

# Research on Carbon Sequestration Mechanism and Key Technologies Based on Huangshan Forest Ecosystem Positioning Observation and Research Station in Anhui Province

Yiran Cai Shiyong Huang\* Jingjing Wang Shouxiang Su Xueyu Song

Observation and Research Station of Forest Ecosystem Positioning in Huangshan Mountain, Anhui Province, Huangshan, Anhui, 242700, China

## Abstract

In the context of intensified global climate change, the carbon sequestration and sink enhancement function of forest ecosystems has become the core path to achieve the “dual carbon” goal. Based on the long-term, continuous and multi factor observation data of Mount Huangshan Forest Ecosystem Positioning Observation and Research Station in Anhui Province, combined with ecological theory, this study systematically analyzed the carbon sequestration mechanism and potential of subtropical forest ecosystem, and focused on the key technologies of carbon sequestration and sink increase. The results show that: (1) the typical forest vegetation in Mount Huangshan has significant carbon sink capacity; (2) The soil organic carbon pool is the largest carbon pool in ecosystems, and its stability is crucial for long-term carbon sequestration; (3) Based on observation and experimentation, key technologies such as optimizing forest structure regulation, targeted cultivation of soil carbon pool, application of biochar, and near natural forest management have been screened and verified, which can significantly enhance the regional forest carbon sink capacity.

## Keywords

forest ecosystems; carbon sequestration and sink enhancement; ecology; Huangshan positioning observation and research station

# 基于安徽黄山森林生态系统定位观测研究站的固碳增汇机制与关键技术研究

蔡懿苒 黄士永\* 王晶晶 苏守香 宋学雨

安徽黄山森林生态系统定位观测研究站, 中国·安徽 黄山 242700

## 摘要

在全球气候变化加剧的背景下, 森林生态系统固碳增汇功能成为实现“双碳”目标的核心路径。本研究依托安徽黄山森林生态系统定位观测研究站的长期、连续、多要素观测数据, 结合生态学理论, 系统分析了亚热带森林生态系统固碳机制与潜力, 并聚焦固碳增汇关键技术。研究表明: (1) 黄山地区典型森林植被具有显著的碳汇能力; (2) 土壤有机碳库是生态系统最大碳库, 其稳定性对长期固碳至关重要; (3) 基于观测与实验, 筛选并验证了林分结构优化调控、土壤碳库定向培育、生物炭应用、近自然森林经营等关键技术, 可显著提升区域森林碳汇能力。

## 关键词

森林生态系统; 固碳增汇; 生态学; 黄山定位观测研究站

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

工业革命以来, 大气中  $\text{CO}_2$  浓度持续攀升, 导致全球气候变暖加剧, 极端天气事件频发。积极应对气候变化已成

为全球共识, 我国明确提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的宏伟目标。森林作为陆地生态系统的主体, 凭借其巨大的生物量和土壤碳库, 在吸收固定大气  $\text{CO}_2$  方面发挥着不可替代的作用, 是提升森林生态系统的固碳能力是实现碳中和目标的关键途径<sup>[1]</sup>。

亚热带森林类型多样, 结构复杂, 其固碳机制受因素气候、地形、土壤、植被类型等自然因素和经营历史、管理措施等人为干扰的共同影响, 存在显著的时空异质性<sup>[2]</sup>。因此, 亟需基于长期定位观测, 深入理解亚热带森林碳循环过程与调控机制, 研发并集成高效的固碳增汇关键技术, 为精准提升区域碳汇能力提供科技支撑。

【基金项目】安徽黄山森林生态系统定位观测研究站运行项目。

【作者简介】蔡懿苒(1989-), 女, 中国安徽蚌埠人, 硕士, 助理研究员, 从事生态学研究。

## 1.2 黄山定位观测研究站的核心价值

安徽黄山森林生态系统定位观测研究站（以下简称“生态站”）地处我国中亚热带北缘，黄山山脉腹地，是典型的中亚热带常绿阔叶林向暖温带落叶阔叶林过渡的关键区域。生态站涵盖保存完好的原生性常绿阔叶林、次生林、人工林及针阔混交林等多种森林类型，具有典型生态系统代表性。目前已建立包含气象、水文、土壤、生物要素的综合观测体系，运用涡度相关通量塔、生物量监测样地、土壤呼吸监测系统先进设备，积累了多年连续、高质量的碳、水、热通量及生态系统过程数据，有长期连续观测基础，为研究亚热带森林生态系统结构与功能、碳氮水循环过程、生物多样性维持机制以及对气候变化的响应与适应提供了不可多得的天然实验室和验证基地，是理想的研究平台。

