

气候变化背景下林业生态系统碳汇功能提升的技术路径与政策机制

方万力¹, 季雅玲², 王丹¹, 陈雅妮¹, 吴长飞^{2*}

1. 钱江源—百山祖国家公园龙泉保护中心, 浙江 丽水 323700

2. 浙江省丽水市龙泉市林业局, 浙江 丽水 323700

DOI: 10.61369/EAE.2024020003

摘要 : 本文聚焦气候变化背景下林业生态系统碳汇功能提升。阐述林业碳汇理论基础, 探讨从森林质量优化、技术集成应用、构建计量监测体系和提升碳汇功能的技术路径, 以及碳汇交易市场、生态补偿与财政支持政策、法规标准体系等制度保障, 为增强林业碳汇能力提供参考。

关键词 : 气候变化; 林业生态系统; 碳汇功能; 技术路径; 政策机制

Technical Pathways and Policy Mechanisms for Enhancing the Carbon Sequestration Function of Forestry Ecosystems in the Context of Climate Change

Fang Wanli¹, Ji Yaling², Wang Dan¹, Chen Yani¹, Wu Changfei^{2*}

1. Longquan Protection Center, Qianjiangyuan-Baishanzu National Park, Lishui, Zhejiang 323700

2. Longquan Forestry Bureau, Lishui City, Zhejiang Province, Lishui, Zhejiang 323700

Abstract : This article focuses on enhancing the carbon sequestration function of forestry ecosystems in the context of climate change. It elaborates on the theoretical basis of forestry carbon sequestration, explores technical pathways to optimize forest quality, integrate technology applications, build a measurement and monitoring system, and enhance carbon sequestration functions. Additionally, it discusses institutional guarantees such as the carbon sequestration trading market, ecological compensation and financial support policies, regulatory standards, and other systems, providing a reference for enhancing forestry carbon sequestration capabilities.

Keywords : climate change; forestry ecosystems; carbon sequestration function; technical pathways; policy mechanisms

引言

在全球气候变化的严峻形势下, 减少温室气体排放、增强碳汇能力成为应对气候变化的关键举措。林业生态系统作为陆地生态系统的核心组成部分, 其强大的碳汇功能在缓解气候变化方面具有不可忽视的作用。相关研究表明, 森林植被和土壤储存了陆地生态系统约80%的有机碳, 是重要的碳库。

然而, 当前全球森林面临着诸多挑战, 如森林砍伐、森林退化以及气候变化引发的自然灾害等, 这些问题严重制约了林业生态系统碳汇功能的发挥。与此同时, 随着碳交易市场的兴起和国际社会对碳减排要求的不断提高, 如何提升林业生态系统碳汇功能已成为科学界和政策制定者共同关注的焦点。

一、林业生态系统碳汇功能的理论基础

森林作为陆地生态系统的主体, 在全球碳循环中发挥着不可替代的作用。林业碳汇功能是指森林通过光合作用吸收大气中的二氧化碳, 并将其固定在生物链、土壤和产品中的能力。本章系统阐述林业碳汇的核心概念、作用机制及其影响因素, 为后续技

术路径与政策机制的研究提供理论支撑。

(一) 碳汇的概念与分类

林业碳汇是指人类活动所利用的碳汇, 主要是指林业经营和木材加工等人类活动所提供的碳汇。林业碳汇的收集和管理可以通过不同的方式实现, 包括森林保护、林木种植、森林经营、林产品加工等方法, 以及通过碳交易等市场机制实现碳汇的量化

交易。林业碳汇在全球应对气候变化和实现可持续发展目标中具有重要作用^[1]。

人工碳汇的形成有所不同，它依赖技术手段的干预，其中碳捕获与封存（CCUS）技术是典型代表，通过人为的技术操作来捕获并储存二氧化碳^[2]。在自然碳汇里，林业碳汇占据着重要地位，它有着独特之处，森林生态系统本身就拥有较高的碳储量，并且具备长期稳定性。依据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）给出的定义，林业碳汇专指通过森林管理活动实现碳储量的增加，具体包括森林自然生长、造林以及再造林等一系列过程。

