

森林生态系统在应对气候变化中的碳汇功能研究

吕 辉

陕西省龙草坪林业局 陕西 咸阳 712100

摘要：本文围绕森林生态系统碳汇功能与气候变化的关联展开研究，阐述碳汇功能理论基础，对比直接测量法、间接估算法的优劣及不确定性来源，分析不同森林类型碳汇差异与时空动态特征，剖析气候变化与人类活动的双重驱动作用，提出可持续管理策略。研究表明，森林碳汇受群落结构、气候条件等多重因素调控，天然林与特殊森林类型碳汇优势显著，人类活动可通过科学管理优化碳汇效能。本文为精准评估森林碳汇潜力、制定气候变化应对方案提供理论支撑，助力生态系统碳汇功能最大化与全球气候治理。

关键词：森林生态系统；碳汇功能；气候变化；碳循环；生态管理

引言：全球气候变化加剧引发一系列生态问题，森林作为陆地生态系统最大碳库，其碳汇功能成为应对气候变化的关键抓手。森林通过光合作用固定大气二氧化碳，在调节全球碳循环、缓解温室效应中发挥不可替代作用。当前，不同森林类型碳汇能力差异、动态变化机制及管理策略仍需深入探索。基于此，本文系统梳理森林碳汇理论基础与评估方法，分析碳汇时空变化规律及驱动因素，构建科学管理体系，为提升森林碳汇潜力、推动“双碳”目标实现及生态环境可持续发展提供参考。

1 森林生态系统碳汇功能的理论基础

森林生态系统碳汇功能的核心理论源于碳循环与光合作用机制，是生物圈与大气圈碳交换的关键环节。其本质是森林通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，将其转化为有机碳储存在植被、土壤及枯落物中，形成碳库的积累效应。该功能的理论核心包括碳源与碳汇的动态平衡，当森林生态系统固定的碳量大于释放量时，即呈现碳汇效应。基于生态系统生态学理论，森林碳汇受群落结构、物种组成、养分循环等内部因素调控，且与全球碳循环紧密关联^[1]。热力学定律为碳汇能量转化提供理论支撑，光合作用的量子效率、呼吸作用的碳释放强度，共同决定碳汇能力的强弱，为后续碳汇评估与管理提供了坚实的理论依据。

2 森林碳汇的评估方法与模型

2.1 直接测量法

直接测量法是森林碳汇评估中精度较高的基础方法，核心通过实地采样测定森林各碳库储量并计算碳汇量。该方法主要针对植被碳库、土壤碳库及枯落物碳库开展工作，植被碳库测量多采用标准地调查法，选取典型样地，测定树木胸径、树高，结合生物量模型换算生物量，再按碳含量系数（通常取0.5）计算碳储量。土壤

碳库测量需分层采集土壤样品，通过重铬酸钾氧化-外加热法测定有机碳含量，结合土壤容重、土层厚度计算储量。枯落物碳库则通过收集样方内枯落物，烘干称重后换算碳量。直接测量法数据可靠性强，但耗时耗力、成本较高，受地形、森林类型影响，难以实现大范围快速评估，适用于小尺度精准监测与验证。

2.2 间接估算法

间接估算法依托遥感技术、地理信息系统及数学模型，实现大范围森林碳汇的快速评估，弥补直接测量法的局限性。该方法以遥感数据为核心，通过植被指数（如NDVI）反演森林生物量，再推算碳储量，具有覆盖范围广、效率高、动态监测能力强的优势。常用模型包括经验模型、半经验半机理模型及机理模型，经验模型基于实测数据建立遥感因子与碳储量的统计关系，操作简便；机理模型结合光合作用、呼吸作用等生理过程，能反映碳循环内在机制^[2]。另外，还可通过区域尺度的森林资源清查数据，结合空间插值方法估算碳汇分布。间接估算法适用于区域及全球尺度评估，但精度受遥感数据分辨率、模型参数适用性影响较大，需结合直接测量数据校准。

2.3 不确定性分析

森林碳汇评估的不确定性贯穿整个研究过程，源于数据获取、模型选择、参数设定及尺度转换等多方面。数据层面，直接测量的样地代表性不足、遥感数据误差、清查数据时效性差异，均会导致基础数据偏差；模型层面，经验模型的地域性局限、机理模型的参数简化，难以完全复刻复杂的碳循环过程，引发模型不确定性。参数设定中，碳含量系数、生物量模型参数的默认值与实际不符，会进一步放大误差。尺度转换时，小尺度实测数据向区域尺度扩展的过程中，易因空间异

