

# 典型亚热带常绿阔叶林生态系统碳汇能力评估研究

华心来月

浙江九龙山国家级自然保护区管理中心

DOI:10.12238/as.v8i6.3066

**[摘要]** 基于实地样地调查数据与遥感监测技术,构建森林碳储量估算模型及碳汇评估体系,对典型亚热带常绿阔叶林生态系统的固碳能力与年净碳汇量进行量化分析,并探讨不同林分结构、气候因子及土壤特性对碳汇功能的影响机制。研究发现,该类型森林在地上生物量碳积累与土壤碳储存方面展现出较强潜力,碳汇空间分布呈现显著异质性特征,优化森林管理措施可进一步增强其碳汇能力。研究结果对保障区域生态安全、推进“双碳”战略目标实现具有重要科学支撑与实践指导意义。

**[关键词]** 亚热带常绿阔叶林; 碳汇能力; 生物量估算; 土壤碳储量; 生态系统评估

中图分类号: F323.22 文献标识码: A

## Assessment of Carbon Sequestration Capacity in Typical Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest Ecosystems

Xinlaiyue Hua

Zhejiang Jiulongshan National Nature Reserve Management Center

**[Abstract]** Using field plot survey data and remote sensing monitoring technology, a forest carbon storage estimation model and a carbon sink assessment system have been developed. This study quantitatively analyzes the carbon sequestration capacity and annual net carbon sink of typical subtropical evergreen broad-leaved forests. It also explores how different stand structures, climatic factors, and soil characteristics influence carbon sink functions. The findings indicate that this type of forest has significant potential for carbon accumulation in above-ground biomass and soil carbon storage. The spatial distribution of carbon sinks exhibits notable heterogeneity. Optimizing forest management practices can further enhance its carbon sink capacity. These results provide important scientific support and practical guidance for ensuring regional ecological security and achieving the 'dual carbon' strategic goals.

**[Key words]** subtropical evergreen broad-leaved forest; carbon sink capacity; biomass estimation; soil carbon storage; ecosystem assessment

### 引言

在全球气候变暖的严峻挑战下,森林生态系统作为陆地碳循环的核心环节,对减缓温室气体排放、维持生态平衡具有不可替代的作用。亚热带常绿阔叶林以其独特的群落结构、高生物量积累速率及丰富的物种多样性,成为全球碳汇研究的重点区域。深入解析其碳汇潜力的空间分异规律与驱动机制,不仅能够深化对陆地生态系统碳循环过程的科学认知,更可为区域生态安全屏障构建、“双碳”目标下的碳汇管理策略制定提供理论依据与技术支撑,因而成为生态学、农学及环境科学交叉领域的研究焦点。

### 1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区选择。本研究选取江西武夷山、湖南南山等典型区域作为研究对象。这些区域均位于东南丘陵地带,属于亚热带常绿阔叶林分布区,其气候条件呈现显著的亚热带季风气候特

征,年平均降水量约1600mm,年平均气温维持在18℃左右,温暖湿润的气候环境为森林生态系统的发育提供了良好条件,区域内森林覆盖率高,林龄结构涵盖幼龄林、中龄林、成熟林及过熟林,生态系统完整性良好,为碳汇能力评估提供了理想的研究样本。

研究区特殊的地理位置使其对气候变化响应敏感,能够有效反映亚热带林地在外界环境干扰下的碳汇动态变化特征,通过科学设置代表性样地,采集不同林分结构、地形地貌条件下的基础数据,不仅为区域性碳储能力评估提供可靠依据,也为研究成果的推广应用奠定了坚实基础。

1.2 植被类型与土壤类型概述。研究区域植被以亚热带常绿阔叶林为主导类型。樟树(Cinnamomum camphora)、香樟、楠木、栲类等构成群落优势树种,同时,部分区域分布有针阔混交林和人工林,丰富的植被类型造就了较高的生物多样性水平,林下植

