

# 森林生态系统五大碳库碳储量估算模型及其影响因素研究进展

刘蕊婷<sup>1,2</sup>, 马淑娟<sup>1,2</sup>, 张学万<sup>3</sup>, 陈飞勇<sup>1</sup>, 杜玉凤<sup>1</sup>, 徐景涛<sup>2</sup>, 王晋<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东 济南 250101; 2. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东 济南 250101;  
3. 山东省济南市天桥区自然资源局, 山东 济南 250031)

**摘要:** 森林碳库, 作为陆地生态系统中至关重要的碳储存场所, 不仅发挥着重要的碳储存功能与碳汇功能, 还对维持大气二氧化碳平衡具有举足轻重的作用。在梳理了大量相关文献后, 发现目前对于森林生态系统碳储量的估算模型及其各子碳库碳储量影响因素的整体性与综合性研究尚显不足。基于此, 一方面系统归纳梳理了森林生态系统的地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤有机碳碳库、枯落物碳库及枯死木碳库这五大碳库的基本内涵及25个相关估算模型的优缺点, 并对每个子碳库的相关研究进行了动态分析。另一方面, 还全面分析了影响森林生态系统五大碳库碳储量的关键因素。本研究不仅可以为选择合适的森林碳库碳储量估算模型提供理论支持, 还可以为理解森林生态碳储量的变化规律、相关政策的制定以及生态修复方案的策划提供科学的参考依据。

**关键词:** 森林生态系统; 五大碳库; 碳储量; 估算模型; 影响因素

## Research progress on the estimation model of carbon storage in five major carbon pools for forest ecosystems and their influencing factors

LIU Ruiting<sup>1,2</sup>, MA Shujuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuewan<sup>3</sup>, CHEN Feiyong<sup>1</sup>, DU Yufeng<sup>1</sup>, XU Jingtao<sup>2</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Resources and Environment Innovation, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101; 3. Natural Resources Bureau of Tianqiao District, Jinan 250031)

**Abstract:** Forest carbon reservoirs, as vital carbon storage sites in terrestrial ecosystems, not only play an important role as carbon storage function and carbon sinks function, but also play a pivotal role in maintaining the balance of atmospheric carbon dioxide. After reviewing a large number of relevant literature, this study found that there was currently a lack of comprehensive and integrated research on the estimation models of forest ecosystem carbon stocks and the factors affecting carbon stocks in each sub-carbon reservoir. Based on this, this study first systematically summarized the basic connotations of five carbon reservoirs in forest ecosystems,

收稿日期: 2024-10-20

作者简介: 刘蕊婷, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为森林遥感图像处理。

通信作者: 王晋, 男, 副教授, 主要研究方向为环境遥感应用与生态规划。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42107496); 山东省重大科技创新工程“一事一议”项目(0031504); 南浔院士协同创新中心项目(SYS01001); 山东省高等学校“青创人才引育计划”城市尾水深度处理与回用研究创新团队(QCTD202108)。

远发展, 促进山东省国家级风景名胜区在历史变革中进一步高质量发展, 真正践行“绿水青山就是金山银山”的理念。

### 参考文献:

- [1] 中国政府网. 风景名胜区条例(中华人民共和国国务院令 第474号) [EB/OL]. (2016-02-06) [2024-06-06]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5139422.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5139422.htm).
- [2] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见 [EB/OL]. (2019-08-21) [2024-06-06]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content\\_5407657.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5407657.htm).
- [3] 李金路. 风景名胜区是最具中国特色的自然保护地[J]. 中国园林, 2019, 35(3): 21-24.
- [4] 刘艳艳, 董惠惠, 张乐乐, 等. 山东省风景名胜区整合优化初探[J]. 山东林业科技, 2022, 52(3): 107-112.
- [5] 高燕. 淄博风景名胜区生态建设与可持续发展的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [6] 李会云. 风景名胜区美景度研究——以济南千佛山为例[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.
- [7] 刘瑞珍, 李玉春, 迟宗钦. 烟台市自然保护地整合优化背景下风景名胜区发展探讨[J]. 现代农业研究, 2022, 28(3): 48-50.
- [8] 刘红纯, 邓武功, 王忠杰, 等. 风景名胜区总体规划编制的新形势与变革趋向探讨[J]. 风景园林, 2022, 29(12): 60-64.
- [9] 王章明, 宋松松. 自然保护地体系改革下风景名胜区高质量发展路径研究[J]. 浙江林业, 2022(1): 8-10.