质性忽略局部特征。气候变化、人类活动的动态干扰,也增加了评估的不确定性。需通过多方法对比、参数敏感性分析、长期定位监测,降低不确定性影响。

3 不同森林类型的碳汇功能比较

3.1 天然林与人工林的碳汇差异

天然林与人工林的碳汇功能差异源于群落结构、演替阶段及经营方式的不同,整体呈现互补特征。天然林群落结构复杂,物种丰富,经过长期演替形成稳定的碳库体系,植被碳库与土壤碳库储量较高,且碳汇稳定性强,后期碳汇速率虽逐渐放缓,但碳储存周期长。其土壤碳库受枯落物分解、根系分泌物影响,积累了大量有机碳,占总碳储量的比例可达60%以上。人工林多为单一树种,群落结构简单,初期生长速度快,碳汇速率显著高于天然林,能快速实现碳积累。但人工林土壤碳库储量较低,且受经营活动(如采伐、施肥)影响,碳汇稳定性弱,易出现碳释放风险。天然林的生物多样性保护功能,能提升碳汇系统的抗干扰能力,而人工林可通过树种优化,实现定向高效碳汇。

3.2 不同气候带森林的碳汇特征

气候条件(温度、降水)的差异,决定了不同气候带森林的碳汇特征具有显著空间异质性。热带雨林气候区水热条件充沛,植被生长旺盛,光合作用效率高,碳汇速率居各气候带之首,且植被碳库储量大,但土壤碳库因高温高湿导致有机质分解快,积累量有限。温带落叶阔叶林受四季分明气候影响,碳汇呈现季节性波动,夏季光合作用强,冬季落叶后呼吸作用减弱,碳汇速率相对稳定,土壤碳库因温度适中、枯落物丰富,积累效果较好。寒温带针叶林气候寒冷,植被生长缓慢,碳汇速率较低,但低温抑制有机质分解,土壤碳库储量极高,是重要的长期碳储存库。干旱半干旱地区森林受降水限制,植被覆盖率低,碳汇能力弱,碳库总量较小,对气候波动敏感。

3.3 特殊森林类型的碳汇作用

特殊森林类型凭借独特的生境条件与群落特征,发挥着不可替代的碳汇作用,成为全球碳循环的重要节点。红树林作为滨海湿地森林,兼具陆地与水生生态系统特性,根系发达且能捕获水体中的有机碳,碳汇效率是普通森林的2-3倍,土壤碳库储量极高,被称为“蓝碳宝库”,同时能抵御海岸侵蚀,提升生态系统稳定性。竹林生长速度快,萌发能力强,每年固碳量显著高于同等面积的针叶林与阔叶林,且竹材利用可实现碳储存转移,减少碳释放^[3]。高山森林处于高海拔、低温环境,植被生长缓慢但碳储存周期长,土壤有机碳积累量大,且

对气候变化响应敏感,其碳汇变化能反映全球气候波动趋势。

4 森林碳汇的动态变化与驱动机制

4.1 时间尺度上的碳汇变化

森林碳汇在不同时间尺度上呈现显著的动态变化特征,受演替阶段、气候波动及经营活动调控。短时间尺度(年际、季节)内,碳汇变化主要受气候因子影响,夏季水热条件适宜,光合作用旺盛,碳汇量达到峰值;冬季低温、光照不足,部分森林落叶或停止生长,碳汇速率下降甚至出现碳释放。中时间尺度(数十年)内,森林演替是核心驱动因素,幼林阶段碳汇速率快速上升,中林阶段达到稳定峰值,成熟林阶段碳汇速率逐渐趋近于零,进入碳汇饱和状态。长时间尺度(百年以上)内,碳汇变化与全球气候变化、地质活动关联紧密,冰期与间冰期的气候交替,会导致森林分布范围变化,进而引发碳库总量的大幅波动,同时人类活动的长期干预也会改变碳汇的自然变化轨迹。

4.2 空间尺度上的碳汇差异

森林碳汇在空间尺度上的差异的核心驱动因素是地理环境异质性与人类活动分布不均,呈现从局部到全球的梯度变化特征。小空间尺度(地块、流域)内,碳汇差异源于微地形、土壤质地、群落结构的异质性,阳坡与阴坡、肥沃土壤与贫瘠土壤上的森林,碳汇能力可相差30%以上。中空间尺度(区域、国家)内,气候带分布、森林类型构成是主要影响因素,热带地区森林碳汇总量占全球的40%以上,温带与寒温带地区次之,干旱半干旱地区最低。大空间尺度(全球)上,碳汇差异与大陆分布、大气环流相关,南美洲、非洲的热带雨林区域是全球碳汇热点,而欧洲、北美洲因人工林经营与天然林保护,碳汇呈现稳步增长趋势,亚洲则因森林资源的恢复与利用,碳汇空间分布差异显著。

4.3 气候变化与人类活动对碳汇的双重影响

森林碳汇受气候变化与人类活动的双重影响,呈现复杂的正负反馈效应。气候变化方面,气温升高、降水格局改变会直接影响森林光合作用与呼吸作用效率,适度升温可促进温带森林生长,提升碳汇能力,但极端高温、干旱会导致森林枯萎死亡,引发碳释放;大气CO₂浓度升高具有“肥效作用”,能促进植被生长,但同时会加剧气候变暖,形成恶性循环。人类活动的影响具有两面性,积极方面,人工造林、天然林保护、退耕还林等措施,能显著增加森林面积与碳库储量,提升碳汇能力;消极方面,森林采伐、土地利用转换、环境污染等,会破坏森林生态系统,导致大量碳释放,削弱碳汇

