2023 年 5 月在海南省儋州市那大镇三队试验区选择不同林龄的橡胶林设置 6 个样地(表 1), 林龄分别为 6、12、18、23、27、35 a, 每个样地设 3 个调查样方, 各样方间距离大于 20 m。

1.3 方法

1.3.1 乔木层

乔木层年均碳吸收率参考 Sun 等[18]的方法, 2 个年份间林型碳储量的变化量总和除以年数, 即为

表 1 橡胶人工林样地基本情况

Table 1 Basic information of rubber plantation plots

林龄 (a) Stand age	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	海拔(m) Elevation	坡向 Aspect	坡度 (°) Slope	坡位 Slope position	郁闭度 Canopy density	密度 Density (m×m)	树高 (m) Height	胸径 (cm) Diameter at breast height
6	109°28'28.15"	19°32'42.46"	150	无	0	无	0.45	3×7	5.47	13.87
12	109°28'24.45"	19°32'41.72"	155	无	0	无	0.55	3×7	18.56	17.84
18	109°29'8.24"	19°32'11.39"	122	东南	1	下	0.60	3×7	17.90	22.11
23	109°28'40.00"	19°33'2.46"	139	北	1	下	0.55	3×7	20.03	24.05
27	109°28'31.85"	19°32'44.41"	144	无	0	无	0.50	3×7	16.63	24.86
35	109°28'25.28"	19°32'29.17"	147	无	0	无	0.45	3×7	16.96	26.37

年均碳吸收率。考虑橡胶树生长的地区差异性以及适用范围, 本研究采用橡胶树生物量方程^[19]计算乔木干、枝、叶、根的生物量(表 2)。

表 2 橡胶树胸径(D)和生物量(W)关系方程

Table 2 Equations between diameter at breast height (D) and biomass (W) of rubber trees

回归方程 Regression equation	相关系数 (r) Correlation coefficient
$W_{\text{干}}=0.0456D^{2.3076}$	0.9913
$W_{\text{枝}}=0.0103D^{2.2034}$	0.9836
$W_{\text{叶}}=0.0065D^{2.3409}$	0.9036
$W_{\text{根}}=0.0235D^{2.0066}$	0.9712
$W_{\text{总}}=0.0679D^{2.6431}$	0.9945

1.3.2 林下植被和枯落物

林下植被和枯落物生物量的测定采用全收获法和调查法, 在样地内分别设置 3 个 20 m×20 m 样方, 每个样方设置 3 个 1 m×1 m 草本、枯落物调查单元。随机选取 1 个草本、枯落物调查单元, 收获调查单元内的所有草本、枯落物, 其中草本分地上部分和地下部分分别收获, 称量鲜重, 将样品带回实验室置于烘箱中(80 °C)烘干, 称量干重。

1.3.3 土壤样品

每个样地设置 3 个样方, 在样方内使用内径>5 cm 的土钻, 按照五点取样法在 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层取样, 每个土层随机钻取 5 钻土, 将其混合为一个土样, 风干和过筛后测定有机碳含量。在每个样地内按 1 m×1 m×1 m 的标准挖取土壤剖面, 在剖面 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层处用 100 cm³ 环刀取土样, 测定土壤容重。

1.3.4 碳含量测定

采用重铬酸钾外加热法(LY/T 1237—1999)测定植物总碳和土壤总有机碳, 将烘干的林下植被和

枯落物粉碎, 过 80 目筛后测定碳含量。

1.3.5 碳储量计算

生态系统各层次(乔木层、林下植被、枯落物)的碳储量通过其生物量和碳含量计算得到, 橡胶树各器官的含碳率采用前人^[19-22]测定结果的均值。土壤碳储量根据土壤容重和碳含量计算: $S_{\text{SOD}} = \sum_i^n (R_i \times D_i \times C_i)$, 式中, S_{SOD} 为特定深度的土壤碳储量(t/hm²), R_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³), D_i 为第 i 层土壤厚度(cm), C_i 为第 i 层土壤碳含量(g/kg), n 为土层数。