（二）林业碳汇的作用机制

林业碳汇的形成紧密依赖森林生态系统的碳循环过程。在这个过程中，森林植物发挥着关键作用，它们通过光合作用，不断地将大气中的二氧化碳转化为有机碳，并将其固定在自身的各个部分，像树干、枝叶以及根系中，这是林业碳汇形成的初始且重要步骤。

随着时间推移，森林凋落物以及根系分泌物会进入土壤。在土壤中，经过微生物的分解作用，逐渐转化为土壤有机碳，从而实现了碳的长期储存，进一步巩固了林业碳汇。而且，木材产品使用周期的延长，也为碳汇做出贡献，比如建筑用的木材，其碳储存时间能够长达数十年，甚至更久^[3]。

值得注意的是，林业碳汇的作用机制并非一成不变，而是具有动态性。它会受到诸多因素的影响，例如森林年龄，成熟林的碳汇能力相对稳定，而幼龄林和人工林在生长阶段，固碳速率更高；树种组成不同，固碳能力也有差异；气候条件的变化同样会改变碳汇能力。

（三）碳汇功能的影响因素分析

林业碳汇功能的强弱并非由单一因素决定，而是多种因素综合作用的结果。在自然因素中，气候条件的影响力不容小觑，温度和降水直接左右着植物的光合作用效率以及土壤微生物活性。适宜的温度和充足的降水，能让植物光合作用更高效，土壤微生物也能更活跃地参与碳循环。土壤类型与养分状况也很关键，不同的土壤类型，其碳储存潜力不同，养分丰富的土壤更有利于碳的长期储存。树种特性同样影响着碳固定效率，生长速度快、生物量分配合理的树种固碳能力更强。

在人为因素方面，森林管理措施对碳汇功能影响显著。不合理的采伐会破坏森林结构，导致大量碳释放到大气中；而科学的抚育方式，像合理疏伐、适时施肥等，能优化林分结构，增强树木生长活力，提升固碳能力^[4]。此外，气候变化会通过改变植物物候期、增加极端天气频率等间接影响碳汇功能。政策环境和经济激励措施也不容忽视，它们会影响森林经营主体的决策，进而对碳汇功能的发挥产生作用。

二、提升林业碳汇功能的核心手段

林业碳汇功能的提升依赖于技术创新与科学管理的协同推进。本章聚焦于技术路径的三个关键维度，系统分析森林质量优化、气候智慧技术集成以及碳汇监测体系构建的具体策略，旨在为增强林业碳汇能力提供可操作的技术方案。

（一）森林质量优化与结构调整

森林质量优化与结构调整是提升林业碳汇功能的根基所在。林分抚育技术通过科学的疏伐、修枝等手段，能够有效改善林内的光照和通风条件。充足的光照和良好的通风为优势树种的生长创造了有利环境，同时将那些生长不良、对碳固定贡献较小的低效个体移除，从而提高林分整体的碳固定效率。

低效林改造技术聚焦于生产力低下的次生林或人工纯林。这些林子碳汇能力较弱，通过补植适宜的乡土树种、合理调整林分密度等方式，能将其逐步转化为具有高碳汇能力的复层林或混交林，显著提升碳汇功能^[5]。

树种选择与混交林构建策略充分考虑区域气候条件和土壤特性，优先挑选固碳能力强、抗逆性高的树种进行搭配组合，营造出多树种、多层次的复杂森林结构，这种结构能增强碳汇的稳定性和持续性。

此外，森林保护与灾害防控技术也至关重要。加强森林防火、病虫害防治以及生物入侵管理，能有效减少因自然灾害引发的碳释放风险，切实保障森林生态系统的碳储量安全，稳固林业碳汇的成果。

（二）气候智慧林业技术集成应用

多源遥感监测技术体系通过集成卫星遥感、无人机遥感和地面传感器网络，构建了覆盖空天地一体化的监测网络^[6]。该体系采用多光谱、热红外、合成孔径雷达等多类型传感器，能够获取森林冠层结构、生物量分布、地表温度等多维度数据。卫星遥感提供大范围周期性观测，无人机遥感实现重点区域高分辨率动态监测，地面传感器网络则实时采集近地环境参数。三者协同工作，可实现森林覆盖变化的毫米级精度监测，生物量增长的季度性动态评估，以及林火、病虫害等灾害的早期预警。

