

森林生态系统碳储量测算方法探析

甘露

南昌工学院, 江西 南昌 330108

DOI: 10.61369/SSSD.2025120032

摘 要 : 森林生态系统作为全球碳循环的关键组成部分, 其碳储量的准确测算对于应对气候变化具有重要意义。当前, 森林碳储量测算方法主要包括遥感技术、地面调查和模型模拟等。然而, 这些方法在精度、成本和时效性方面仍存在不足。本研究旨在综述现有森林碳储量测算方法的发展历程, 分析其优缺点, 并探讨未来研究趋势。通过对比不同方法在不同类型森林中的应用效果, 识别出当前研究中的主要问题和空白点, 为森林碳管理提供科学依据和技术支持。

关 键 词 : 森林生态系统; 碳储量测算; 测算方法

Analysis of Carbon Stock Measurement Methods in Forest Ecosystems

Gan Lu

Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330108

Abstract : As a key component of the global carbon cycle, accurate measurement of carbon stocks in forest ecosystems is of great significance for addressing climate change. Currently, the main methods for measuring forest carbon stocks include remote sensing technology, ground surveys, and model simulation. However, these methods still have shortcomings in terms of accuracy, cost, and timeliness. This study aims to review the development history of existing forest carbon stock measurement methods, analyze their advantages and disadvantages, and explore future research trends. By comparing the application effects of different methods in different types of forests, the main problems and gaps in current research are identified, providing scientific basis and technical support for forest carbon management.

Keywords : forest ecosystem; carbon stock measurement; measurement method

一、森林生态系统碳储量测算的重要性

(一) 森林碳汇功能

森林生态系统在全球碳循环中发挥着不可或缺的作用, 其通过光合作用有效吸收大气中的二氧化碳, 并将其转化为植物体内的有机物质, 从而实现碳的固存。这一过程显著降低了大气中的碳浓度, 对于缓解全球气候变化具有深远意义, 同时也是陆地生态系统碳循环的核心环节^[1]。

光合作用作为森林碳汇功能的基础, 促使植物在阳光照射下将二氧化碳与水转化为有机化合物并释放氧气。在此转化过程中, 二氧化碳是构建植物有机化学物质的关键要素。植物体的各个组成部分, 包括茎、枝叶和根系, 均含有碳元素, 但其分布比例因植物种类、年龄以及生长模式的不同而呈现显著差异^[2]。

此外, 森林生态系统中的碳亦大量储存于土壤之中, 主要以部分分解的植被残骸、分解生物体以及细根的形式存在于地表及上层土壤层。土壤碳储量受环境条件与区域历史因素的影响, 表现出显著的空间变异性。当土壤分解者作用于枯死植被时, 土壤碳量逐渐积累; 同时, 植物根系的生长也促进了碳向土壤的“注

入”。森林生态系统在全球碳循环中的关键作用并非单一过程, 而是与土壤碳储存、植物呼吸作用、植被死亡及分解等多个相互关联的过程共同作用, 共同构筑了其在全球碳循环中的重要地位。

(二) 碳储量测算的意义

森林作为地球上最大的陆地碳库, 其碳储量的动态变化直接关系到全球碳循环的平衡与气候变化的进程^[3]。因此, 精确估算森林生物量及其碳储量, 对于深入理解森林生态系统的碳汇潜力, 以及评估其对气候变化的适应性与反馈机制, 均具有举足轻重的意义。

森林生物量涵盖了森林生态系统中地上部分的生物量, 包括树木的茎、枝、叶, 以及地下的根系生物量。通过对这些组分的生物量进行逐级称重并累加, 可以获得森林的总生物量。此种直接测量法所获取的数据通常被认为是准确可靠的, 并常作为验证其他估算方法有效性的“真值”。然而, 鉴于其巨大的工作量, 该方法在实际操作中较少应用于森林乔木层的生物量测定, 而更常用于灌木及草本层的生物量测定。

相对生长法是另一种估算森林生物量的方法, 基于植物各部分之间或总体与部分之间存在相关关系, 通过对生物体某一分量

课题项目:

1. 2022 年省教育厅科学技术研究项目, 课题名称: 江西省森林生态系统碳储量测算及碳汇能力提升研究 (课题编号: GJJ2202917)。

2. 校级课题, 城乡梯度树木根际氮转化与根际效应研究 (课题编号: NGKJ-18-12), 的研究成果。

的测定来推断其另一分量或总量^[4]。在应用这种方法研究森林各组分生物量的准确程度关键在于对各种相关关系的准确描述,即选择合适的关系模型。在得到生物量的基础上,然后根据室内分析,测得地上部分、枯落物和根系等不同组分的碳含率,根据生物量和碳含率计算获得碳储量的具体数值。最终,参考 IPCC 提供的公式,就可完成森林植物碳储量的计算。准确测算碳储量可以评估森林生态系统的健康状况和气候变化的响应,我们不仅可以评估森林生态系统的健康状况,还可以预测其对气候变化的响应,从而为制定应对气候变化的策略提供科学依据。