including aboveground biomass carbon reservoirs, underground biomass carbon reservoirs, soil organic carbon reservoirs, litter carbon reservoirs, and dead wood carbon reservoirs, as well as the advantages and disadvantages of 25 related estimation models. Furthermore, this study dynamically analyzed the relevant research on each sub-carbon reservoir. In addition, this study comprehensively analyzed the key factors affecting the carbon stocks of the five carbon reservoirs in forest ecosystems. This study can not only provide theoretical support for selecting appropriate estimation models for forest carbon stocks, but also provide scientific reference for understanding the changing patterns of forest ecological carbon stocks, formulating relevant policies, and planning ecological restoration programs.

**Key words:** forest ecosystem; five carbon reservoirs; carbon storage; estimation model; influencing factors

森林生态系统作为地球上至关重要的生态系统之一，在碳储存、碳平衡、碳调节及碳循环等方面皆发挥着至关重要的生态作用<sup>[1-2]</sup>。这一生态系统不仅具备显著的碳储存功能与碳汇功能，而且对维持大气中二氧化碳浓度的稳定起着至关重要的作用<sup>[3]</sup>。森林碳库作为森林生态系统中储存碳的关键场所，是森林生态系统的重要组成部分，同时也是陆地生态系统中不可或缺的碳库组成部分<sup>[4-5]</sup>。

在森林生态系统碳库的构成分类研究方面，学术界较为统一的观点是将森林生态系统的碳库分为地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤有机碳碳库、枯落物碳库及枯死木碳库 5 大子碳库<sup>[6-7]</sup>。森林生态系统碳库构成分类见示意图 1。

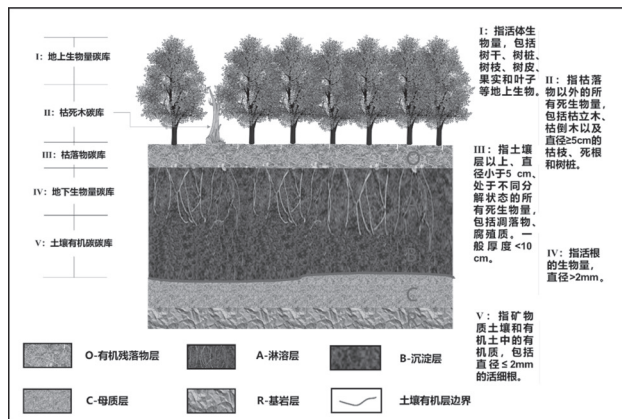


图 1 森林生态系统碳库构成分类示意图

然而，由于各森林生态系统对应的生物群落特征、生物类型、空间形态、纹理特征、破碎度、地理位置、地形地貌、地质结构等因素的差异，使得其适用的碳储量估算方法呈现多样性<sup>[8-10]</sup>。通过深入的文献回顾，发现目前关于森林生态系统五大子碳库的明确定义及其对应的估算模型的系统性研究相对稀缺。同时，对森林生态系统碳库影响因素的全面综述亦显不足。

鉴于此，本研究旨在全面深入总结并分析森林生态系统各子碳库的碳储量估算模型及其影响因素。通过对现有研究的系统梳理和深入分析，不仅可为选择合适的森林碳库碳储量估算模型提供坚实