1.3.6 固碳速率和固碳潜力的初步计算

根据《中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力研究调查规范》计算橡胶林生态系统的固碳速率和固碳潜力。橡胶林固碳潜力=橡胶成熟人工林碳密度-橡胶人工林平均碳密度。固碳速度的估算方法, 即用不同时期森林生态系统碳储量变化量来估算固碳速率。基本公式为 $\text{CSR}=(C_2-C_1)/(t_2-t_1)$, 式中, CSR 为固碳速率; t 为时间, 单位为 a; C_1 为 t_1 年林分碳密度; C_2 为 t_2 年林分碳密度。

1.4 数据处理

统计分析采用 SPSS 26 对不同林龄乔木层、林下植被、枯落物、土壤碳储量进行差异显著性分析(单因素 ANOVA 检验), 显著性水平设为 0.05。图表制作采用 Origin 软件。

2 结果和分析

2.1 橡胶林乔木层碳储量及其变化

乔木层碳储量为 14.87~63.53 t C/hm², 依次为 35 a>27 a>23 a>18 a>6 a(图 1)。乔木层碳储量由 6 a 人工林的 14.87 t C/hm² 增加到 35 a 的 63.53 t C/hm², 6~23 a 林龄年均碳吸收率最大, 12~18 a 林龄年均碳

吸收率达到峰值, 年均速率为 2.72 t C/hm²。此后 23~27 a 和 27~35 a 乔木层碳的固存速率稳定降低, 分别为 1.01 和 0.99 t C/(hm²·a) (图 2)。

2.2 林下植被和枯落物碳储量

林下植被碳含量为 321.92~385.77 g/kg, 碳储量为 0.30~0.75 t C/hm², 6 a 橡胶林林下植被碳储量显著低于成熟林, 35 a 林下植被碳储量显著高于其他林龄。枯落物碳含量为 327.77~411.52 g/kg, 碳储量为 1.72~2.03 t C/hm², 18 a 和 35 a 林龄枯落物碳储量最高(表 3)。

2.3 土壤碳储量及其变化

6~35 a 橡胶林土壤碳储量大小依次为 27 a>18 a>23 a>12 a>35 a>6 a, 分别为 156.68、149.92、131.86、127.04、106.68、81.21 t/hm²(图 3)。考虑到 6~35 a 的年龄序列, 6~18 a 橡胶林土壤碳储量增加, 相当于 68.71 t/hm² 碳被固定在土壤中; 18~35 a 土壤碳储量先增加后降低, 有 43.24 t/hm² 土壤碳被释放。可见, 在 35 a 的生命周期中橡胶林土壤碳储量有 25.27 t C/hm² 被固定, 存在一个以碳固定为主到碳排放为主的转变过程。6~35 a 林龄 20~40、40~60 cm 土层土壤固碳量最大, 为 8.79~7.53 t C/hm²(图 4)。

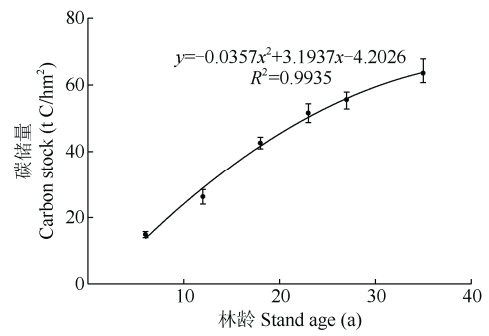


图 1 橡胶林乔木层碳储量

Fig. 1 Carbon stock in tree layer of rubber plantations

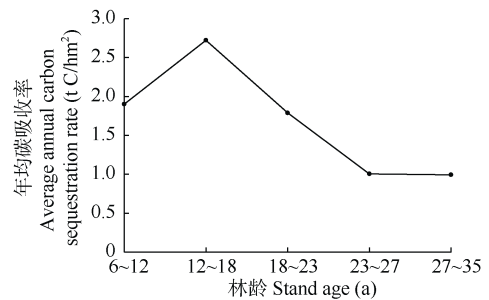


图 2 橡胶林乔木层年均碳吸收率的变化

Fig. 2 Changes in average annual carbon sequestration rate in tree layer of rubber plantations