被以蕨类植物、小灌木及苔藓类植物为主,形成层次分明的群落结构,为开展系统性碳汇能力研究提供了良好条件。

土壤类型主要包括红壤和黄壤,土壤pH值呈酸性,富含有机质,具备较强的碳储存潜力,受低山丘陵地形影响,不同坡度区域的土壤侵蚀程度存在差异,进而影响土壤碳库稳定性,因此,在研究过程中需综合考虑地形因子,开展多变量协同分析,以准确评估研究区碳汇能力。

1.3数据来源。本研究数据整合多源信息,构建综合性数据库,确保研究结果的科学性与可靠性,实地样地调查获取基础生态数据,涵盖林分结构参数(树高、胸径、郁闭度)测量、植被样本采集及分层土壤取样。

遥感数据采用多时相Sentinel-2与Landsat8卫星影像,运用辐射校正、大气校正等预处理技术,提取植被覆盖指数、地表反射率等关键信息,结合归一化植被指数(NDVI)与增强型植被指数(EVI)的动态变化分析,实现植被生长状态与空间分布特征的持续监测。气象数据来源于国家气象数据中心,包含多年连续的降水量、气温、太阳辐射等生态驱动变量,为生态过程模拟提供环境背景参数。

1.4研究方法。土壤碳储量估算采用分层“容重法”,在0-20cm、20-40cm和40-60cm土层深度设置样本层,通过测定土壤有机碳含量与容重,结合土壤剖面面积,计算单位面积碳储量,系统解析不同深度土壤碳库分布特征。

生物量估算基于林分实测数据,建立树高-胸径回归模型,运用异速生长方程推算地上生物量,并依据国家推荐的碳转化系数(0.5)将生物量转换为碳储量,地下生物量则根据地上生物量的经验比例关系进行估算,实现生物量碳储量的全面评估。

碳汇能力评估运用净初级生产力(NPP)与净生态系统生产力(NEP)模型,NPP通过遥感数据反演结合气象变量驱动模型计算,量化植被光合作用碳固定量;NEP在NPP基础上,扣除土壤与植被的异养呼吸消耗,精确评估生态系统实际净碳汇水平。

1.5评价指标与统计分析手段。研究选取单位面积碳储量( $t \cdot hm^{-2}$ )、年净碳汇量( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )、生物量碳密度( $kg \cdot m^{-2}$ )等核心指标,系统评价碳汇能力的时空演变特征。

数据处理采用Excel进行基础数据整理,运用SPSS软件开展方差分析、相关性检验与多元线性回归建模,揭示林分结构、气候因子与土壤特性对碳汇的影响机制。

## 2 碳汇能力的空间分布特征与年度变化

2.1各类林分碳汇能力差异。林分类型不同,碳汇能力存在明显区别。乔木林树体高大且地上生物量增长迅速,其碳储量在各类林型中居首,年均每公顷净碳汇量达6.2吨,混交林凭借林种丰富度和空间结构优势,碳吸收过程稳定,单位面积年碳汇量为5.4吨。灌木林受限于单位面积生物体量少、叶面积指数低,每年每公顷碳汇量约3.1吨,固碳能力相对较弱。

从空间分布来看,低山缓坡地带多为乔木林分布区;林缘及自然次生林区域集中生长混交林;边坡、退化次生林地段则是灌木林的主要分布地,不同林分的布局与搭配,既决定着碳储量

的累积效率,也影响着生态系统抵御外界干扰的缓冲性能。如表1所示。

表1 各类林分碳汇能力差异

林分类型	平均年碳汇量( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	分布特征
乔木林	6.2	山地主林区、郁闭度高
混交林	5.4	林缘、次生林
灌木林	3.1	边坡、退化林带

2.2垂直结构、龄组结构对碳汇的影响。森林乔、灌、草垂直分层结构显著提升碳汇效能,这种多层架构不仅增强光能利用率,还优化林地空间资源配置,完整垂直结构的林地,其碳汇能力平均提升约15%,地上地下碳储量同步增长,印证生态系统稳定性与碳吸收能力的正向关联。

林龄结构方面,幼龄林固碳速率快但总储量低,中龄林生长旺盛处于碳汇峰值,过熟林固碳减缓但储量稳定且根系碳积累丰富,实测数据显示,中龄林年均碳汇量达 $6.5 t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ,显著高于幼龄林的 $3.9 t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 与过熟林的 $4.6 t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ,表明碳汇功能与林龄呈非线性变化。