的理论依据，为森林生态系统碳储量管理的提质增效与森林生态系统的科学抚育提供科学依据。同时，更有助于推动森林碳储量估算与管理技术的创新与发展。

## 1 森林生态系统地上生物量碳库及估算模型

### 1.1 森林生态系统地上生物量

森林生态系统地上生物量是指地表以上以干重表示的所有活体植物的重量，可分为乔木层(包括干、桩、枝、皮、种子、叶)和下木层(灌木、草本和幼树)。精确估算地上生物量对于估算森林碳储量、制定森林碳汇政策、研究森林碳循环等有着极其重要的作用<sup>[11]</sup>。已有较多研究表明，森林地上碳储量的大小可通过森林生物量的值直接或间接转化得到<sup>[12-14]</sup>。例如，可以通过森林生物量的值与生物量碳密度两个参数直接得到，或通过建立线性回归模型、非线性回归模型、神经网络模型等模型估算森林地上生物量碳储量<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 森林生态系统地上生物量估算模型

目前，关于森林地上生物量估算的模型种类繁多。通过对森林生态系统地上生物量估算的相关文献进行梳理，将相关模型归纳为传统的样地清查法、碳通量法、模型模拟法、遥感估算法等 4 类模型<sup>[17-18]</sup>。森林生态系统地上生物量估算方法及模型见表 1。

### 1.3 动态分析

从以上分析可以看出，目前对森林地上生物量碳库的估算模型及方法有很多，但单个研究方法在实际应用时都有各自的不足之处。若只利用单个方法模型对森林生物量进行估算，最终估算效果必定不理想。但如果把上述若干个估算方法相结合，便可较精确的对森林地上碳储量进行估算，这将更有利于森林碳储量的系统研究。例如，可以在样地清查法的基础上，利用模型模拟法或遥感估算法来对森林生态系统碳储量进行精确估算；此外，已有研究表明，光学和 SAR 数据联合能有效提高森林地上生物量的估算精度<sup>[63]</sup>。

表1 森林生态系统地上生物量估算方法及模型

方法分类		内涵	适用范围	优点	缺点
大类	小类				
1、 样地 清查 法	平均 生物 量法	基于野外实测样地, 通过对单棵树木样本的实测, 推算出不同类型森林的单位面积生物量, 并进而求得森林总生物量 <sup>[19]</sup> 。	可用于估算森林固碳量及其动态变化, 以及计算和分析不同森林类型的地上碳储量和碳密度 <sup>[20]</sup> 。	直观简单, 测算精度较高, 适用于小面积林分的生物量测算。	由于实测资料的取样点少, 不能真实反映森林的生物量, 因此在实践中已不被广泛采用 <sup>[21]</sup> 。
	材积 源物 法(生 物换 因法)	利用林分生物量与木材材积比值的平均值, 乘以该类型森林的总蓄积量, 来估算森林总生物量的一种生物量法 <sup>[22-23]</sup> 。即该方法以森林资源调查数据为基础, 在分树种且分龄组的基础上, 采用材积源生物量法可对其森林植被碳储量和碳密度进行测算 <sup>[24]</sup> 。	该测定方法简单可行, 一般适用于大尺度生物量估算。	该方法成本低, 操作简单, 数据易于获取。	但其未充分考虑森林类型、林龄、立地条件及林分密度等因素对森林生物量和蓄积量的影响, 因此精度较低 <sup>[25]</sup> 。
	换 因 连 函 数 法	通过建立分龄级的换算因子, 简化计算公式, 并根据森林清查数据和实测数据改进生物量蓄积量转换参数, 来更准确地估算森林碳储量和动态变化 <sup>[26]</sup> 。	该方法适合于需要基于森林资源清查数据进行生物量估算的大面积森林区域及多种森林类型 <sup>[27]</sup> 。	该方法克服了常数换算因子带来的不足, 弥补了平均生物量法所带来的人为的差异。	在估计不同树种模型参数时易存在样本数不足的缺陷。
	异 生 方 法 速 长 程	指基于生物量与胸径、树高或木材密度等因子之间的关系估算样地生物量的一种方法 <sup>[28]</sup> 。	应用最为广泛的森林生物量测定方法且已被成功应用于估算全球和非洲地区的红树林生物量 <sup>[29-30]</sup> 。	耗时较少且不会对研究对象造成伤害。	但在应用中可能受到环境和气候条件的影响, 且不适用于所有物种。
	蓄 积 量 法	利用森林蓄积量数据估算生物量的方法, 首先对森林主要树种进行抽样实测, 计算得出森林中主要树种的平均容重 ( $t \cdot m^{-3}$ ), 再根据森林的总蓄积量求出生物量 <sup>[31]</sup> 。	该方法主要适用于大面积森林生态系统的生物量的估算, 且需要对主要树种进行抽样实测。	估算大范围森林碳汇量、无需实地测量、成本较低、操作技术简单, 是生物量法的一种有效延伸 <sup>[32]</sup> 。	该方法以资源调查数据为基础, 可能存在较大的结果误差, 这是其在实践中需要考虑的。
	生 物 量 清 单 法	该方法有效地结合了生态学研究成果与森林清查中的森林蓄积量数据。通过利用不同树种的蓄积量、树干密度、平均含碳率以及树干生物量占乔木层生物量的比率等关键参数及森林资源清查数据, 对森林地上植被的碳储量和碳密度进行精确的估算 <sup>[33-34]</sup> 。	能够用于长时期、大面积的森林碳储量监测。	因其直接性和明确性的特征而在众多估算模型中突出, 使其成为长期、大范围森林碳储量监测的首要选择。	需要大量的人力资源, 在一定程度上增加了成本和工作量; 该法只能间歇性记录碳储量, 无法实时反映季节和年际间的动态变化效应; 在估算过程中忽略了森林生态系统内土壤微生物对有机碳分解所形成的碳源对森林生态系统碳汇的影响, 可能导致估算结果的可靠性和可比性受到一定程度的质疑 <sup>[35]</sup> 。

