



自然保护地
Natural Protected Areas



国家林业和草原局 华东调查规划设计院

海南热带雨林国家公园森林生态系统碳储量及变化特征

刘 强, 周 璋, 陈德祥, 陈宗铸, 雷金睿, 许 涵, 吴桂林, 李意德

Carbon Storage and Its Change Characteristics of Forest Ecosystems in National Park of Hainan Tropical Rainforest, China

LIU Qiang, ZHOU Zhang, CHEN Dexiang, CHEN Zongzhu, LEI Jinrui, XU Han, WU Guilin, and LI Yide

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12335/2096-8981.2022122001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海南热带雨林国家公园海南长臂猿采食微生境选择 (<http://npa.net.cn/article/doi/10.12335/2096-8981.2021012602>)

Selection of Foraging Micro-Habitat for Hainan Gibbons (*Nomascus hainanus*) in Hainan Rainforest National Park

自然保护地. 2021, 1(3): 16-24

东北虎豹国家公园汪清县局自然资源资产价值核算研究 (<http://npa.net.cn/article/doi/10.12335/2096-8981.2020121001>)

Study on Value Accounting of Natural Resources Assets of Wangqing County Bureau of Siberian Tiger and Leopard National Park

自然保护地. 2021, 1(2): 49-57

钱江源国家公园生物多样性监测体系研究 (<http://npa.net.cn/article/doi/10.12335/2096-8981.2020121401>)

Study on Biodiversity Monitoring System of Qianjiangyuan National Park

自然保护地. 2021, 1(2): 58-67

云南国家公园: 探索、实践与展望 (<http://npa.net.cn/article/doi/10.12335/2096-8981.2020111801>)

Development of National Park in Yunnan: Exploration, Practices and Future Perspectives

自然保护地. 2021, 1(1): 13-21

我国国家公园理论与实践的发展历程 (<http://npa.net.cn/article/doi/10.12335/2096-8981.2021012102>)

The Development of the Theory and Practice of National Parks in China

自然保护地. 2021, 1(4): 27-37

大熊猫国家公园卧龙片区生态旅游实践研究 (<http://npa.net.cn/article/doi/10.12335/2096-8981.2020121501>)

Study on Eco-tourism Practices in Wolong Area of Giant Panda National Park

自然保护地. 2021, 1(2): 38-48



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12335/2096-8981.2022122001

海南热带雨林国家公园森林生态系统碳储量及变化特征

刘 强^{1,2} 周 璋^{3,4*} 陈德祥^{3,4} 陈宗铸⁵ 雷金睿⁵ 许 涵^{3,4} 吴桂林^{3,4} 李意德^{3,4}

(1. 国家林业和草原局华东调查规划院, 杭州 310019; 2. 海南省林业局(海南热带雨林国家公园管理局), 海口 570203; 3. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 4. 海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 海南乐东, 572542; 5. 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海口 571100)

摘要:【目的】为热带森林固碳增汇措施和精准评估海南生态碳汇对实现“碳中和”目标的贡献提供基础数据和科学依据。【方法】本研究利用最新的森林资源二类调查分布数据和野外监测样地调查资料, 采用空间统计分析等方法, 研究了海南热带雨林国家公园森林生态系统碳储量及其变化特征。【结果】结果表明: 国家公园森林生态系统总碳储量为 89.67 Tg, 其中植被、土壤和凋落物的碳储量分别为 39.38, 49.65 和 0.64 Tg, 所占比重依次为 43.92%, 55.37% 和 0.71%。森林生态系统平均碳密度为 158.62 Mg/hm², 其中植被层、凋落物和土壤碳密度分别为 95.91, 1.55 和 120.91 Mg/hm²。天然林和人工林生态系统碳储量分别为 77.41 和 12.26 Tg, 分别占总储量的 86.33% 和 13.67%。不同植被类型中, 热带雨林低地雨林和山地雨林的碳储量最高(73.94 Tg), 占总碳储量的 82.45%; 热带山地雨林的碳密度最高(289.52 Mg/hm²), 最低为灌木林(81.95 Mg/hm²)。海南热带雨林国家公园森林生态系统碳汇平均强度为 1.84 Tg/a。【结论】海南热带雨林国家公园森林生态系统具有较高的碳储量和碳密度, 固碳能力较强。未来应加强天然林保护和低效林生态修复, 进一步提升森林生态系统固碳增汇能力。

关键词: 国家公园; 热带雨林; 碳储量; 碳汇; 海南

中图分类号: S718.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-8981(2023)04-0001-10

刘强, 周璋, 陈德祥, 等. 海南热带雨林国家公园森林生态系统碳储量及变化特征[J]. 自然保护地, 2023, 3(4): 1-10.

LIU Qiang, ZHOU Zhang, CHEN Dexiang, et al. Carbon Storage and Its Change Characteristics of Forest Ecosystems in National Park of Hainan Tropical Rainforest, China[J]. Natural Protected Areas, 2023, 3(4): 1-10.