2.3年度变化趋势(基于多年度监测数据)。分析2015—2023年九个年度监测数据可知,亚热带常绿阔叶林碳汇能力整体攀升,初期因部分区域森林结构未恢复,碳汇量波动剧烈;2018年后,伴随封育管护和生态修复推进,年均碳汇量稳步增长,至2023年增幅达18%。

碳汇年度波动受极端气候、病虫害及人为活动影响,如2020年南方夏季降水不足,致使部分监测样地碳汇量下降8%,凸显气候变化对碳吸收动态的显著影响。

2.4空间分布图谱分析(GIS支持下绘制)。借助ArcGIS空间分析结合遥感与样地监测数据绘制的碳汇图谱显示,碳汇能力存在显著空间差异,高碳汇区域集中于海拔300—800米、坡度适宜且林龄超20年的乔木林区。

图谱进一步揭示碳汇热点与土壤、水热等生态因子的耦合关系,为生态修复和碳汇管理提供量化依据,通过空间叠加分析,可精准划定碳汇提升区域,助力生态调控精细化实施。

## 3 碳汇能力的主要影响因子分析

3.1气候因子(温度、降水)与碳吸收效率关系。气候要素是左右森林生态系统碳汇能力的关键外部驱动力,年均气温适宜时,植物光合作用增强,生物量积累加快。研究表明,当气温处于 $15^{\circ}C-20^{\circ}C$ 区间,乔木林碳吸收效率达峰值;若超过 $22^{\circ}C$ 且持续高温,植物蒸腾加剧,光合效率下滑,碳汇能力随之降低。

降水主要通过调节土壤湿度、影响养分循环,间接作用于碳汇过程,年降水量在1200-1800mm的区域,森林碳汇能力相对稳定,若遇遇长期干旱,植物因水分胁迫抑制根系生长,导致碳输入减少;而在过度湿润区域,土壤通气性变差,微生物活动受限,影响土壤碳的稳定存储,气温与降水的协同作用,构成了森林碳汇的气候条件基础。

3.2土壤理化性质(有机质含量、pH等)影响。土壤有机质含

量直接决定土壤碳储量规模,是评估碳汇潜力的核心指标,采样分析显示,土壤有机质含量超3%的样地,其碳储量比1%以下的林地高出约40%,此外,有机质可优化土壤团粒结构、提升微生物活性,为碳的固持转化创造有利条件。

土壤pH值通过改变养分有效性、影响微生物群落结构,间接调控碳汇效率,研究区数据表明,pH值4.5-5.5的弱酸性红壤最有利于维持稳定碳循环,过酸或偏碱环境会抑制植物根系活动、改变微生物功能分布,阻碍碳输入,削弱碳稳定性,这种现象在退化林区尤为显著。

3.3林龄、密度与人类干扰(如采伐、火灾)作用分析。林龄与碳汇能力呈现非线性变化关系,幼龄林阶段固碳速率快,但总碳储量低;中龄林(20-40年)生长旺盛,光合效率与碳积累能力均处于最强阶段;老龄林生长趋缓,但碳储量高、土壤碳稳定性强,是维持生态系统长期碳汇功能的重要保障。

林分密度影响单位面积光合叶面积和空间资源利用效率,林分过密易引发种内竞争,抑制个体生长;过疏则光能利用率不足,限制生物量积累,当林分密度维持在1000-1200株/hm<sup>2</sup>的合理区间时,碳汇表现最佳。

3.4多因素回归与主成分分析结果展示。为探究各因子对碳汇能力的综合影响,以年净碳汇量为因变量,选取气温、降水、土壤有机质、pH值、林龄、林分密度等为自变量,构建多元线性回归模型,模型调整R<sup>2</sup>值达0.81,显著性P值均小于0.05,拟合效果良好,其中,林龄和土壤有机质含量的回归系数最大,对碳汇能力提升的正向作用最为显著。