续表 1

方法分类		内涵	适用范围	优点	缺点
大类	小类				
2、 碳通 量法	微气象学法	该方法通过测量和分析森林内部的微气候条件(如温度、湿度、风速等)来推断森林的生物量 <sup>[36]</sup> 。微气象学法可以分为多种方法,如涡度相关法、涡度协方差法和弛豫涡旋积累法,并以涡度相关法的应用居多 <sup>[37]</sup> 。	通常适用于大尺度的生态系统研究	碳通量法可以通过监测森林区域二氧化碳浓度的变化来估算森林碳储量,并在一定程度上提高了评估精度。利用碳通量法进行森林碳通量基础数据测算,建立区域乃至全球森林碳通量数据库,结合大气数据、地理数据、遥感数据构建森林碳汇估算模型,实现更高精度的森林碳汇估算是未来的发展方向 <sup>[38]</sup> 。其中微气象学法能对森林和大气的CO <sub>2</sub> 通量进行直接准确的计算,受观测下垫面植被和周边环境干扰较少。	该方法需要较为精密可靠的仪器、平坦的下垫地面、严格的数据质量等控制要求 <sup>[39]</sup> 。因此,这一方法在区域森林碳储量或碳汇估算中较少被采用。
	箱式法	箱式法是一种用于测量生态系统气体交换通量的方法,其原理是将一个透明的箱子(通常称为同化箱)放置在植被上方,通过测量箱子内气体浓度的变化来计算研究对象的气体交换量 <sup>[17,40]</sup> 。	可以用于估算森林生态系统地上生物量 <sup>[41]</sup> 。微气象学法和箱式法统称为碳通量法,可用于小范围区域森林的碳储量测算。		操作条件复杂且不适合长期测量。
	碳平衡模型	碳平衡模型通过模拟森林生态系统的净初级生产力,并结合实际测得的碳含量数据,为森林生态系统碳储量的时空分布特征分析提供了有效的手段,为深入研究森林碳循环机制提供了数据支持 <sup>[42]</sup> 。	适用于估算整个森林生态系统的碳储量和碳密度。	FORCCHN 模型结构简洁,能够快速计算广泛区域的碳密度和碳平衡。	OBM 模型结构复杂、计算量大且存在众多不确定性因素,导致模型计算精度受限 FORCCHN 模型的不足之处在于未考虑到陆地生态系统对全球变化的反馈效应,并未涵盖各种过程的详细内部细节。
3、 模型 模拟 法	碳循环模型	该模型与气候变化相关,具备模拟物质状态转变与能量转移过程的能力,同时作为一种化学模型,它能够详尽阐述陆地生态系统中碳吸收的具体机制。	碳循环模型不仅可用于研究陆地生态系统与大气之间的相互作用机制,还可预测植物在不同环境条件下的生长变化,及在全球气候变化评估森林的净初级生产力。	该方法可以对任何时间、不同气候条件下的碳储量和植被分布格局进行统计和预测。	模型中所使用的参数对预测结果具有显著影响,这可能导致模型在客观性上存在一定的偏差。
	生物生理模型	生物生理模型基于植物的生理特征,通过模拟植物的生长过程模拟植物的碳储量。	在大尺度的模拟研究中,生物生理模型展现出了巨大的应用潜力。		由于自然生态系统的复杂性,生物生理模型往往难以全面涵盖所有自然过程的模拟研究。因此,在精度和适用性方面,这些模型有时可能无法完全满足研究需求。