陆地生态系统具有固碳释氧、净化空气、涵养水源、保持水土和维持生物多样性等功能。其中, 固碳功能即碳汇功能, 在全球气候变化和“碳中和”背景下发挥着重要作用^[1]。陆地生态系统是地球生物圈三大碳库之一^[2], 在全球碳平衡中具有十分重要的意义, 它的微小改变就能导致大气 CO₂ 浓度的明显波动, 从而进一步影响全球气候的稳定^[3]。增强生态系统碳汇功能能有效减缓大气 CO₂ 浓度上升和全球气候变暖, 是实现“碳中和”

目标的重要途径。森林是陆地生态系统最大的碳储库, 占据了陆地生态系统地上碳库的 80%、地下碳库的 40%^[4-5], 对减缓全球气候变化、实现“双碳”目标具有重要作用^[1]。在全球各大陆地生态系统中, 森林相对于草地、湿地和农田等生态系统类型而言, 具有更强的碳汇能力与潜力, 中国森林生态系统是我国陆地生态系统的固碳主体, 贡献了约 80% 的固碳量^[6]。通过增强森林生态系统碳吸收能抵消源自化石燃料燃烧排放的 CO₂, 进

收稿日期: 2022-12-20; 修回日期: 2023-09-17

基金项目: 海南省财政海南热带雨林国家公园项目; 林草科技创新平台运行补助项目(2023132088)

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhouzhang315@126.com

而有效减缓全球变暖进程,因而被认为是实现“碳中和”目标最为经济、安全和有效的路径之一。因此,准确计量森林生态系统碳储量和碳汇的大小及摸清其变化趋势,不仅是当今全球气候变化领域研究的核心问题,也能够为我国实现“碳中和”目标提供科技支撑。

目前,对于全球或区域尺度上的森林碳储量和碳汇已经开展了大量的研究^[5,7-10]。在我国,有学者对全国和省、市不同尺度上的森林植被或生态系统的碳储量和碳密度也进行了相关研究^[1,9,11-12],这些研究大多是基于国家森林资源连续清查数据(一类调查)或森林资源规划设计调查数据(二类调查),采用生物量法及蓄积量法来估算森林碳储量水平,大多未细分至森林不同植被类型的碳储量。

海南岛是我国最大的热带岛屿,也是全球生物多样性保护的热点地区之一,拥有大面积的热带森林和丰富的物种资源,其巨大的固碳能力在全球碳循环和碳平衡中起着关键作用^[13]。曹军等^[14]利用1979—1993年海南森林资源二类调查数据的林分类型,结合材积源生物量法估算了海南岛近20年森林碳储量变化,显示出海南森林碳汇作用显著;张懿铨等^[15]同样利用1993年森林资源二类调查数据分析了不同植被分类系统造成的碳储量差异。但以上研究均未涉及土壤碳库。Ren等^[13]则结合1993—2008年四期的国家森林资源清查数据和实测数据,估算了海南森林生态系统碳储量的分布格局。但经过10余年的森林保育,特别是随着海南热带雨林国家公园建设的推进,海南森林资源的量与质已发生较大变化,森林覆盖率已从2008年58.5%上升至2021年的62.1%,森林蓄积量从2008年0.79亿 m^3 增加到1.61亿 m^3 ^[16]。热带雨林作为一个生物量最大的陆地生态系统,在全球碳循环中扮演着十分重要的角色。海南热带雨林国家公园是国宝,是水库、粮库、钱库,更是碳库。在此背景下,本研究结合森林资源调查数据和样地调查数据,对海南热带雨林国家公园不同森林生态系统类型的碳储量和碳汇

进行测算,旨在完善目前国家公园区域的森林碳储量现状分析,为热带森林固碳增汇措施和精准评估海南生态碳汇对实现“碳中和”目标的贡献提供基础数据和科学依据。

1 研究区概况

海南热带雨林国家公园位于海南岛中部山区,地处南北热量和东西水分分界的交汇处(图1),生态系统类型以热带雨林为主。国家公园总面积4269 km^2 ,约占海南陆域总面积的13%。年均气温25 $^{\circ}\text{C}$,年降水量1700~2700 mm ,森林覆盖率为95.85%,涵盖了海南岛95%以上的原始林和55%以上的天然林,拥有中国分布最集中、保存最完好、连片面积最大的热带雨林。初步统计有野生维管植物3653种,各类保护植物432种,陆栖脊椎动物540种^[17]。

2 数据来源与研究方法

2.1 空间数据来源及处理

本研究森林生态系统植被类型空间分布以2021年海南省第三次森林资源二类调查小班矢量数据为数据源,并采用中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的ASTER GDEM数据产品(空间分辨率为30 m)进行校准,参考海南植被分类体系^[17],按照“起源”“自然度”“优势树种”和“林龄”等林分要素,对主要森林类型进行归类并统计其分布面积。

2.2 地面调查

2.2.1 样地调查与碳密度测定

1) 样地设置

利用海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站和其长期实验观测数据,统筹考虑海南森林生态系统主要植被类型面积及分布、起源、群系/群系组,设置调查样区,在每个样区内设置3个调查样地(其中一个为复查样地)。天然林样地大小为1200~10000 m^2 ,人工混交林为900 m^2 ,人工纯林的样地面积为600 m^2 ,将每个样地划分