## 1.3 研究目标与内容

本研究旨在深度融合黄山生态站的观测优势与生态学专业理论，聚焦森林固碳增汇，系统开展机制解析、关键技术研发与验证以及技术集成与示范等方面的研究。

### 1.3.1 机制解析

基于生态站长期观测数据，量化常绿阔叶林、针阔混交林等不同森林类型的碳储量、碳通量特征，阐明其固碳能力的时空格局及气候、林分结构、土壤特性等关键驱动因子。

### 1.3.2 关键技术研发与验证

针对提升森林固碳增汇能力的目标，筛选、优化并实地验证一系列关键技术，如林分改造、土壤管理、生物技术应用等。

### 1.3.3 技术集成与示范

提出适用于亚热带山地的森林固碳增汇技术体系并进行小规模示范应用，评估其生态与经济可行性。

## 2 研究区域与方法

### 2.1 黄山生态站研究区域概况

黄山生态站位于安徽省黄山市境内，黄山山脉核心区。气候特征以中亚热带季风气候，温暖湿润，四季分明。地形地貌以中低山为主，地形复杂，坡度变化大。地带性植被为常绿阔叶林，主要森林类型包括：原生及次生常绿阔叶林、针阔混交林、人工杉木林、毛竹林、灌丛、草甸等，土壤类型以山地黄壤、黄棕壤为主。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 生态系统碳储量与通量观测

#### （1）生物量碳库

①乔木层。在典型样地内进行每木检尺，记录胸径和树高  $H$ ，采用异速生长方程估算单株生物量，以含碳系数法换算为碳储量。

②林下植被层（灌木、草本）。采用样方收获法，分离烘干称重。

③凋落物层。采用凋落物收集框法，定期收集烘干称重。

#### （2）土壤有机碳库

以 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~100

cm 分层采集土壤样品，采用重铬酸钾氧化-外加热法或元素分析仪测定土壤容重、有机碳含量，计算单位面积土壤有机碳储量<sup>[4]</sup>。

#### （3）生态系统碳通量

①涡度相关法 (EC)。利用生态站通量塔连续监测  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、热通量，计算净生态系统  $\text{CO}_2$  交换量 (NEE)，经夜间摩擦风速阈值筛选、能量平衡闭合校正等数据处理后，获得可靠的净生态系统生产力 (NEP = -NEE)。

②生态系统呼吸 (Re)。EC 法夜间数据结合土壤呼吸箱观测，并区分自养呼吸、异养呼吸组分。

③总初级生产力 (GPP)。由  $\text{NEP} = \text{GPP} - \text{Re}$  关系推算。

### 2.2.2 固碳增汇关键技术筛选与实验设计

在生态站及其周边区域，针对不同森林类型/退化程度，设立固定样地或小流域，开展林分结构优化调控、土壤碳库定向培育、近自然森林经营及毛竹林高效固碳经营等关键技术实验。

（1）林分结构优化调控技术。构建目标林分，在次生林或低效人工林中，通过目标树经营、疏伐、补植乡土高固碳树种、促进天然更新等措施，优化林分垂直与水平结构，提升林分生产力和碳汇功能。设置不同调控强度的对比样地。

（2）近自然森林经营技术。在人工林或受干扰次生林中，模拟自然林的结构和树种组成，采取单株木择伐、群团状择伐、保留关键树种和枯立木、倒木等措施，促进森林向更稳定、高碳储量的状态演替，并与常规皆伐或粗放管理进行长期对比。

### 2.2.3 固碳潜力模拟评估

利用气象、通量、生物量等生态站长期观测数据，对生态系统过程模型进行参数率定和验证，设置不同未来气候情景和不同森林管理情景，模拟预测未来 50-100 年研究区域森林生态系统的碳储量、净碳通量 NEP 动态变化，评估不同管理措施下的增汇潜力<sup>[3]</sup>。

### 2.2.4 技术集成与示范

在生态站核心区或典型小流域，选择代表性区域，综合应用上述验证有效的关键技术，如目标树经营 + 生物炭土壤改良 + 凋落物保留，建立固碳增汇技术集成示范区，并建立完善的监测网络，量化示范区实施前后的碳汇增量、生物多样性变化、水土保持效益等，进行成本效益分析，评估技术集成的经济可行性。

### 2.2.5 数据分析

采用单因素 / 多因素方差分析、回归分析、混合效应模型、结构方程模型、时间序列分析等统计方法分析数据间关系。利用 GIS 进行空间分析与可视化，再用模型模拟结果进行敏感性分析和不确定性评估。