表 3 林下植被和枯落物碳含量和碳储量

Table 3 Carbon content and carbon stock of understory vegetation and litters

林龄 (a) Stand age	林下植被 Understorey vegetation		枯落物 Litter	
	碳含量 Carbon content (g/kg)	碳储量 Carbon stock (t C/hm ²)	碳含量 Carbon content (g/kg)	碳储量 Carbon stock (t C/hm ²)
6	355.01±14.93e	0.30±0.08e	399.43±8.21b	1.91±0.04ab
12	321.92±12.50bc	0.59±0.03bc	327.77±24.28c	1.75±0.13bc
18	335.65±10.17b	0.62±0.03b	411.52±12.59b	2.03±0.06a
23	385.77±17.55d	0.43±0.02d	461.05±7.51a	1.72±0.03c
27	372.63±12.04c	0.58±0.02c	350.29±22.45c	1.89±0.12ab
35	352.75±11.22a	0.75±0.03a	393.13±8.59b	1.98±0.04a

同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同

Data followed different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below

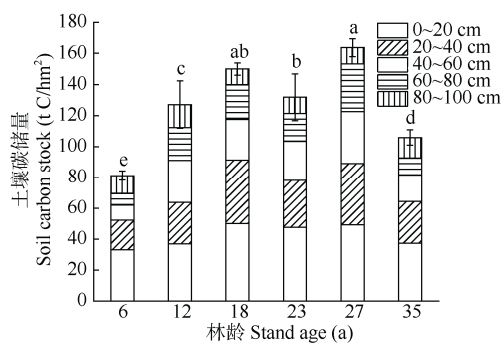


图 3 橡胶林土壤碳储量

Fig. 3 Soil carbon stock in rubber plantations

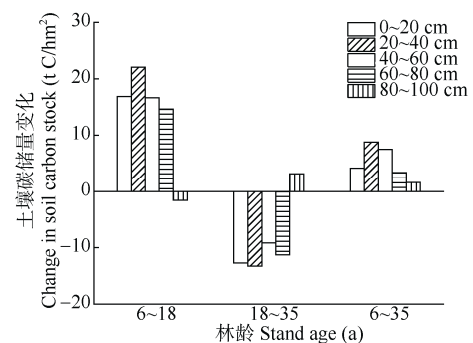


图 4 不同林龄间土壤碳储量的变化

Fig. 4 Changes in soil carbon stock among different stand ages

2.4 橡胶林生态系统总碳储量变化

橡胶林生态系统总碳储量为 98.30~214.74 t C/hm², 均值为 170.40 t C/hm² (表 4), 总体上呈先上升后降低的趋势, 6~35 a 总碳储量依次为 27 a>18 a>23 a>35 a>12 a>6 a。6 a 幼林龄碳储量(98.30 t C/hm²)显著低于 27 a 成熟林(214.74 t C/hm²)。土壤和乔木层碳储量是橡胶林的两大碳库, 分别占生态系统总碳储量的 68.16%~91.27%和 16.71%~40.59%, 枯落物碳储量占比小于 2.1%, 林下植被占比小于 1% (图 5)。

2.5 生态系统固碳速率和固碳潜力估算

橡胶林植被层固碳潜力为 13.18 t C/hm², 固碳速率为 1.68 t C/(hm²·a); 橡胶林生态系统固碳潜力

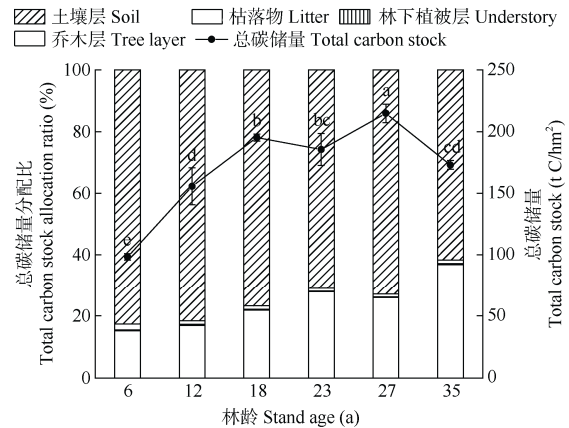


图 5 橡胶林生态系统总碳储量分配比

Fig. 5 Total carbon stock allocation ratio of rubber plantation ecosystems

表 4 橡胶林生态系统的总碳储量(t C/hm²)