海南热带雨林国家公园分布图

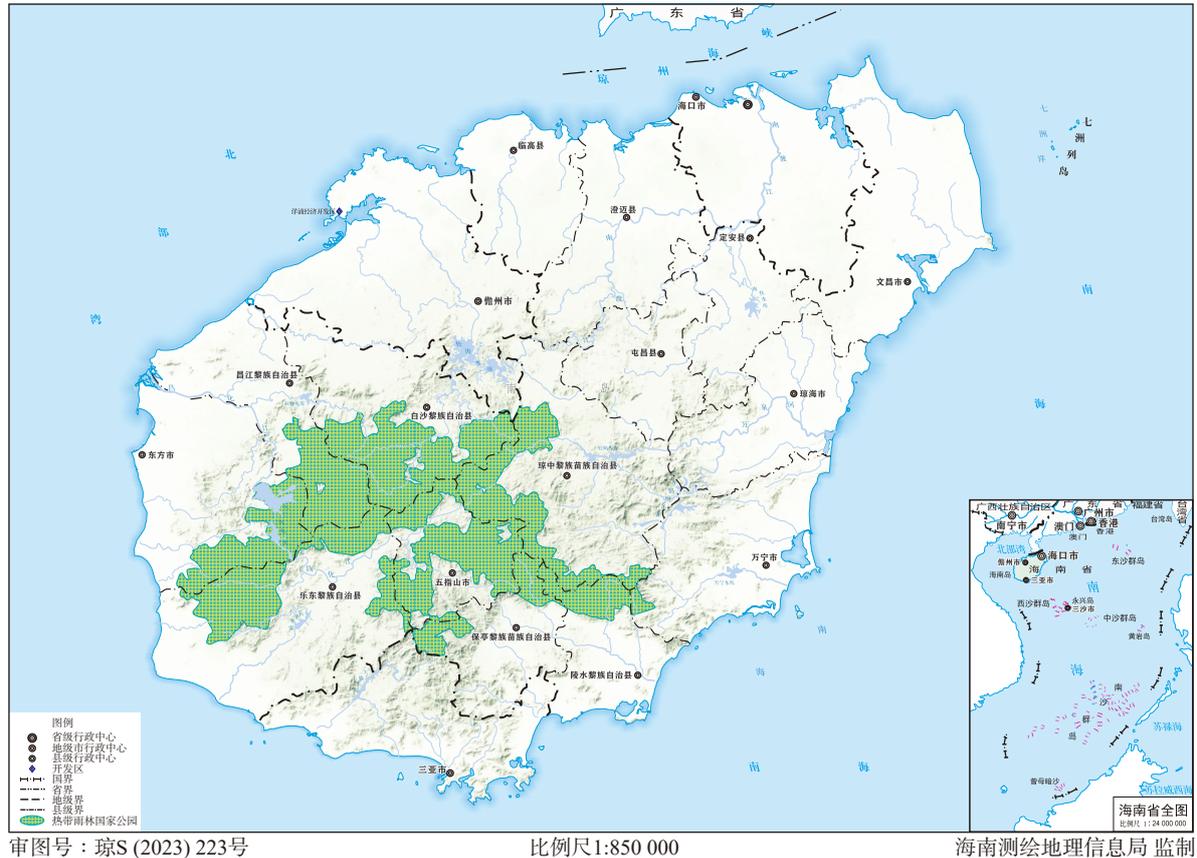


图1 研究区位置

Fig. 1 The location of the research area

为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的若干个样方。

2) 植被和凋落物碳

测量样方内所有胸径 $\geq 3.0\text{ cm}$ 活立木的胸径和树高,并记录物种名。利用相关生长方程计算每株树的生物量,其中乔木层地上生物量为乔木茎、枝和叶生物量的总和,乔木层地下生物量为乔木根生物量。由于全岛绝大部分森林禁止砍伐,无法对样地内树种进行生物量方程构建,故通过文献检索,利用海南热带森林地区对应树种的生物量方程,以 0.5 作为碳转换系数将树木生物量换算为生物量碳^[18],对样地内不同树种的生物量进行估算。将样方内所有乔木生物量碳加和后,根据样方面积计算单位面积的碳储量碳密度 (Mg/hm^2)。在样方内随机选取 3 个 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的小样方,连根收割小样方内所有灌木(含乔木幼树幼苗)和草本,测定鲜质

量,并取样带回实验室,在 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量后,测定含水率,分别计算其地上生物量和地下生物量。灌木和草本层样品经研磨后用元素分析仪(德国 Elementar 公司的 varioMacro cube 系统)分别测定地上与地下部分的碳含量,结合生物量计算下木层和草本层的碳密度。

在样方内随机设置 3 个 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 小样方,收集小样方内所有凋落物(包括落叶、树皮、果实、直径 $< 2\text{ cm}$ 的枯枝以及地表其他植物残体)并称质量。每个样方内凋落物取 3 份样品,带回实验室烘干 ($65\text{ }^\circ\text{C}$) 至恒质量后测定含水率,并换算其干质量,研磨过 0.15 mm 筛后测定碳含量。