采用主成分分析(PCA)进一步提取关键影响因子,前两个主成分累计贡献率达71.3%,第一主成分包含林龄、土壤因子;第二主成分涵盖气候因子与干扰指数,分析结果表明,森林碳汇能力受生物学特性与外部环境共同驱动,呈现复合控制特征,为科学开展碳汇管理提供了重要依据和决策参考。

#### 4 提升亚热带常绿阔叶林碳汇能力的策略建议

4.1适地适树与混交林营造模式。提升碳汇效能的核心在于优化森林结构,需遵循“适地适树”原则,通过因地制宜选取乡土优势树种(如樟、楠木、枫香等),增强植物对局地气候及土壤条件的适应性。搭配针阔混交、阔叶混交等多样化林分配置模式,可丰富森林空间层次、提升生态系统稳定性,进而提高单位面积光能利用率与净初级生产力,实现更高效的固碳目标。如图1所示。



图1 森林系统

4.2森林经营与保护措施优化(间伐、补植)。科学的经营管理是维系林分健康、强化碳汇能力的关键路径。通过合理间伐,可改善林内通风透光环境,为优质个体生长释放空间,同时降低病虫害传播风险,进而提升林分整体碳吸收效能;针对退化林地,需通过补植补造恢复植被完整性与群落连续性,避免过度干预及不规范采伐,构建以生态功能为核心的经营机制。

4.3土壤质量改良与水肥调控策略。提升土壤碳储及养分循环效率,是增强森林碳汇能力的核心内控手段。在酸性红壤区域,可通过适度施用石灰调节土壤pH值,激活微生物活性并加速腐殖质形成;增加林下腐殖层厚度、保留落叶覆盖,能直接提升土壤有机碳含量,强化碳固持能力。

4.4碳汇价值评估纳入生态补偿政策建议。将森林碳汇能力纳入区域生态价值核算体系,是推动生态治理与绿色经济融合的关键环节。制定统一的区域碳汇核算标准,明确单位林地碳吸收价值,可为碳交易、生态补偿提供量化依据,保障森林经营主体获得长期经济收益,建议完善森林碳汇参与碳市场的技术规范与认证机制,探索“碳汇+生态”的生态产品价值实现路径,充分激发林农参与碳汇提升与保护的积极性。

4.5建立碳汇监测与预警体系。构建融合遥感监测、地面样地调查与气象模型的多源数据监测体系,可实现对碳汇动态的实时精准监控,借助无人机、卫星影像及AI图像识别技术自动识别林分变化,结合生态模型预警系统,对干旱、高温、台风等极端气候事件及火灾、非法采伐等人为干扰作出快速响应,为碳汇管理提供动态数据支撑。

#### 5 结语

亚热带常绿阔叶林作为我国重要的生态系统类型,蕴含显著的碳汇潜力与生态调节功能。本研究通过剖析碳汇能力的空间分异、年度波动及关键影响因子,明确了林分结构、土壤性质与气候条件在碳循环中的核心作用,结合林分优化、土壤改良、制度保障等碳汇提升策略,为精准增强森林碳汇能力提供了实践路径,推动碳汇能力评估体系建设,将为我国实现“双碳”目标、构建生态文明提供重要的技术支撑与政策参考。

#### 【参考文献】

- [1]王柏昌,卢佳,毛卫星,等.浙西南典型森林群落物种多样性与碳汇能力的研究[J].浙江林业科技,2023,43(03):14-20.
- [2]曹丽荣.亚热带常绿阔叶林绿叶-凋落叶性状种间变异及其协变关系[D].福建师范大学,2023.
- [3]张雨辰.湖北省后河保护区森林生态系统碳汇能力研究[D].三峡大学,2024.
- [4]丁海峰.稻田种植泥炭藓碳汇能力以及生态经济效益评估[D].贵州师范大学,2023.
- [5]刘童,鲍首辰,袁涛.中国不同植被区植物碳汇能力研究进展[J].林草资源研究,2024,(04):12-20.

#### 作者简介:

华心来月(1999--),女,汉族,浙江遂昌人,大学本科,助理工程师,研究方向:生态保护修复。