Table 4 Total carbon stock (t C/hm²) of rubber plantation ecosystems

林龄 Age (a)	乔木层 Tree layer	林下植被 Understory	枯落物 Litter	土层 Soil layer (cm)					生态系统 Ecosystem
				0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
6	14.87±0.94e	0.30±0.08e	1.91±0.04ab	33.09±2.43c	19.20±3.08c	9.62±1.11d	7.76±0.77d	11.54±0.62bc	98.30±2.60e
12	26.28±2.25d	0.59±0.03bc	1.75±0.13bc	36.83±7.47bc	26.98±3.36b	27.31±0.79b	21.14±3.72b	14.78±1.80a	155.66±14.93d
18	42.62±1.73c	0.62±0.03b	2.03±0.06a	49.96±3.15a	41.25±0.37a	26.30±3.20b	22.42±0.81b	9.99±1.20c	195.19±2.84b
23	51.57±2.79b	0.43±0.02d	1.72±0.03c	47.54±1.67a	30.55±4.32b	25.29±4.62b	18.13±8.21bc	10.35±0.65c	185.57±12.90bc
27	55.59±2.25b	0.58±0.02c	1.89±0.12ab	42.29±3.25ab	39.83±2.39a	33.37±1.10a	30.87±0.91a	10.32±0.60c	214.74±7.49a
35	63.53±4.29a	0.75±0.03a	1.98±0.04a	37.25±2.11bc	27.99±0.64b	17.15±1.37c	11.14±3.47cd	13.15±2.42ab	172.94±3.56cd

为 44.34 t C/hm², 固碳速率为 3.14 t C/(hm²·a), 具有较强的固碳潜力。

3 讨论和结论

乔木层作为橡胶林的重要碳库, 其碳储量随林龄的变化不断增长。6~23 a 林龄碳吸收率最大, 12~18 a 达到峰值, 23~27 和 27~35 a 乔木层碳的固存速率稳定降低, 与 Sun 等^[18]乔木层碳储量变化一致。人工林建立初期, 橡胶林进行光合作用用于自身的生长, 植被生产力高, 生物量积累速率快, 因此 6~23 a 具有较高的固碳速率。23~35 a 乔木层固存速率降低的原因可能是生物量积累速率趋于稳定。林下植被与枯落物在总碳储量中占比较少, 但仍不可或缺的部分。本研究中橡胶林属于纯林, 林下植被较少, 且受胶园管理影响较为严重。橡胶林每年都会有一次全面的落叶, 进行养分分解及转化^[23], 枯落物不仅具有固碳意义, 还是胶园生态系统中的物质循环和能量流动的关键环节^[24]。

橡胶林土壤碳储量受到土壤水分、土壤质地、地表凋落物分解速率、林下植被死亡与分解速率、

根系代谢、土壤微生物活动、土壤呼吸等因素影响。本研究区土壤碳储量为 81.21~156.68 t C/hm², 与朱美玲^[25]海南橡胶林的土壤碳储量(70.45~162.41 t C/hm²)结果相近, 但比庞家平^[26]西双版纳橡胶林的土壤碳储量(129.17~251.65 t C/hm²)低, 这可能是海南儋州气候特点和土壤母质造成, 砖红壤偏酸性, 质地分散性大, 形成的团聚体不稳固, 加之高温多雨气候, 导致砖红壤区风化淋溶系数高^[27], 因此碳储量较低。6 a 生橡胶林土壤碳储量最低, 可能是由于冠层覆盖率低引起的高呼吸^[18,28], 林下地表大面积裸露, 土壤侵蚀和水土流失的风险高^[29], 土壤碳储量的增加以消耗土壤水为代价, 水土流失会导致土壤碳储量降低^[30]。随着橡胶树的生长和植被的发育, 12~18 a 橡胶林土壤碳储量逐渐增加, 这可能是由于土壤水源涵养能力好^[31], 土壤保水性能增强^[8], 地表凋落物增多, 分解速率加快, 土壤微生物数量增加及活动能力增强^[32], 此外, 土壤呼吸速率高^[22]。当橡胶林进入成熟阶段(23~27 a), 橡胶树的生长速度逐渐减缓, 有机质的输入量相对稳定, 有机质分解速率和碳储存稳定性增加, 形成动态平衡。过熟林(35 a)土壤碳储量降低, 这是由于胶园橡胶生长处于衰退