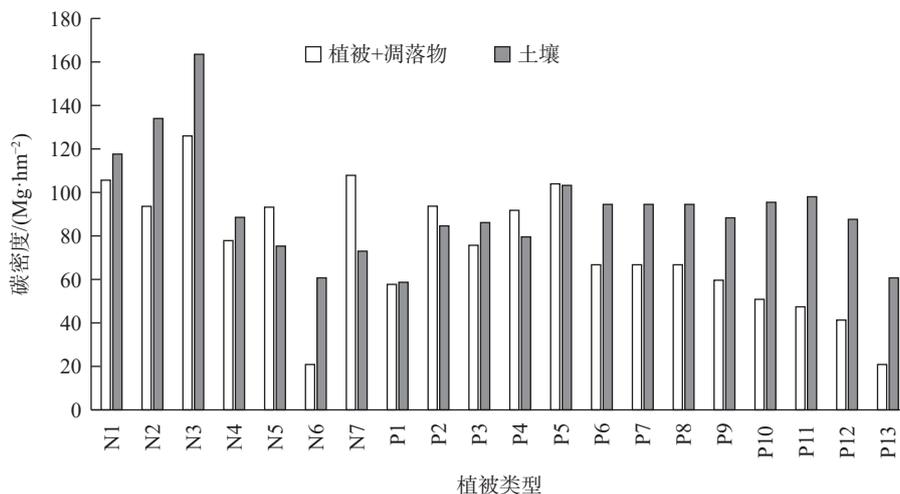
3) 土壤碳

在样方内随机挖取 3 个土壤剖面,以 10 cm 为间隔分层,取到实际土壤深度约 100 cm (即 0~10,

10~20, 20~30, 30~50 和 50~100 cm 分 5 层取样)。每层取 2 份土壤样品: 其中一份使用环刀 (100 cm³) 取样, 采用 105 °C 烘干 48 h 后测定各层土壤容重; 另一份取约 300 g 鲜土, 在室温 (约 25 °C, 14 d) 自

然风干, 去除杂质后研磨过筛 (0.15 mm), 用元素分析仪测定土壤碳含量。

海南主要森林生态系统类型碳密度的计算结果见图 2。



注: 天然林 N1~N7, N1 低地雨林老龄林, N2 低地 (含少量山地) 雨林次生林, N3 山地雨林老龄林, N4 落叶半落叶季雨林 (次生性), N5 高山云雾林, N6 灌木林, N7 针叶林; 人工林 P1~P13, P1 桉树林, P2 相思类, P3 其他阔叶树种类, P4 松树类, P5 杉木林, P6 橡胶纯林, P7 橡胶+阔叶树种类, P8 橡胶+松类, P9 阔叶树种原料林, P10 热带水果类, P11 竹类, P12 棕榈类, P13 灌木类原料林。以下同。

图 2 海南热带雨林国家公园森林生态系统不同植被类型碳密度

Fig. 2 Carbon density of different vegetation types in the forest ecosystem of NPHTR

2.2.2 碳储量和碳汇估算

森林生态系统碳库通常分为植被生物量、凋落物、死木和土壤有机碳。其中, 植被生物量包括地上生物碳储量 (C_{above}) 和地下生物碳储量 (C_{below})。地上生物碳储量 (C_{above}) 主要包括地表以上所有存活的植被 (树皮、树干、树枝和树叶等) 中的碳储量; 地下生物碳储量 (C_{below}) 是指存在于植物活根系统中的碳储量; 土壤碳储量 (C_{soil}) 一般是指矿质土壤和有机土壤中的有机碳储量; 死亡有机碳储量 (C_{dead}) 表示凋落物、枯立木或已死亡倒木中的碳储量, 这里主要指凋落物碳库。计算公式为:

$$C_{tot} = C_{vegetation} + C_{soil} + C_{litterfall}$$

式中: C_{tot} 为总碳储量, Mg; $C_{vegetation}$ 为植被碳储量, Mg; C_{soil} 为土壤碳储量, Mg; $C_{litterfall}$ 为凋落物碳储量, Mg。

森林碳汇量常用一段时间内森林各碳库的碳

储量变化之和表示:

$$\Delta C_{FL} = \sum_i \Delta C_{FL,i} = \sum_i (\Delta C_{AB,i} + \Delta C_{BB,i} + \Delta C_{DW,i} + \Delta C_{LI,i} + \Delta C_{SO,i})$$

式中: ΔC_{FL} 为森林碳储量变化; i 为按照气候区、森林类型等划分的层或亚类型; ΔC_{AB} 、 ΔC_{BB} 、 ΔC_{DW} 、 ΔC_{LI} 和 ΔC_{SO} 分别代表地上生物量、地下生物量、死木、凋落物、土壤有机碳的碳储量变化。

3 结果与分析

3.1 碳储量和碳密度特征

由表 1 可知, 海南热带雨林国家公园森林生态系统的总碳储量为 89.67 Tg, 平均碳密度为 218.39 Mg/hm², 其中地上生物、地下生物、土壤和凋落物的平均碳密度分别为 72.82, 23.10, 120.92

和 1.55 Mg/hm²。可见, 土壤层碳储量最高, 达 49.65 Tg, 占总碳储量的 55.37%; 其次为地上生

物碳库有 29.90 Tg, 占总量的 33.34%; 最低的是凋落物碳库, 仅占总量的 0.71%。

表 1 海南热带雨林国家公园森林生态系统不同组分的碳储量和碳密度

Table 1 Carbon storage and carbon density of different carbon pools in the forest ecosystems of NPHTR