功能。二者相互交织,人类活动可通过干预森林管理,缓解气候变化对碳汇的负面影响,实现碳汇功能的稳定提升。

5 森林碳汇的可持续管理策略

5.1 自然保护与恢复措施

自然保护与恢复是维持森林碳汇功能稳定性的基础策略,核心是减少人为干扰,促进森林生态系统的自然演替与自我修复。需划定天然林保护红线,严禁非法采伐、开垦等破坏性活动,保护原始森林的完整碳库体系,尤其是热带雨林、沼泽森林等碳汇热点区域。针对退化森林,实施生态修复工程,采用近自然造林模式,选用乡土树种,构建结构复杂、物种丰富的群落,提升生态系统稳定性与碳汇潜力。同时,加强湿地森林、高山森林等特殊森林类型的保护,恢复退化湿地的水文条件,促进泥炭碳库积累。建立森林生态系统监测网络,实时跟踪植被、土壤碳库变化,为保护与恢复措施的优化调整提供数据支撑,实现碳汇功能的长期维持。

5.2 科学经营与优化管理

科学经营与优化管理旨在通过精准干预,提升森林碳汇效率与可持续性,实现生态效益与经济效益的平衡。针对人工林,优化树种配置,选择速生、高固碳能力的乡土树种,构建混交林,改善群落结构,提升碳汇速率与稳定性;采用合理的采伐制度,推行择伐、渐伐替代皆伐,减少碳释放,同时促进森林更新。针对天然林,实施结构化经营,调整林分密度,改善光照、水分条件,促进优势树种生长,提升碳汇潜力。加强森林养分管理,合理施肥、改良土壤,提升土壤肥力与碳储存能力;结合病虫害综合防治,减少森林灾害损失,避免碳库流失,通过精细化管理实现森林碳汇的最大化与可持续化。

5.3 政策与经济激励机制

政策与经济激励机制是推动森林碳汇可持续管理的重要保障,能引导社会资源向森林碳汇领域倾斜。政策层面,需完善森林资源保护法律法规,明确碳汇管理责任,将碳汇指标纳入生态环境保护考核体系;建立碳汇交易市场,将森林碳汇纳入全国碳排放权交易体系,实现碳汇价值市场化转化^[4]。经济激励方面,加大财政投入,设立森林碳汇专项基金,支持人工造林、森林恢复等项目;对林业经营主体给予补贴、税收减免等优惠政

策,提升其参与碳汇管理的积极性。加强国际合作,引入外资与先进技术,借鉴国际碳汇交易与管理经验,构建跨区域、跨国家的碳汇合作机制,推动全球森林碳汇事业的协同发展。

5.4 技术创新与公众参与

技术创新与公众参与是提升森林碳汇管理水平、扩大碳汇影响力的关键路径。技术创新方面,研发高精度碳汇监测技术,整合遥感、物联网、大数据等技术,构建全域、实时、精准的碳汇监测网络;优化碳汇评估模型,提升模型的适用性与精度,为碳汇管理提供科学支撑;研发低碳林业技术,推广节能造林、生物质能利用等技术,减少林业生产过程中的碳排放。公众参与方面,通过科普宣传、教育活动,提升公众对森林碳汇的认知度与重视度,引导公众树立低碳生活理念;鼓励公众参与植树造林、森林保护等志愿活动,形成全社会共同参与的良好氛围。同时搭建公众参与平台,畅通意见反馈渠道,鼓励公众监督森林资源保护与碳汇管理工作,凝聚全社会力量推动森林碳汇可持续发展。

结束语

森林生态系统碳汇功能是应对气候变化的重要生态支撑,其效能提升需依托理论突破、技术创新与管理优化。本文全面分析碳汇理论、评估方法、动态特征及管理策略,明确多重因素对碳汇的综合影响。未来需强化长期定位监测,优化评估模型以降低不确定性,结合区域特点推进森林保护与科学经营。同时,完善政策激励与公众参与机制,推动技术成果转化。唯有多维度协同发力,才能充分释放森林碳汇潜力,为全球气候治理与生态安全提供坚实保障,实现人与自然和谐共生。

参考文献

- [1]魏丽娜.气候变化背景下苏州地区森林生态系统的适应性管理研究[J].林业科技情报,2025,57(3):97-98.
- [2]焦建平.气候变化对典型生态系统的影响及其应对策略分析[J].农业灾害研究,2025,15(1):170-172.
- [3]任玥颖,贾夏,赵永华,等.未来气候变化情景下河西走廊生态系统服务变化及其驱动力[J].生态学报,2025,45(18):8821-8836.
- [4]吴石磊,马程耀.全球森林生态系统面临多重挑战[J].生态经济,2024,40(11):1-4.