续表 1

方法分类		内涵	适用范围	优点	缺点
大类	小类				
3、 模型 模拟 法	生物地理模型	生物地理模型是一种用来描述植被分布、生物群落区划、生命带以及生态系统类型与气候条件之间错综复杂的相互关联的方法。	该模型可对大尺度的生命带、生物群生态系统与气候变化关系进行描述 <sup>[40]</sup> 。		通过引入温度、水分胁迫系数等参数对CASA模型进行改进,可以有效地估算森林生态系统的碳储量 <sup>[43]</sup> 。生物地理模型具有在气候不变且生态系统处于平衡状态时部分地反映区域碳收支基本特征的功能,如生态系统从大气中吸收碳的能力。
	生物地球化学模型	生物地球化学模型是一种动态模拟模型,用于模拟生态系统中碳、氮和水分的循环 <sup>[44]</sup> 。	该方法适用于大尺度区域的森林生物量的估算并且可对森林生物量进行长时间序列的分析和预测 <sup>[45]</sup> 。	该模型不仅能够揭示陆地生态系统对气候变化的反应和反馈机制,还能有效地描述植被变化速率等重要的生态特征,是生态系统物质循环研究中的重要方法。	该模型操作过程较为复杂,且模型中的参数需要通过实验数据来进行估算,使得估算结果存在很大的不确定性。
4、 遥感 估算 法	基于光学遥感估算模型	通过卫星或航空平台搭载的光学传感器,可以获得森林植被的反射光谱信息,进而利用这些信息建立与地上生物量碳储量之间的关系模型 <sup>[46-47]</sup> 。基于光学遥感的地上生物量碳储量估算模型主要有统计回归模型与机器学习模型两类型。	通过建立遥感数据与地面数据之间的模型,可以实现对整个研究区域的全面观测 <sup>[48]</sup> 。	随着计算能力的增强和大数据的可用性增加,机器学习模型在生物量碳储量估算中的应用越来越广泛。这些模型可以通过学习大量样本数据的特征来预测未知样本的生物量 <sup>[49-50]</sup> 。深度学习模型在遥感图像处理中显示出巨大的潜力。它们可以自动学习遥感图像中的复杂特征,并据此进行生物量估算。	但是由于遥感信号难以到达植被冠层之下,只限于表达林冠上层的二维空间信息,无法直接有效反映森林的垂直结构信息,可能导致对地上生物量的估测误差较大 <sup>[51]</sup> 。
	基于微波遥感估算模型	合成孔径雷达(SAR)是一种利用微波辐射与目标表面特征相互作用进行目标识别和参数估计的主动式微波遥感技术。SAR传感器通过接收地物后向散射的回波信号来获取地表信息。后向散射系数与森林的生物量、结构等参数密切相关,因此可以通过建立后向散射系数与生物量之间的统计关系来估算生物量碳储量 <sup>[52-53]</sup> 。	通过利用InSAR及其衍生技术获取森林高度信息,进而结合地面实测数据及其他遥感数据建立生物量与高度、胸径之间的关系模型 <sup>[54]</sup> 。	SAR(合成孔径雷达)遥感技术具有全天时、全天候、高穿透性的优点,可以穿透云层和地表覆盖层,提供地表结构的详细信息,对于估算地上生物量碳储量具有重要意义。	但是由于SAR的信号不稳定,在森林结构复杂或者地形起伏较大的地区信号受限严重,且获取影像数据的来源较少且处理难度复杂,同时SAR在一定程度上也有数据易饱和的情况,而限制了在区域生物量估算中的应用。

