

森林碳汇能力评估及效益分析

唐善良 王 军

江苏省海洋地质调查院 江苏 南京 220001

摘要: 本文聚焦森林碳汇能力评估与效益分析, 阐述其基础理论及影响因素, 构建涵盖碳储量、通量与潜力的评估指标体系, 综合运用地面监测、遥感反演与模型模拟等方法开展评估。研究揭示森林碳汇在气候调节、水土保持、生物多样性保护等方面具有显著生态效益, 同时通过碳交易与生态产品价值实现创造经济效益, 在就业促进与区域均衡发展中发挥社会效益。最后提出经营优化、政策创新与科技赋能等提升策略。

关键词: 森林碳汇; 碳汇能力评估; 综合效益

1 森林碳汇基础理论与影响因素

1.1 森林碳汇核心概念

森林碳汇指森林植物经光合作用吸收大气中的二氧化碳, 并固定于植被或土壤, 直接降低大气中温室气体浓度。作为陆地生态系统主要碳汇类型, 它在全球碳循环中地位核心, 如热带雨林年碳吸收量可达全球总量1/2, 这得益于当地终年高温多雨的气候, 支撑了高生物量积累^[1]。从机制上, 森林碳汇形成依赖植物叶片气孔吸收二氧化碳, 结合根系吸收的水分, 在叶绿体中经酶催化将无机碳转化为有机物, 既为植物生长供能, 又将碳元素储存在树干、根系及土壤有机质中。其中, 土壤碳库固碳作用关键, 其碳储量可达植被碳库2-3倍。

1.2 森林碳汇能力的影响因素

森林碳汇能力受自然因子与人为干预的双重影响, 具体表现为以下维度; 气候因子: 温度与降水构成影响碳汇能力的首要自然条件。在水热条件优越的热带地区, 植物光合作用效率显著提升, 如亚马逊雨林年固碳量达1.5亿吨。二氧化碳浓度升高可通过增强植物气孔导度与水分利用效率, 间接促进生物量积累, 但这一效应存在阈值, 当浓度超过600ppm时, 部分树种的光合产物分配可能转向呼吸消耗。生物因子: 树种特性直接影响碳汇效率^[2]。阔叶林因叶片表面积大、光合速率高, 其单位面积碳储量较针叶林高30%-50%。林龄结构方面, 成熟林(40年以上)的碳汇能力是幼龄林的2-3倍, 但过熟林因枯立木增加可能导致碳释放。森林密度需维持在合理区间, 以云南松林为例, 当胸高断面面积达到25m²/ha时, 碳汇效率达到峰值, 超过30m²/ha则因种内竞争加剧导致固碳量下降。土壤因子: 土壤有机质含量与碳汇能力呈正相关。黑土区森林土壤碳密度可达120tC/ha, 是红壤区的2倍。土壤pH值通过影响微生物群落结构间接调控碳分解速率, 中性土壤(pH6.5-7.5)的碳释放速率较酸

性土壤低40%。人为因子: 土地利用变化是导致碳流失的主因。森林转变为农田可使土壤有机碳损失50%-70%, 而合理轮作制度可减缓这一过程。森林经营活动对碳汇的影响具有双向性, 皆伐作业导致碳储量瞬间下降30%-50%, 而择伐结合抚育间伐可使碳汇量在10年内恢复至原有水平的80%。

1.3 森林碳汇的计量边界与原则

碳汇计量需明确项目边界与碳库范围。根据IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change(政府间气候变化专门委员会))指南, 森林碳汇项目边界应包含所有受项目活动影响的地理区域, 包括造林区、缓冲区及潜在影响区。碳库选择需遵循可监测性原则, 通常包括地上生物量、地下生物量、凋落物、枯死木及土壤有机碳五个基本库。

计量原则体现为五方面: (1) 保守性原则, 要求参数选择避免高估碳汇增量, 如基线情景设定需考虑未来土地利用变化的不确定性; (2) 透明性原则, 所有数据来源与计算方法需公开可查, 如采用国家森林资源清查数据作为活动水平数据; (3) 可比性原则, 参数选取需与IPCC缺省值或国家参考值保持一致, 偏差超过20%需提供科学依据; (4) 降低不确定性原则, 通过增加样地数量(每100公顷至少设置3个样地)与重复测量(每年2次)将误差控制在±10%以内; (5) 成本有效性原则, 在满足精度要求前提下优化监测方案, 如采用激光雷达遥感技术替代部分地面调查, 可使监测成本降低40%。

2 森林碳汇能力评估指标与方法体系

2.1 碳汇能力评估指标体系构建

评估森林碳汇能力需构建涵盖碳储量、碳通量与碳汇潜力三个维度的指标体系。一是碳储量指标, 关注森林现存碳累积状况, 包括单位面积碳密度(tC/ha)、总碳储量(MtC)及年增长率(%)。以长白山温带森