二、常用的森林碳储量测算方法

(一) 直接测量法

直接测量法作为森林生态系统碳储量测算的基础手段,依赖于实地采样与物理测定获取精确数据。该方法通过建立固定样地,对植被生物量和土壤有机碳进行系统性调查,从而实现碳储量的量化评估。其中,样地清查法是直接测量的核心方式,具有较高的准确性和可信度,广泛应用于小范围或典型区域的碳汇研究^[5]。在实际操作中,研究人员需在选定样地内开展每木检尺,记录树木的种类、数量、胸径、树高等参数,并结合生物量测定技术估算碳储存水平。

生物量调查多采用收获法,具体可分为皆伐法、平均木法、径级选择法和相对生长法。皆伐法通过对样地内所有个体进行砍伐处理,分别收集并称量树干、枝叶、根系等各部位的鲜重,随后取样烘干测定干重,进而计算总生物量。此方法虽精度最高,但耗时耗力且破坏生态结构,适用于科研示范样地。平均木法则基于林分整体特征选取代表性单株作为“平均木”,测定其生物量后乘以单位面积株数得出总量,既减少采样强度又保持一定准确性。径级选择法依据胸径分布,在不同径级中按比例选取标准木,测定其生物量后通过断面面积权重换算为全样地生物量,提升了异质性林分的代表性。相对生长法利用植物器官间的幂函数关系,通过测量易于获取的变量如胸径或树高,推算难以直接测定的部分生物量,实现非破坏性估算^[6]。

在获得生物量数据后,需进一步测定各组分的碳含量。通常将样品送入实验室进行元素分析,确定地上木质部、叶片、枯落物及根系的碳含率,一般采用干重百分比表示。将各部分生物量与其对应碳含率相乘后累加,即可得出样地单位面积的碳储量。按照 IPCC 推荐的碳转换公式,植物碳储量等于生物量乘以 0.47 至 0.50 的默认碳转换系数,这一方法在缺乏实测碳含率时提供标准化参考。土壤碳储量则通过分层取样测定土壤有机碳浓度,并结合容重与土层厚度计算。尽管直接测量法受限于空间覆盖能力,但在验证模型和校准遥感数据方面发挥不可替代的作用。

(二) 模型估算法

模型估算法在森林生态系统碳储量测算中发挥着关键作用,尤其适用于大范围、连续性和动态监测需求。该方法通过整合遥感数据与生态过程模型,构建起能够反映森林碳循环机制的量化框架。遥感技术作为数据获取的核心手段,利用不同波段对植被

冠层的光谱响应进行解析,提取如归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (EVI) 以及叶面积指数 (LAI) 等关键参数,这些参数与森林生物量之间存在显著相关性,成为推算碳储量的基础输入变量^[7]。

遥感数据单独使用虽具备高效覆盖优势,但在垂直结构解析和碳库分层估算方面存在不足。为提升精度,常将其与实地样地调查数据融合,采用回归分析、机器学习或地理加权回归等统计方法建立生物量预测模型。这类混合建模方式能够在保证空间连续性的同时,校正遥感反演过程中因地形、云影或传感器误差导致的偏差^[8]。例如,利用激光雷达 (LiDAR) 获取的冠层高度信息辅助光学遥感数据,可更精准地估算乔木层的地上生物量,从而提高碳储量推算的可靠性。

数学模型则进一步深化了对碳流动态的理解。生态系统过程模型如 CENTURY、BIOME-BGC 和 InVEST 等,模拟光合作用、呼吸消耗、凋落物分解及土壤有机质转化等生物地球化学过程,将气候、土壤、植被类型等多源驱动因子纳入计算体系。这些模型可基于空间化环境数据库运行,实现从局部到区域乃至全球尺度的碳储量模拟。当遥感观测数据被同化进模型系统时,不仅增强了模型初始条件的准确性,还提升了其时间序列预测能力。通过数据同化技术,模型输出结果能持续逼近真实状态,形成闭环优化机制。

三、森林碳储量测算的未来发展趋势

(一) 新技术

森林地上生物量受气候、地形、土壤条件以及人类活动等多种因素影响,表现出较强的空间异质性和时间动态性。为实现大范围、连续性的碳储量监测,遥感技术成为突破传统地面观测局限的关键手段。依托多源卫星遥感数据,结合地面样地调查,能够有效反演森林结构参数并估算地上生物量,提升碳储量测算的精度与覆盖范围^[9]。