续表 1

方法分类		内涵	适用范围	优点	缺点
大类	小类				
4、遥感估算法	基于 LiDAR 遥感估算模型	激光雷达 (LiDAR) 作为一种高精度主动遥感技术, 通过向地表发射激光束并接收反射信号, LiDAR 技术能够主动获取用于拟合森林生物量的关键参数, 如胸径、树高等 <sup>[55-56]</sup> 。经过对 LiDAR 数据的精细处理, 可提取出不同高度分位数的变量, 这些变量为构建精确的地上生物量统计模型提供了有力支撑, 从而实现对区域森林地上生物量的有效估计 <sup>[57]</sup> 。	LiDAR 近年来被广泛应用于森林信息参数和生物量的研究 <sup>[58]</sup> 。	LiDAR 凭借快速准确获取森林三维空间信息优势, 在森林信息参数和生物量估算方面得到了广泛的关注和应用 <sup>[59]</sup> 。LiDAR 具有空间分辨率低、能获得更精确的与生物量密切相关的树木高度及垂直结构数据的优点, 相对于光学遥感和 SAR 来说, LiDAR 克服了信号饱和的局限性。	LiDAR 技术的成本相对较高, 且由于其光斑激光传感器的特性, 所获取的数据往往难以实现无缝覆盖, 这在一定程度上限制了其在大面积森林空间结构信息提取中的应用。
	多模式协同遥感	在实践中, 常用的多源数据组合模式包括多种类型, 如: 具有不同空间分辨率、光谱分辨率的光学遥感数据之间的协同遥感, 光学遥感与合成孔径雷达 (SAR) 的协同遥感, 以及光学遥感与激光雷达 (LiDAR) 的协同遥感等。	近年来, 诸如人工神经网络 (ANN) 和支持向量机 (SVM) 等先进机器学习方法越来越多地与光学遥感影像、SAR 数据或 LiDAR 数据相结合, 应用于森林生物量的高精度估算 <sup>[60-62]</sup> 。	多模式协同遥感能够有效克服单一数据源的限制, 显著提升地上生物量的估算精度。	但多传感器遥感数据更难获取, 且操作难度大, 成本损耗高。

尽管国内对森林生态系统地上生物量碳库的研究已经取得了一定的进展, 但仍然存在一些挑战和问题。例如, 不同森林生态系统碳库之间的比较研究较少, 缺乏对不同计算方法的一致性和可靠性的评估等。未来需要进一步深入研究地上生物量碳库的动态变化和影响因素, 为制定有效的碳管理策略提供科学依据。此外, 可探讨如何进一步优化以上所提到的组合型方法, 如可结合机器学习技术来达到提升模型预测能力的目的, 或逐步开发出适用于不同森林类型的更精确的、定制化的优质估算模型。

## 2 森林生态系统地下生物量碳库及估算模型

### 2.1 森林生态系统地下生物量碳库的内涵

地下生物量碳库是指所有活根的生物量, 直径低于 2 毫米的细根一般要排除在外, 因为这些细根依据经验不能与土壤有机物分开<sup>[64-65]</sup>。

### 2.2 森林生态系统地下生物量估算模型

对于森林生态系统地上生物量估算模型及方法的相关研究, 国内已经有很多, 但对于森林生态系统地下生物量部分的相关研究甚少。森林生态系统的地下生物量在碳循环系统中起到的作用是很大的, 但因大多情况下估算地下生物量会干扰地表土、破坏植物的正常生存环境等客观因素, 导致地下生物量很难开展准确实测。在这种情况下, 建立地上地下生物量相关模型显得尤为重要<sup>[66]</sup>。通过阅读大量相关文献发现, 学者提出估算森林生态系统地下生物量的模型可以分为根茎比模型法 (地上地下生物量比值法)、异速生长法方程法等<sup>[67]</sup>。森林生态系统地下生物量估算方法及模型见表 2。