指标	地上生物碳库	地下生物碳库	土壤碳库	凋落物碳库	森林生态系统
碳储量/Tg	29.90	9.48	49.65	0.64	89.67
碳密度/(Mg·hm ⁻²)	72.82	23.10	120.92	1.55	218.39
占比/%	33.34	10.58	55.37	0.71	100.00

注: 1 Tg=10⁶ Mg。

由表 2 可知, 海南热带雨林国家公园森林生态系统的总碳汇量为 1.84 Tg/a, 平均碳汇速率为 4.48 Mg/(hm²·a), 其中植被和土壤的平均碳汇

速率分别为 3.98 和 0.13 Mg/(hm²·a)。相比于土壤层, 植被层由于碳汇速率高, 其碳汇量较大, 占比 88.89%。凋落物现存量 and 增量的变化很小。

表 2 海南热带雨林国家公园森林生态系统植被和土壤碳库的碳储量变化和碳汇速率

Table 2 Carbon storage and carbon density of different carbon pools in the forest ecosystems of NPHTR

指标	植被层碳库	土壤层碳库	森林生态系统
碳储量变化/(Tg·a ⁻¹)	1.64	0.20	1.84
碳汇速率/(Mg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	3.98	0.13	4.48
占比/%	88.89	11.11	100.00

3.2 不同植被类型碳储量和碳密度分布特征

从热带雨林国家公园不同植被碳储量的分布看(图 3): 低地雨林次生林、低地雨林老龄林和山地雨林老龄林的碳储量较高, 分别达 28.28, 27.11 和 18.55 Tg, 总共占国家公园森林生态系统总碳储量的 82.45%; 其次为松树林、橡胶纯林和落叶半落叶季雨林, 分别为 3.93, 3.01 和 2.32 Tg, 占总量的 10.33%; 再其次为桉树林、相思林和棕榈类的林分, 分别为 1.75, 1.53 和 1.00 Tg; 其他植被类型的碳储量均低于 1.00 Tg。从不同植被类

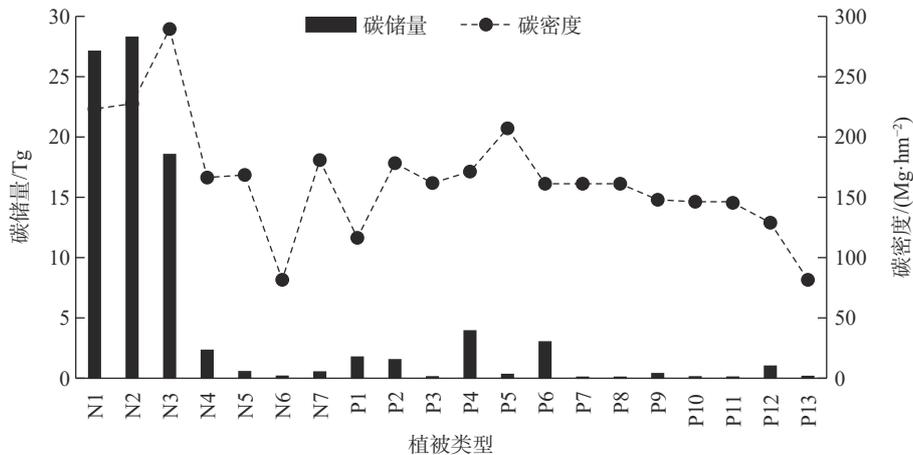


图 3 海南热带雨林国家公园不同植被类型碳储量和碳密度分布

Fig. 3 Distribution of forest ecosystem carbon storage and carbon density in different vegetation types of NPHTR

型的碳密度上看, 热带雨林的碳密度较高, 基本上均高于 220 Mg/hm^2 , 其中碳密度最高的是分布于海南岛中部山区的热带山地雨林, 达到 289.52 Mg/hm^2 ; 其次是低地雨林次生林、低地雨林老龄林, 约为 220.00 Mg/hm^2 ; 人工林碳密度介于 $81.59\sim 171.33 \text{ Mg/hm}^2$ 之间; 最低的是灌木林, 仅为 81.59 Mg/hm^2 。

3.3 不同植被类型碳储量变化和碳汇速率分布特征

从热带雨林国家公园不同植被碳储量变化看(图4): 低地雨林次生林、低地雨林老龄林和山地雨林老龄林的碳汇量较高, 分别达 65.80×10^4 , 36.36×10^4 和 $24.48\times 10^4 \text{ Mg/a}$, 总共占国家公园森

林碳汇总量的 66.76%; 其次为桉树林、松树林、橡胶纯林和相思林等人工林, 分别为 12.50×10^4 , 12.32×10^4 , 11.86×10^4 和 $11.14\times 10^4 \text{ Mg/a}$, 占总量的 26.85%; 再其次为半落叶季雨林、针叶林、阔叶树种原料林、高山云雾林和杉木林, 分别为 5.60×10^4 , 1.70×10^4 , 1.58×10^4 , 1.26×10^4 和 $1.04\times 10^4 \text{ Mg/a}$; 其他植被的碳汇量均低于 $1.00\times 10^4 \text{ Mg/a}$ 。从不同植被类型的碳汇速率上看, 人工林均比较高: 相思林的碳汇速率最高, 达 $12.94 \text{ Mg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$; 桉树林、松树林、橡胶纯林和相思林等人工林的碳汇速率均较高, 介于 $5.37\sim 7.42 \text{ Mg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 之间; 热带雨林等天然林的碳汇速率介于 $2.99\sim 5.30 \text{ Mg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 之间。