人工智能与数字孪生技术基于长期积累的时空大数据，构建了包含碳循环、水文过程、植被演替等模块的森林生态系统模型。通过耦合气候模型输出的不同情景参数，可模拟未来30~50年森林碳汇对温度升高2℃、降水减少15%等极端气候事件的响应过程^[7]。数字孪生系统不仅能预测碳储量变化趋势，还可量化不同管理措施的效果差异。例如在模拟中发现，实施择伐作业比皆伐可减少37%的碳损失，为制定科学的采伐政策提供量化依据。

物联网与精准经营技术通过部署智能传感器网络，实现对森林微环境的厘米级精度监测。在东北落叶松林试验中，每公顷布设200个土壤温湿度传感器和10个气象站，结合北斗定位系统，可动态生成林分尺度的资源分布图。利用GIS空间分析功能，系统可自动规划最佳采伐路径，使集材作业对保留木的损伤率降低至0.8%。基于近地遥感数据的精准施肥系统，通过分析叶片光谱特征，可将氮肥使用量减少23%，同时提升材积生长量18%。这些技术的集成应用，使森林经营从传统经验模式转向数据驱动的精准化管理。

（三）碳汇计量与监测体系构建

在碳汇核算方法学标准化方面，遵循国际通行的IPCC指南是基础，在此之上，结合各区域森林的独特特征，如树种构成、生长环境差异等，制定本土化核算标准。这不仅能使不同地区、不同类型的碳汇项目在同一标准下进行比较，还能提高核算结果的可信度，为碳汇交易等活动提供可靠依据。

动态监测网络建设需要全面且系统。从样地实测获取精确的

实地数据，到利用遥感反演获取大面积森林的信息，再通过模型模拟对数据进行补充和预测，构建起国家级、省级和县域级的多级监测体系，实现对森林碳储量变化的长期、连续跟踪。

数据融合与智能分析技术则通过整合气象、土壤、森林资源等多源异构数据，运用机器学习算法建立碳汇预测模型^[6]。这样可以充分挖掘数据价值，提升碳汇估算的精度，及时反映碳汇变化情况，为林业碳汇管理和决策提供有力支持。

三、促进碳汇功能提升的制度保障

制度保障是释放林业碳汇潜力的关键驱动力。本章围绕碳汇交易市场、生态补偿政策及法规标准体系三个维度，系统分析如何通过制度设计激励森林碳汇的规模化发展，为技术路径的落地实施提供政策支持与法律保障。

（一）碳汇交易市场机制设计

碳汇交易市场作为实现生态价值转化的重要市场化手段，在推动林业碳汇发展进程中占据关键地位^[9]。项目准入与核证标准的精准制定尤为重要，明确碳汇项目的技术要求，规定严格且科学的监测方法，坚守额外性原则，只有这样，才能确保进入市场的交易标的真实可靠、具备可核查性，从源头上保障市场的规范运行。

交易规则与市场流动性建设是市场稳健发展的核心要素。其中，定价机制需科学合理，充分反映碳汇价值；交易平台建设要高效便捷，提升交易效率；参与者资质管理应严格规范，筛选优质参与者。同时，借助标准化合约和信息公开，提升市场透明度，增强市场参与者的信心。

与全国碳市场的衔接机制是拓宽碳汇交易市场发展空间的关键。建立统一的碳汇计量标准和交易规则，能够有效推动林业碳汇项目融入全国碳排放权交易体系，进而增强市场活跃度，提升市场的融资能力，为林业碳汇产业注入强大发展动力。

（二）生态补偿与财政支持政策

生态补偿与财政支持政策在推动森林碳汇发展进程中意义重大，其核心目的在于弥补森林碳汇的外部性成本。由于不同区域的森林碳汇功能重要性和经济发展水平存在显著差异，因此制定差异化生态补偿标准十分必要。通过综合考量这些因素，设定动态补偿额度，既能有效激励地方积极开展生态保护工作，又能兼