光学遥感通过获取植被反射率特征,提取归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (EVI) 等光谱指标,反映植被绿度与生长状况,广泛应用于生物量估算模型中。然而,在高 biomass 区域,光学信号易出现饱和现象,限制了其对成熟林或密林区的分辨能力。针对这一问题,主动式遥感技术展现出更强优势。合成孔径雷达 (SAR) 利用微波信号穿透云层和植被冠层的能力,获取与木质组织密切相关的后向散射信息,尤其 L 波段和 P 波段对森林垂直结构具有较高敏感性,可在复杂天气条件下实现全天候观测。

激光雷达 (LiDAR) 则通过发射激光脉冲记录回波时间,构建三维点云数据,精确刻画树高、冠层高度分布和垂直结构特征,是目前生物量估算精度最高的遥感手段之一。机载和星载 LiDAR 数据已被广泛用于区域尺度的生物量制图,GEDI 任务提供的全球一致的全波形 LiDAR 数据显著提升了热带与温带森林碳储量估算的可靠性。

(二) 新方法

机器学习方法的引入为森林地上碳储量的估算带来了新的技

术路径,尤其在处理高维、非线性关系的数据方面展现出显著优势。传统方法如生物量清单法受限于样地调查成本高、覆盖范围有限,涡度相关法虽能连续监测碳通量但设备昂贵且维护复杂,遥感估算则常因植被结构复杂或光谱饱和问题导致精度下降。相比之下,基于机器学习的建模方式能够融合多源遥感数据与地面实测样本,自动识别关键影响因子并捕捉变量间的非线性响应关系。其中,CatBoost 作为一种基于梯度提升框架的算法,在处理分类特征和缺失值方面表现优异,其采用有序提升机制减少过拟合风险,同时利用对称决策树作为基学习器增强模型稳定性,适用于森林碳储量这类受多种环境因子共同作用的目标预测任务^[10]。

该算法在实际应用中展现出较高的预测精度,尤其是在整合 Landsat、Sentinel-2等多时相光学影像与 LiDAR 获取的冠层高度数据时,能够有效反映植被垂直结构信息,从而提升碳密度反演能力。然而,其性能高度依赖于超参数配置,学习率设置过高可能导致收敛不稳定,树深度过大易引发过拟合,因此需结合交叉验证与网格搜索等策略进行精细化调参。除 CatBoost 外,XGBoost、LightGBM 及随机森林等算法也在区域尺度碳储量建模

中广泛使用,不同算法在特征选择偏好、噪声容忍度及训练速度上存在差异,单一模型难以适应所有生态区域的特点。

四、结束语

随着全球气候变化问题日益严峻,森林碳储量的研究逐渐受到国内外学者的广泛关注。森林生态系统作为地球上重要的碳汇,其碳储量的测算对于全球碳循环和气候变化研究具有重要意义。然而,由于森林生态系统的复杂性和多样性,准确估算森林碳储量是一项极具挑战性的任务。目前,针对森林碳储量估算的方法主要有样地清查法、微气象学法、模型模拟法和遥感估算法。总的来说,森林碳储量测算研究的未来发展方向和建议包括:一是进一步完善和优化森林生物量与碳储量的估算方法,特别是结合遥感技术和生物量清单法,提高估算的精度和效率;二是加强对不同森林类型固碳能力的研究,为森林碳汇的利用和管理提供科学依据;三是进一步利用和开发新的数据源和技术手段,如高光谱、NDVI 等,提高森林碳储量测算的精度和效率。

参考文献

- [1] 宋娅丽,王克勤.国内外森林生态系统土壤碳储量计量方法研究进展[J].绿色科技,2018,5-10.
- [2] 赵振宇.基于森林资源清查和遥感数据的青浦区森林碳储量估算及空间分布研究[D].上海师范大学.2023.
- [3] 杨佳杰,黄芳艳,王璐宁.面向净零转型的森林景观资源管理方法研究[C].2022中国城市规划年会论文集,2023,799-807.
- [4] 李雪峰.辽宁省天然林不同区域和龄组生物量和碳储量研究[J].绿色科技,2022,24:178-180.
- [5] 雷相东.机器学习算法在森林生长收获预估中的应用[J].北京林业大学学报,2019,41(12):23-36.被引量:33
- [6] 逢晨,崔君滕,赵芸,钟杰超,刘琦,刘强.青岛市森林生态系统碳储量及碳密度[J].温带林业研究,2025,8:31-37.
- [7] 王晖,刘世荣,周正虎,陈亮,王健.森林土壤储碳与增汇的不确定性分析[J].生态学报,2025,45:61-79.
- [8] 刘士磊,程麟淞,龚亚珍.国家公园森林碳汇潜力价值评价及其提升路径[J].国家公园,2024,2:34-40.
- [9] 雷海清,孙高球,郑得利.温州市森林生态系统碳储量研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(05):20-26.
- [10] 张娟,林晓薇.中国森林碳储量的影响因素研究—基于社会经济视角[J].长春工程学院学报(社会科学版),2020,21(04):34-39.