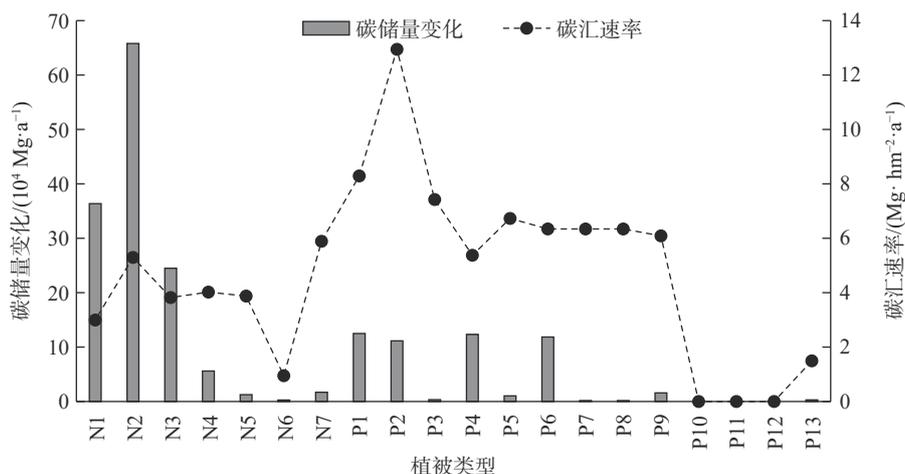


图4 海南热带雨林国家公园不同植被碳储量变化和碳汇速率分布

Fig. 4 Distribution of forest ecosystem carbon storage and carbon density in different elevations of NPHTR

4 结论与讨论

4.1 海南热带雨林国家公园森林生态系统具有较高的碳储量和碳密度

森林生态系统作为陆地碳循环的重要组成部分, 其碳储量水平和固碳潜力一直备受关注, 对于掌握碳循环机制和制定减排政策至关重要。森林碳汇功能是森林五大碳库固碳能力的综合体现, 包括森林植被地上和地下生物量、木质残体、凋落物和土壤碳库。森林植被和土壤碳库是全球森林碳储量的主要部分, 分别占森林总碳储量的

44% 和 45%; 森林木质残体碳储量占 4%, 凋落物碳储量占 6%^[5]。本研究结果与全球平均水平比较接近, 森林植被和土壤碳库占森林总碳储量的比例为 42.0% 和 44.0%。植被占比均高于 Tang 等^[19]对我国森林生态系统碳储量和 Ren 等^[13]对 1993—2008 年海南森林生态系统碳储量的研究结果, 说明国家公园内热带森林生态系统植被保育比较好、生态质量高。

Ren 等^[13]对海南森林生态系统碳储量的研究结果表明, 由于海南从 20 世纪 90 年代开始实施

天然林保护和公益林保护修复,使得这一时期森林覆盖率和蓄积量持续增加,其碳储量从 109.51 Tg (1993 年) 增加到 279.17 Tg (2008 年)。因此,本研究中的国家公园森林生态系统碳储量与这一变化趋势比较吻合,表明随着森林面积和森林质量的提升,森林生态系统碳储量也在逐渐增加。

海南热带雨林国家公园森林生态系统平均碳储量密度为 218.39 Mg/hm²,明显高于全国 (179.20 Mg/hm²)、海南全省 (163.70 Mg/hm²)、浙江 (120.80 Mg/hm²) 和我国亚热带 (149 ±12 Mg/hm²)^[13,19-21],低于四川 (232.81 Mg/hm²) 和吉林 (225.30 Mg/hm²)^[22-23]。这可能是由于不同地域内的水热等自然环境条件以及森林结构和土壤类型等的差异所致^[24],但也可能与核算的空间尺度和森林类型划分的精细程度有关。但本研究结果与 2011 年 Pan 等^[5]对全球森林生态系统碳密度 (223.6 Mg/hm²) 的研究结果十分接近,稍低于全球热带森林平均值 (241.6 Mg/hm²)。然而,海南热带雨林国家公园森林生态系统的植被碳密度 (95.92 Mg/hm²) 高于中国森林植被 (53.2~58.36 Mg/hm²)^[19,25-26],土壤碳密度 (120.92 Mg/hm²) 与广西 (124.70 Mg/hm²)^[27]的研究结论接近。

从国家公园不同植被类型上看,山地雨林和低地雨林等热带天然林的碳密度要明显高于人工林,这表明维持国家公园热带雨林的真实性、完整性和稳定性非常重要,对国家公园内的人工林实施近自然混交林的改造有助于提高热带雨林碳汇功能。海南热带雨林国家公园热带森林的碳密度稍低于世界其他区域的热带森林^[5,28]。这也许与海南地处热带季风气候区(经常受台风干扰)有关,但总体上来说还具有提升空间,其碳储量可通过调整树种组成、改善群落结构以及提升群落稳定性和抗逆性来提高。另外,国家公园内还有将近 19% 的橡胶、杉木、桉树和相思等人工林,需要通过以提升森林固碳能力为目的的生态修复,以基于自然的解决方案提升生态系统的碳汇功能。