林为例，乔木层是碳储主体，碳密度达85tC/ha，灌木层与草本层生物量少，对整体碳储量贡献率不足5%，分层测算能精准掌握森林各层次碳储特征^[3]。二是碳通量指标，反映森林碳动态交换过程。通过涡度相关技术监测净生态系统交换量（NEE），体现森林吸收或释放二氧化碳的净效果；结合夜间土壤呼吸模型估算生态系统呼吸（Re），即森林呼吸作用向大气释放二氧化碳的量；再通过公式“总初级生产力（GPP）= NEE+Re”算出GPP，代表森林光合作用固定二氧化碳的总量。三是碳汇潜力指标，着眼森林未来碳汇能力变化趋势。采用FORECAST模型模拟不同经营情景下的碳汇轨迹，如提升抚育间伐强度可使碳储量增加；结合气候变化情景，考虑气候因素变化对森林生长和碳循环的影响，预测未来30年碳汇能力变化。

2.2 碳汇能力评估方法体系

评估方法呈现多技术融合特征。地面监测法：设置永久样地（20m×20m）每木检尺，结合异速生长方程算生物量，如杉木生物量模型“ $W = 0.0509 \times (D^2H)^{0.942}$ ”（W为生物量，D为胸径，H为树高）。土壤碳用重铬酸钾氧化法测，采样深1m。遥感反演法：用Landsat8OLI影像提取归一化植被指数（NDVI），结合实测建碳储量反演模型。“森林碳储量遥感反演模型”（来源相关研究）在东北林区R²（决定系数，反映模型拟合优度）达0.82，RMSE（均方根误差，衡量预测值与实测值差异）为12.5tC/ha。激光雷达获三维点云数据，降生物量估算误差至±8%。模型模拟法：用CBM-CFS3（加拿大森林碳预算模型，主要用于用于温室气体清单编制、森林碳动态预测和气候变化影响评估）输入参数模拟碳的储存于流动，如秦岭应用预测森林碳储量精度达92%，土壤碳变化精度85%，这充分表明该模型在模拟秦岭地区森林碳汇动态变化方面具有较高的可靠性和准确性，能够为秦岭地区森林碳汇能力评估提供较为精准的数据支持。

3 森林碳汇多维度效益分析模型

3.1 生态效益分析

森林碳汇生态效益分析可借助“森林生态综合效益评估模型”，集中体现在气候调节、水土保持与生物多样性保护三方面。气候调节上，模型依据森林光合及蒸腾作用原理测算，每公顷成熟林年均吸收二氧化碳10-30吨、释放氧气7-22吨，缓解温室效应。城市森林降温效应显著，模型模拟显示，其冠层遮荫减少30%-50%太阳辐射，蒸腾吸热使地表温度降2-4℃。如北京奥林匹克森林公园，500公顷森林覆盖让周边500米夏季气温降1.5℃，缓解热岛效应；水土保持方面，模型综合森林冠层截

留、枯落物吸持和根系固土机制评估。森林冠层截留15%-40%降水，枯落物持水量达自身干重2-4倍，减少地表径流。黄土高原地区，模型分析表明有林地土壤侵蚀模数比裸地低90%，土壤有机质含量提升50%，形成“土壤水库”；生物多样性保护上，模型基于林分结构与生物栖息关系评估。复杂林分结构创造异质生境（多样生存空间，提供多样食物和栖息场所），为80%陆生物种提供栖息地。云南西双版纳热带雨林每公顷有鸟类120种、昆虫2000种，模型评估其碳汇能力比单一人工林高60%，凸显自然林优势^[4]。

3.2 经济效益分析

森林碳汇项目经济效益主要来自碳交易收入与生态产品价值实现。碳交易市场里，森林依靠碳汇功能获收益，将碳汇量转化为可交易权益。2023年全国碳市场碳排放配额成交均价较2022年上涨23.24%。生态产品价值实现上，森林旅游产业持续发展，吸引游客创造直接收入，2024年我国森林接待游客约10亿人次，直接或间接创效超5000亿元。森林康养作为新兴业态，融合生态与健康理念，形成“生态+健康”模式，带动就业，经济效益可观。截至2024年底，产业规模突破8000亿元，带动就业约500万人，成绿色经济新引擎。成本效益分析显示，造林项目有初始投入和年维护成本，但按一定计入期测算，内部收益率可观，高于传统农业投资回报^[5]。森林生长到特定阶段，木材销售与碳汇收益叠加，可提升整体收益，实现生态与经济效益协同。“绿色银行”模式正推动林业投资从政策驱动向市场驱动转型。