阶段, 叶面积指数减小, 凋落物相应减少, 有效存活株数减少, 土壤保水保肥性能下降^[33], 土壤中含碳物质分解迁移蓄积的缘故^[22]。

与云南西双版纳相比, 海南橡胶林生态系统总碳储量偏低, 这可能与环境条件有关, 海南岛橡胶林多受台风袭扰, 经常遭受严重的风害^[34], 例如树木连根拔起、断枝和落叶^[35], 导致乔木层碳储量损失。与海南吊罗山热带雨林^[36]和西双版纳热带季节雨林^[37]相比, 橡胶林碳储量较低。土地利用的变化, 特别是森林向人工林和农业用地的转变, 会消耗土壤碳^[38]。由此推测当热带森林被砍伐, 向橡胶林转变后, 生态系统各碳库碳储量开始下降, 随橡胶林的种植年限逐渐上升, 至少经历 27 a 才能达到动态平衡。橡胶林已被证明是碳汇, 但如果从热带森林的砍伐开始, 考虑橡胶种植园的完整生命周期, 橡胶园作为大型碳汇的假设不被支持^[39]。

合理的胶园种植密度、间伐和更新周期, 以及合理的胶园碳排放监测和管理, 都可以帮助提高橡胶林的固碳速率。科学的管理和优化橡胶林的林分结构、植被多样性和土壤管理等因素, 可以进一步提高橡胶林的固碳潜力, 为营造高效固碳人工林、推动区域的有效减排战略提供重要支持。

参考文献

- [1] VENKATACHALAM P, GEETHA N, SANGEETHA P, et al. Natural rubber producing plants: An overview [J]. *Afr J Biotechnol*, 2013, 12(12): 1297–1310.
- [2] SINGH A K, LIU W J, ZAKARI S, et al. A global review of rubber plantations: Impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 796: 148948. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148948.
- [3] BISPO A, ANDERSEN L, ANGERS D A, et al. Accounting for carbon stocks in soils and measuring GHGs emission fluxes from soils: Do we have the necessary standards? [J]. *Front Environ Sci*, 2017, 5: 41. doi: 10.3389/fenvs.2017.00041
- [4] RICHARDS D R, THOMPSON B S, WIJEDASA L. Quantifying net loss of global mangrove carbon stocks from 20 years of land cover change [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 4260. doi: 10.1038/s41467-020-18118-z.
- [5] HOUGHTON R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000 [J]. *Tellus B*, 2003, 55(2): 378–390. doi: 10.1034/j.1600-0889.2003.01450.x.
- [6] YANG X Q, BLAGODATSKY S, LIPPE M, et al. Land-use change impact on time-averaged carbon balances: Rubber expansion and reforestation in a biosphere reserve, south-west China [J]. *For Ecol Manage*, 2016, 372: 149–163. doi: 10.1016/j.foreco.2016.04.009.
- [7] TORIYAMA J, IMAYA A, HIRAI K, et al. Effects of forest conversion to rubber plantation and of replanting rubber trees on soil organic carbon pools in a tropical moist climate zone [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2022, 323: 107699. doi: 10.1016/j.agee.2021.107699.
- [8] WU Z X, XIE G S, TAO Z L, et al. Characteristics of soil organic carbon in rubber plantations at different ages [J]. *Chin J Trop Crops*, 2009, 30(2): 135–141. [吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 等. 不同树龄橡胶树林地土壤有机碳含量与储量特征 [J]. *热带作物学报*, 2009, 30(2): 135–141. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2009.02.004]
- [9] JIA K X, ZHENG Z, ZHANG Y P. Changes of rubber plantation aboveground biomass along elevation gradient in Xishuangbanna [J]. *Chin J Ecol*, 2006, 25(9): 1028–1032. [贾开心, 郑征, 张一平. 西双版纳橡胶林生物量随海拔梯度的变化 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1028–1032.]
- [10] CAO J H, JIANG J S, LIN W F, et al. Biomass of *Hevea* clone PR107 [J]. *Chin J Trop Agric*, 2009, 29(10): 1–8. [曹建华, 蒋菊生, 林位夫, 等. 巴西橡胶树 PR107 生物量研究初探 [J]. *热带农业科学*, 2009, 29(10): 1–8. doi: 10.3969/j.issn.1009-2196.2009.10.001.]
- [11] SONG Q H, ZHANG Y P. Biomass, carbon sequestration and its potential of rubber plantations in Xishuangbanna, southwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2010, 29(10): 1887–1891. [宋清海, 张一平. 西双版纳地区人工橡胶林生物量、固碳现状及潜力 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(10): 1887–1891. doi: 10.13292/j.1000-4890.2010.0289.]
- [12] WAUTERS J B, COUDERT S, GRALLIEN E, et al. Carbon stock in rubber tree plantations in Western Ghana and Mato Grosso (Brazil) [J]. *For Ecol Manage*, 2008, 255(7): 2347–2361. doi: 10.1016/j.foreco.2007.12.038.
- [13] ZHOU Z Z, ZHENG H S, YIN G T, et al. Biomass equations for rubber tree in southern China [J]. *For Res*, 1995, 8(6): 624–629. [周再知, 郑海水, 尹光天, 等. 橡胶树生物量估测的数学模型 [J]. *林业科学研究*, 1995, 8(6): 624–629.]
- [14] TANG J W, PANG J P, CHEN M, et al. Biomass and its estimation model of rubber plantations in Xishuangbanna, southwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28(10): 1942–1948. [唐建维, 庞家平, 陈明, 等. 西双版纳橡胶林的生物量及其模型 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 1942–1948.]
- [15] CHEN Z Z, CHEN Y Q, CHEN X H, et al. Establishment of above-ground biomass models based on different predictors for *Hevea brasiliensis* [J]. *J NW For Univ*, 2020, 35(4): 45–50. [陈宗铸, 陈毅青, 陈