海南省于 1994 年全面停止天然林商业性采伐,

并实施封山育林等保护措施,有效保护了天然林资源;且随着海南热带雨林国家公园对天然林的综合性保护和系统性修复,海南岛中部山区的低质林分等逐渐恢复演替为物种丰富和结构复杂的热带天然林。江西新岗山生物多样性与生态系统功能实验研究通过全球最大的森林多样性控制实验的连年监测,得出高多样性混交林生物量约为纯林的两倍,证明了森林物种多样性对生产力具有促进作用^[20]。因此,可将海南岛具有重要生态功能区域,特别是国家公园范围内的低质林分通过生态修复改变单一树种结构,向多树种近自然混交林转变,进一步优化林分结构,提高林分质量,达到提升热带雨林生态系统固碳潜力的目标。

4.2 海南热带雨林国家公园森林生态系统固碳能力较强

作为陆地碳汇的主体,森林碳汇在碳中和战略中被认为是抵消化石燃料碳排放的有效途径。在量化碳库大小的基础上,通过比较不同时期森林生态系统碳库的变化可以得到碳源汇大小,全球森林碳汇存在明显的地理分布格局^[29]。如 1990—2020 年期间的统计结果显示:对全球森林固碳增汇有贡献的区域主要是欧洲、亚洲东部、北美洲、亚洲西部和中部的森林生态系统;而南美、非洲和亚洲南部、东南部的森林碳储量年增长量则为负值,是拖慢全球森林增汇减排进程的主要区域;南美、非洲和东南亚热带雨林分布区受到人为干扰严重,其中亚马孙热带雨林、巴西季雨林和东南亚热带雨林等区域森林碳汇功能持续下降,目前全球三大主要热带雨林区域中,仅非洲的刚果盆地发挥碳汇的作用。本研究显示国家公园热带雨林生态系统是一个碳汇 (1.84 Tg/a),其固碳速率 [4.48 Mg/(hm²·a)] 远高于全球森林平均水平^[5][1.04 Mg/(hm²·a)]、热带森林^[5][1.38 Mg/(hm²·a)],高于中国森林^[19][1.62 Mg/(hm²·a)],表明海南热带雨林国家公园森林生态系统具有较高的固碳增汇能力。

森林碳汇的驱动因素在不同区域存在一定差异。按照以往的研究,北美和欧洲森林生态系统

碳储量增加主要是由于大气 CO₂ 浓度上升和气候变化等全球变化要素所致^[8]。而在中国地区,除了上述全球变化要素外,植树造林、生态修复工程的实施也是我国森林碳汇的重要驱动要素,因此对于热带雨林国家公园来说,基于自然解决方案的生态修复对提升生态碳汇尤为重要。

4.3 碳储量估算的不确定性及展望

尽管目前学术界已经证实了森林生态系统的碳汇功能,但目前对森林碳汇大小、分布、动态及其驱动因素的认识仍存在较大不确定性。这种不确定性来源于多个方面,包括不同研究者对森林碳汇定义的差异、样点分布不均衡性导致的抽样误差、模型过程和参数的差异等^[1]。与之前的研究相比,本研究的基础数据包含了最新的森林资源二类调查数据和不同植被类型全面的野外样地调查资料,有助于更准确地估算海南森林生态系统碳储量。但是本研究受国家公园山地地形和可达性、生态系统复杂性等限制,相同植被类型在不同区域、不同海拔上的森林样地仍有待增加。此外,土壤有机碳是碳库的重要组成部分,其空间异质性变化也与植被组成、凋落物输入量和归还量、土壤容重、土壤母质和小气候等因素密切相关^[30–31],以上因素均会对研究结果造成不确定性。森林碳储量现状的准确评估是后续固碳速率、潜力及机制分析的重要基础,是理解森林生态系统在全球碳平衡和碳循环中所处地位的重要手段。建议在以后的研究中通过加大森林生态系统调查与监测力度,完善森林碳循环模型等途径以完善“自下而上”和“自上而下”方法,获取更为精细的碳循环基础参数,提高森林碳汇评估精度,以减少估算结果的不确定性。

参考文献:

- [1] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial Carbon Sinks in China and around the World and Their Contribution to Carbon Neutrality[J]. *Science China Life Sciences*, 2022, 65(5): 861–895.
- [2] Houghton R A, Davidson E A, Woodwell G M. Missing Sinks, Feedbacks, and Understanding the Role of Terrestrial Ecosystems in the Global Carbon Balance[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(1): 25–34.
- [3] IPCC. Climate Change 2013–The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The Carbon Balance of Tropical, Temperate and Boreal Forests[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22(6): 715–740.
- [5] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988–993.
- [6] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate Change, Human Impacts, and Carbon Sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015–4020.
- [7] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185–190.
- [8] Schimel D, Melillo J, Tian H, et al. Contribution of Increasing CO₂ and Climate to Carbon Storage by Ecosystems in the United States[J]. *Science*, 2000, 287(5460): 2004–2006.
- [9] Piao S L, Fang J Y, Zhu B A, et al. Forest Biomass Carbon Stocks in China over the Past 2 Decades: Estimation Based on Integrated Inventory and Satellite Data[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2005, 110(G1): G01006.
- [10] Asner G P, Powell G V, Mascaro J, et al. High-Resolution Forest Carbon Stocks and Emissions in the Amazon[J]. *PNAS*, 2010, 107(38): 16738–16742.
- [11] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320–2322.
- [12] Xu L, Yu G, He N, et al. Carbon Storage in China's Terrestrial Ecosystems: a Synthesis[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 2806.
- [13] Ren H, Li L J, Liu Q A, et al. Spatial and Temporal Patterns of Carbon Storage in Forest Ecosystems on Hainan Island, Southern China[J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e108163.
- [14] 曹军, 张懿铨, 刘燕华. 近20年海南岛森林生态系统碳储量变化[J]. *地理研究*, 2002, 21(5): 551–560.
- [15] 张懿铨, 张玮, 丁明军. 基于土地利用/覆被分类系统估算碳储量的差异——以海南岛森林为例[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(6): 63–70.
- [16] 于界芬. 海南森林资源及其生态功能监测与评估[J]. *热带生物学报*, 2020, 11(1): 51–57,91.
- [17] 杨小波, 陈宗铸, 李东海. 海南植被分类体系与植被分布