顾地方发展需求，实现生态保护与地方经济发展的平衡。

碳汇专项补贴政策作为财政支持的关键手段，聚焦造林、抚育等关键环节，为经营主体提供资金支持，极大地减轻了他们的前期投入压力，从而有效提升了经营主体参与森林碳汇项目的积极性。

绿色金融产品创新则进一步拓展了森林碳汇的融资渠道。通过开发碳汇收益权质押贷款、林业碳汇债券等金融工具，能够吸引社会资本参与碳汇项目投资，形成多元化的融资体系，为森林碳汇产业的发展提供持续的资金保障。

（三）法规与标准体系完善

法规与标准体系在提升碳汇功能的过程中，起到了法治基石的作用。为了确保碳汇权益得到法律保障，必须通过立法程序，对森林碳汇的财产属性进行清晰界定，并明确收益分配机制^[10]。这一举措将有效保障林权主体的合法权益，激发他们参与碳汇项目的积极性，从而推动碳汇功能的提升。

技术标准与监测规范的细化同样至关重要。我们需要精确规定碳汇核算方法，设定合理的监测频率，严格把控数据质量要求。这样不仅能使碳汇项目在国内合规开展，还能提高我国碳汇项目在国际上的认可度，增强国际竞争力。

此外，跨部门协同管理机制是提升碳汇功能的重要支撑。林业、生态环境、财政等多部门需建立紧密的联动机制，对碳汇项目的审批、监测、交易等环节进行统一协调。这种协同管理机制有助于避免部门间政策冲突，消除管理空白，形成工作合力，确保碳汇项目高效、有序推进。

四、结束语

总的来说，在气候变化的大背景下，提升林业生态系统碳汇功能迫在眉睫且意义深远。从理论层面明晰林业碳汇概念、机制和影响因素，是探索提升路径的基石。技术上，森林质量优化、气候智慧林业技术应用和碳汇计量监测体系构建，为碳汇功能提升提供了实践手段。政策制度方面，碳汇交易市场、生态补偿和法规标准体系，为技术落地与碳汇发展提供保障。未来，需持续强化技术创新，促进技术与政策的深度融合，提升林业碳汇在全球碳减排中的贡献，推动林业生态系统可持续发展，为应对气候变化提供有力支撑。

参考文献

- [1] 王思怡. 林业碳汇项目碳减排效益测度研究 [D]. 兰州大学, 2023. DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2023.003253.
- [2] 孙国茂, 魏震昊. 海洋碳汇对实现碳中和目标的作用与意义——一个与海洋碳汇理论框架相关研究的文献综述 [J]. 中国海洋经济, 2022, 7(02): 101–128.
- [3] 彭红军, 徐笑, 俞小平. 林业碳汇产品价值实现路径综述 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2022, 46(06): 177–186.
- [4] 崔玉姝, 邵红岭. 碳中和视角下林业碳汇融资研究: 综述与展望 [J]. 会计师, 2022, (13): 10–12.
- [5] 胡忠宇, 苏建兰. 森林植被碳储量研究综述与展望 [J]. 农业与技术, 2022, 42(12): 58–62. DOI: 10.19754/j.nyyjs.20220630014.
- [6] 汪悦. 基于时空格局的长三角旅游业碳源碳汇研究 [D]. 安徽理工大学, 2022. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000461.
- [7] 贺炬成. 广东省红树林湿地生态系统碳汇研究综述 [J]. 中国林业产业, 2021, (12): 54–57.
- [8] 陈思羽, 吕梦燕, 毛赫, 等. 碳排放权及林业碳汇交易情况综述 [J]. 吉林林业科技, 2021, 50(05): 41–45. DOI: 10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2021.05.012.
- [9] 李略略. “一带一路”国际森林碳交易市场构建问题研究 [D]. 东北林业大学, 2021. DOI: 10.27009/d.cnki.gdblu.2021.000286.
- [10] 高鸿杰. 广东省森林碳汇经济价值评估及影响因素研究 [D]. 仲恺农业工程学院, 2020. DOI: 10.27700/d.cnki.gzcn.2020.000091.