- 小花, 等. 基于不同预测变量的橡胶树地上生物量模型 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 45–50. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.04.08.]
- [16] MANDAL D, ISLAM K R. Soil carbon sequestration under rubber plantations in north-east India [M]// LAL R, SIVAKUMAR M V K, FAIZ S M A, et al. Climate Change and Food Security in South Asia. Dordrecht: Springer, 2011: 433–444. doi: 10.1007/978-90-481-9516-9_26.
- [17] SAENGRUKSAWONG C, KHAMYONG S, ANONGRAK N, et al. Growths and carbon stocks of Para rubber plantations on Phonpisai Soil Series in northeastern Thailand [J]. Rubber Thai J, 2012, 1: 1–18.
- [18] SUN Y C, MA Y X, CAO K F, et al. Temporal changes of ecosystem carbon stocks in rubber plantations in Xishuangbanna, southwest China [J]. Pedosphere, 2017, 27(4): 737–746. doi: 10.1016/S1002-0160(17)60327-8.
- [19] MIAO X L. Study on the potential for carbon sequestration of artificial PR107 rubber forest ecosystem in rubber tree planting area of Qiongzong of Hainan [D]. Haikou: Hainan University, 2013. [缪晓乐. 海南省琼中植胶区 PR107 橡胶人工林生态系统固碳潜力研究 [D]. 海口: 海南大学, 2013.]
- [20] PENG Y. Researches on carbon sequestration function of plant subsystem in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation ecosystem in western Hainan [D]. Haikou: Hainan University, 2010. [彭懿. 海南岛西部橡胶人工林生态系统植物亚系统碳汇功能研究 [D]. 海口: 海南大学, 2010.]
- [21] WANG C Y, CHEN Q B, PENG Y, et al. Analysis on the carbon content of different organs of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) in regeneration period [J]. Chin J Trop Crops, 2011, 32(4): 587–591. [王春燕, 陈秋波, 彭懿, 等. 老龄橡胶树不同器官含碳率分析 [J]. 热带作物学报, 2011, 32(4): 587–591. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2011.04.004.]
- [22] WU Z X. Carbon balance of the rubber plantation ecosystem in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2013. [吴志祥. 海南岛橡胶林生态系统碳平衡研究 [D]. 海口: 海南大学, 2013.]
- [23] YANG X M. Carbon storage and density of natural *Pinus shekannensis* forest in Ziwuling area [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. [杨晓梅. 子午岭天然柴松林碳储量与碳密度研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.]
- [24] MIAO X L, JIANG J S, WANG C Y, et al. Comparison of annual returned carbon content of litters and annual carbon emission of the rubber trees of different ages [J]. Ecol Sci, 2012, 31(6): 625–630. [缪晓乐, 蒋菊生, 王春燕, 等. 不同年龄橡胶树枯落物碳归还量及年释放量比较 [J]. 生态科学, 2012, 31(6): 625–630.]
- [25] ZHU M L. Research of carbon and nitrogen storage of rubber and eucalyptus plantations in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2016. [朱美玲. 海南岛橡胶树、桉树人工林生态系统碳氮储量研究 [D]. 海口: 海南大学, 2016.]
- [26] PANG J P. Carbon storage and its allocation of rubber plantation in Xishuangbanna, southwest China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009. [庞家平. 西双版纳橡胶林的碳储量及其分配格局 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.]
- [27] GUAN L M. Soil carbon budgets of rubber plantations ecosystems in the western region of Hainan [D]. Haikou: Hainan University, 2012. [管利民. 海南西部橡胶人工林生态系统土壤碳收支研究 [D]. 海口: 海南大学, 2012.]
- [28] LUO Q P, LIU W J. Comparison of the effect of different canopy of rubber plantation on soil splash erosion and throughfall erosivity [J]. Chin J Soil Sci, 2012, 43(6): 1348–1354. [罗亲普, 刘文杰. 不同橡胶林林冠下的土壤溅蚀率及穿透水侵蚀力比较 [J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1348–1354. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2012.06.012.]
- [29] SUN Y C, MA Y X, CAO K F, et al. Impacts of long-term rubber plantation on soil carbon and nitrogen sequestration in Xishuangbanna [J]. Chin J Soil Sci, 2015, 46(2): 412–419. [孙燕瓷, 马友鑫, 曹坤芳, 等. 西双版纳长期橡胶种植对土壤固碳和氮的影响研究 [J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 412–419. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2015.02.024.]
- [30] YANG W J. The soil water and carbon sequestration of *Pinus sylvestris* forest in different afforestation ages in Mu Us desert [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. [杨雯锦. 毛乌素沙地不同林龄樟子松林地土壤水分及固碳效应的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. doi: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2020.000409.]
- [31] DONG A T. The research on soil physico-chemical properties and water source conservation function from different age rubber plantation in Xishuangbanna [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016. [董安涛. 西双版纳不同林龄橡胶林土壤特征及水源涵养功能研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.]
- [32] ZHAO L L, WU Z X, SUN R, et al. Soil organic carbon composition and its influencing factors in rubber plantation of different ages [J]. J S Agric, 2021, 52(6): 1595–1603. [赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 不同龄级橡胶林土壤有机碳组分及其影响因素 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1595–1603. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2021.06.019.]
- [33] WU Z X, XIE G S, TAO Z L, et al. Characteristics of soil carbon and total nitrogen contents of rubber plantations at different age stages in Danzhou, Hainan Island [J]. Ecol Environ Sci, 2009, 18(4): 1484–1491. [吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 等. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1484–1491. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2009.04.048.]
- [34] HUANG H J. Study on the typhoon impact on natural rubber forest yield and risk assessment model in Hainan [D]. Nanjing: Nanjing