- 图[J]. 中国科学:生命科学, 2021, 51(3): 321-333.
- [18] 陈德祥, 李意德, Heping Liu, 等. 尖峰岭热带山地雨林生物量及碳库动态[J]. 中国科学:生命科学, 2010, 40(7): 596-609.
- [19] Tang X L, Zhao X A, Bai Y F, et al. Carbon Pools in China's Terrestrial Ecosystems: New Estimates Based on an Intensive Field Survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [20] Liu X, Trogisch S, He J S, et al. Tree Species Richness Increases Ecosystem Carbon Storage in Subtropical Forests[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2018, 285(1885): 20181240.
- [21] 李银, 陈国科, 林敦梅, 等. 浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 354-363.
- [22] 黄从德. 四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [23] 王新闯, 齐光, 于大炮, 等. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2013-2020.
- [24] Hofhansl F, Chacón-Madrigal E, Fuchslueger L, et al. Climatic and Edaphic Controls over Tropical Forest Diversity and Vegetation Carbon Storage[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 5066.
- [25] 王万同, 唐旭利, 黄玫, 等. 中国森林生态系统碳储量-动态及机制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [26] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- [27] 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 282-291.
- [28] Lal R. Forest Soils and Carbon Sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1-3): 242-258.
- [29] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Forestry Department. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [30] Ahmad Dar J, Somaiah S. Altitudinal Variation of Soil Organic Carbon Stocks in Temperate Forests of Kashmir Himalayas, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(2): 1-15.
- [31] 郭晓伟, 骆士寿, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7878-7886.

Carbon Storage and Its Change Characteristics of Forest Ecosystems in National Park of Hainan Tropical Rainforest, China

LIU Qiang^{1,2} ZHOU Zhang^{3,4*} CHEN Dexiang^{3,4} CHEN Zongzhu⁵
LEI Jinrui⁵ XU Han^{3,4} WU Guilin^{3,4} LI Yide^{3,4}

(1. East China Academy of Inventory and Planning of National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, China; 2. Forestry Department of Hainan Province (Hainan Tropical Rainforest National Park Administration), Haikou 570203, China; 3. Research Institution of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 4. Jianfengling National Key Field Research Station of Tropical Forest Ecosystem, Ledong 572542, Hainan, China; 5. Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou 570100, China)

Abstract: 【 Objectives 】 It will provide basic data and scientific basis for the carbon sink enhancement measures of tropical forests, and the accurate assessment on the contribution of ecological carbon sink in Hainan Island to the goal of carbon neutrality. 【 Methods 】 In this study, the latest data from forest resources surveys and forest plots were used to study the forest ecosystem carbon storage and its variation characteristics in National Park of Hainan Tropical Rainforest (NPHTR) by spatial statistical analysis. 【 Results 】 The results were as follows: the total ecosystem carbon storage of NPHTR was 89.67 Tg, and the carbon storage of vegetation, soil, and litterfall was 39.38, 49.65, and 0.64 Tg. The ratio of the ecosystem was 43.92%, 55.37%, and 0.71%. The ecosystem carbon density of NPHTR was 158.62 Mg/hm², and the carbon density of vegetation, litterfall, and soil were 95.91, 1.55, and 120.91 Mg/hm² respectively. The carbon ecosystem carbon storages of the natural forest and the planted forest were 77.41 and 12.26 Tg, and the ratios were 86.33% and 13.67%. The carbon storage of tropical lowland rainforest and mountain rainforest were the biggest ones of tropical forest, and the ratio is 82.45%. The carbon density of the tropical mountain rainforest (289.52 Mg/hm²) was the biggest one of tropical forests, and the smallest one was in the shrub (81.95 Mg/hm²). The carbon sequestration of tropical forests in NPHTR was 1.84 Tg/a. 【 Conclusions 】 The amount of forest ecosystem carbon storage, carbon density and carbon sequestration NPHTR is bigger than in other ecosystem. In the future, it is important to strengthen the protection of natural forests and ecological restoration of planted forests, to improve the quality of forests, and to increase the carbon sequestration of tropical forest ecosystems.

Keywords: National Park; tropical rainforest; carbon storage; carbon sink; Hainan of China