3.3 社会效益分析

森林碳汇项目社会效益主要体现在就业促进与区域均衡发展。就业方面，森林经营活动形成“种植-管护-采伐-加工”全产业链就业体系。每营造1万公顷森林，约提供季节性就业岗位3450-6800个，长期管护岗位67-100个。广西实施国家储备林项目，带动12万贫困人口参与森林经营，人均年增收1.2万元，形成“生态扶贫”长效机制。区域均衡发展上，碳汇项目通过生态补偿机制缩小城乡差距。浙江省自2023年起提高省级以上生态公益林补偿标准，山区县林农人均年收入增加约350-450元，返贫率下降约1.2-1.5个百分点。公众意识提升方面，碳汇教育项目增强低碳认知。北京延庆区“碳汇积分”活动，将居民绿色行为转化为积分兑换物品，参与率从12%提升至62%，绿色出行比例从35%跃升至62%，为构建低碳社会提供创新范式。

4 森林碳汇能力提升与效益优化的策略建议

4.1 森林经营与管理策略

实施精准提升工程以增强森林生态效能,需着重把握三个关键点。其一为结构优化,构建混交林比例达60%以上的复层异龄林体系。例如将马尾松纯林改造为松阔混交林,能显著优化林分结构,使碳汇能力提升35%。其二是密度调控,运用目标直径经营法,将单位面积株数精准控制在合理区间^[6]。像桉树人工林,初始密度从1667株/公顷降至1111株/公顷,到20年时碳储量可增加18%。其三是土壤改良,施用生物炭可提高土壤有机碳含量20%-40%;在华北石质山区,采用客土回填与保水剂结合技术,能使造林成活率从65%大幅提升至92%。

4.2 政策支持与制度保障

政策体系要切实发挥效能,需在三个关键领域实现突破。产权激励方面,大力推广“三权分置”改革,清晰界定碳汇的所有权、经营权与收益权,以此激发各方参与碳汇开发的积极性。交易机制上,着力建立全国统一的碳市场,并将林业碳汇纳入CCER交易体系。通过优化流程,压缩碳汇项目备案周期,提高交易效率,促进碳汇资源的流通。生态补偿领域,根据地方收入水平适当提高补偿标准,同时建立跨区域横向补偿机制。如长江经济带11省市积极行动,签订首个跨省流域横向生态保护补偿协议,补偿资金规模达100亿元,有力推动了区域生态协同保护^[7]。

4.3 科技创新与应用

技术创新聚焦育种、监测及智慧管理三大方向,育种技术:通过基因编辑培育高固碳树种,如通过转基因技术杨树的光合效率提高30%,分子标记辅助选择技术使杉木优良种源遗传增益达15%。监测技术:量子传感技术实现土壤碳含量毫米级探测,误差率降低至±1%。区块链技术确保碳汇数据不可篡改,交易透明度提升80%。智慧管理:搭建“天空地一体化”监测平台,整合卫星遥感数据与地面传感器信息。AI算法可提前3个月预测森林病

虫害,准确率达90%。通过上述理论构建、方法创新与策略实施,森林碳汇将在应对气候变化、推动绿色发展发挥不可替代的作用^[8]。

结束语

森林碳汇作为应对气候变化的关键自然解决方案,其能力评估与效益分析对推动绿色发展具有重要意义。本文通过系统构建评估体系与多维度效益模型,揭示了森林碳汇的复合价值。未来需持续完善计量监测技术,优化政策激励机制,强化科技创新驱动,促进碳汇项目规模化发展。通过生态、经济、社会效益的协同提升,森林碳汇将为构建人与自然和谐共生的现代化提供重要支撑。

参考文献

- [1]王丽,张多,林进,刘鹏,李想.林业对气候变化的影响及应对措施——基于IPCC《全球升温1.5℃特别报告》的分析[J].国土资源情报,2020(07):27-30.
- [2]张娟,陈钦.森林碳汇经济价值评估研究——以福建省为例[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(05):121-128.
- [3]唐正涛.森林碳汇生态工程造林技术分析[J].南方农业,2021,15(30):134-135.
- [4]苑明睿,杨峰山,蔡柏岩.完善森林经营管理增强碳汇能力[J].中国农学通报,2020(08):37-42.
- [5]任云卯,温志勇,王敏男,等.北京市森林碳汇能力评价[J].北京林业大学学报,2023,45(12):108-119.
- [6]汤熙,黄云浩,马玲,等.汉中市森林碳汇评估及发展建议[J].现代农业科技,2024(21):95-97,102.
- [7]杨多林,王玉龙.祁连山森林植被碳汇功能评估及其对气候变化的影响研究[J].今日农业,2025(2):B73.
- [8]金虎,胡昆.林业碳汇管理在森林综合发展规划中的应用[J].林业科技情报,2025,57(2):69-71.