- University of Information Science and Technology, 2022. [黄海静. 台风对海南天然橡胶林产量的影响及风险评估模型的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. doi: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2022.000207.]
- [35] XUE Y, YANG Z Y, CHEN Y Q, et al. Typhoon 'Rammasun' impact on forest ecosystem in Hainan [J]. *Trop For*, 2014, 42(4): 34–38. [薛杨, 杨众养, 陈毅青, 等. 台风“威马逊”干扰对森林生态系统的影响 [J]. *热带林业*, 2014, 42(4): 34–38.]
- [36] WANG W L. Phosphorus storage and dynamic change of tropical rain forest ecosystem in Diaoluoshan, nature reserve, Hainan island [D]. Haikou: Hainan University, 2016. [王文蕾. 海南吊罗山热带雨林生态系统碳氮磷储量及动态研究 [D]. 海口: 海南大学, 2016.]
- [37] LÜ X T. A study on carbon storage of tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Yunnan [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2006. [吕晓涛. 西双版纳热带季节雨林碳储量的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.]
- [38] ZHU X A, JIANG X J, SINGH A K, et al. Reduced litterfall and decomposition alters nutrient cycling following conversion of tropical natural forests to rubber plantations [J]. *Ecol Indic*, 2022, 138: 108819. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108819.
- [39] SONG Q H, TAN Z H, ZHANG Y P, et al. Do the rubber plantations in tropical China act as large carbon sinks? [J]. *Iforest-Biogeoosci For*, 2014, 7(1): 42–47. doi: 10.3832/ifor0891-007.