## 3 结果与分析

### 3.1 黄山森林生态系统碳储量与通量特征

#### 3.1.1 碳储量空间分布

常绿阔叶林碳储量最高，显著高于针阔混交林和人工

杉木林。土壤有机碳库是绝对主体,且深层土壤碳库不容忽视,生物量碳库中,乔木层贡献最大。常绿阔叶林凋落物层碳库相对较高。

### 3.1.2 碳通量动态

生态系统表现为明显的碳汇,常绿阔叶林年 NEP 最高,针阔混交林次之,人工林相对较低甚至可能接近平衡或微弱碳源。

季节变化显著:生长季(4-10月)是主要碳吸收期,NEP 高;非生长季(11-3月)碳吸收减弱甚至释放(NEP 低或为负值)。日变化呈现明显的光合-呼吸节律。

GPP 和 Re 均呈现明显的季节和日变化。GPP 峰值通常出现在夏季晴朗的正午前后;Re 受温度驱动显著,夏季夜间值高。

### 3.1.3 关键驱动因子

(1) 气候因子。光合有效辐射(PAR)和温度是驱动 GPP 日、季变化的主控因子。温度和水分强烈影响 Re。极端干旱或高温事件显著抑制 GPP 并可能短暂增加 Re。(2) 林分因子。森林类型是决定碳储量和通量差异的基础。林龄显著影响 NEP,中龄林常为碳汇高峰期。叶面积指数、林分密度、胸高断面面积与 GPP、NEP 呈显著正相关。生物多样性与生态系统生产力及稳定性存在正相关关系。(3) 土壤因子。土壤有机碳含量 SOC 初始含量、土壤质地、pH、养分有效性影响微生物活性和 SOC 稳定性。土壤呼吸(Rs)与 SOC 含量、微生物量碳(MBC)、土壤温度呈显著正相关。

## 3.2 固碳增汇关键技术效果验证

### 3.2.1 林分结构优化调控

中度疏伐后树种的生长速率显著提升,林下光照改善促进天然更新和灌草层发育。样地整体 LAI 在短期下降后恢复甚至超过对照。长期监测显示适度干扰可激发生长活力,实现长期增汇。过度疏伐则可能导致短期碳损失过大且恢复期长。

### 3.2.2 近自然森林经营

与传统皆伐更新相比,采用单株木择伐的近自然经营样地,其林分结构更复杂,枯落物和粗木质残体碳库增加,土壤扰动小,SOC 损失少。长期来看,其生态系统碳储量和生物多样性保护价值更高,碳汇功能更可持续。

## 3.3 技术集成示范初步成效

### 3.3.1 集成示范成效

在“黄山模式”集成示范区,原为次生林和部分退化杉木林,经过技术实施,如目标树选择性疏伐+补植乡土树种+添加生物炭+严格保留凋落物可使林分结构明显改善,目标树种生长加速,林下植被丰富度提高;土壤理化性质得到改良;水土保持功能增强。

### 3.3.2 成本效益分析

技术集成的一次性投入成本较高,但林木生长加速带来的长期木材收益、碳汇交易潜在收益以及生态服务功能价值的提升,有望实现净收益为正,政策补贴亦可改善经济可

行性。

## 4 讨论

### 4.1 亚热带森林固碳机制与关键调控点

#### 4.1.1 气候是基础框架

充沛的水热资源支撑了高生产力,但极端事件是主要胁迫源,未来气候变暖对呼吸的促进作用可能大于光合,存在碳汇能力衰减的风险,凸显适应性管理的紧迫性。

#### 4.1.2 植被是核心引擎

森林类型和林分结构直接决定了碳同化效率和分配格局。常绿阔叶林因其高生物量、高效光能利用和相对稳定的结构,展现了卓越的长期碳汇能力。优化结构是挖掘潜力、提升韧性的核心。

### 4.2 固碳增汇关键技术的适用性与协同效应

技术选择需因地制宜,需根据具体森林类型、林分现状、土壤条件、经营目标和成本约束进行选择和组合。单一技术效果有限,集成应用可产生协同效应。技术效果的显现需要时间,必须坚持长期定位观测。

### 4.3 技术推广面临的挑战与对策

#### 4.3.1 挑战

(1) 成本障碍:部分技术前期投入成本高,影响林农/经营者积极性。(2) 技术与知识门槛:近自然经营、目标树选择、生物炭施用技术等需要专业知识和技能,基层推广体系力量不足。(3) 政策与市场机制不完善:森林碳汇的市场价值尚未充分显化,碳汇项目开发方法学复杂、交易成本高,缺乏稳定持续的生态补偿机制激励增汇行为。(4) 长期投入保障:增汇效果的监测、评估和维护需要长期稳定的资金和人力投入。

#### 4.3.2 对策建议

(1) 加强科技创新与成本控制:研发低成本、高效率的生物炭生产技术;开发智能化、轻简化的森林经营辅助工具。(2) 构建多层次技术推广与培训体系:依托科研机构、高校、林技推广部门,开展针对林业管理者、技术人员和林农的实用技术培训与示范观摩。(3) 完善政策与市场激励:推动森林碳汇纳入全国碳市场,简化方法学,降低项目开发门槛。加大财政转移支付力度,设立森林质量精准提升/固碳增汇专项补贴。(4) 建立长期监测评估网络:整合黄山生态站等观测站点,构建区域森林碳汇监测网络,为政策调整和技术优化提供数据支撑。

## 参考文献

- [1] 方精云,等.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.
- [2] 于贵瑞,等.中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征.中国科学:生命科学,2014,44:1-22.
- [3] 王兵,郭浩.中国森林生态系统服务功能及其价值评估.中国林业出版社,2010.
- [4] 张旭东,等.森林土壤有机碳研究进展.应用生态学报,2003,14(4):709-714.