### 2.3 动态分析

森林生态系统地下部分在生态系统中扮演着举足轻重的角色, 其重要性不仅体现在可为生态系统提供不可或缺的水分与养分资源, 还体现在其丰富的生物多样性在一定程度上确保了整个生态系统结构与功能的稳定。更重要的是陆地生态系统中碳分

表2 森林生态系统地下生物量估算方法及模型

方法分类	含义	应用范围	优点	缺点
根茎比模型法	根茎比法是一种通过测量和计算森林生态系统中地上部分(如茎干、枝条、叶片等)与地下部分(主要是根系)生物量的比值,来估算地下生物量的方法 <sup>[68]</sup> 。	可适用于大尺度森林地下生物量的研究。	根茎比法简单便捷、估算迅速、	但地上生物量与地下生物量比值这种传统方法需要的人力大、操作时间长,且因传统的根茎比为默认值,没有考虑其他林分因子对它的影响,故对地下生物量的估算误差较大。
异速生长方程法	异速生长方程法是在根冠比法的基础上建立根茎比与地上各相关因子的指数关系,或直接构建地下生物量与胸径、树高等因子的函数关系,也可构建地下生物量与地上生物量之间的函数关系,来间接估算地下生物量 <sup>[69-70]</sup> 。	主要适合于单一树种或小范围的森林。	异速生长方程法比地上地下生物量比值法更具有适用性,异速生长方程克服了假设根茎比法为常数所带来的缺陷,将地下生物量的估算转为对地上地下生物量的非线性关系的构建 <sup>[67]</sup> 。	虽然该方法能够估算不同树种的地下生物量,但其适用范围较为有限。

配的核心环节在地下部分<sup>[71]</sup>。由于森林地下生态系统的错综复杂性和根系分布的隐蔽性所带来的研究挑战,以及长期以来缺乏针对性的高效研究方法,使得对根系等地下部分在森林生态学中的重要作用缺乏充分的认识与深入的探索。需要注意的是,植被地上地下生物量的分配方式或比例不仅影响植被结构及其生长过程,还会对所在生态系统的碳储量、碳输入、碳循环及碳汇量产生一定的影响。如,潮盐土或盐碱地柽柳在高盐土壤地质条件下,为了获得更多的光照资源,导致其生物量更多地分配到地上部分,即表现为柽柳地上生物量大于地下生物量。

在未来,针对森林生态系统地下生物量碳库估算模型研究的难点,可考虑从技术提升以及区域适应性两方面进行改善。其中,在技术方面可探讨如何通过改进仪器精度、增加数据样本量或引入新的生态因子来提高异速生长方程法的估算精度;在区域适应性方面,可通过分析不同地区、不同森林类型条件下地下生物量估算方法及模型的适应性,并提出针对性的、适用于不同区域类型的估算策略。

### 3 森林生态系统土壤有机碳碳库及估算模型

#### 3.1 森林生态系统土壤有机碳碳库的内涵

已有研究表明,我国主要森林土壤有机碳库占我国森林生态系统碳总量的74.6%,大约占森林生态系统有机碳库的2/3<sup>[72]</sup>。因此,对森林生态系统土壤有机碳储量的估算非常重要。土壤有机碳库涵盖了位于特定深度范围内的矿物质土壤及有

机土壤(含现存有机土壤)中的有机物质总量,其中也包含了那些难以通过实验手段明确地从地下生物量(尤其是活跃的细根)中分离出来的部分(直径 $\leq 2\text{ mm}$ )<sup>[73]</sup>。

森林土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,土壤有机碳主要储存在表层以下0~100 cm深度范围内,故大量研究对于森林土壤有机碳的采样深度大多为0~40 cm、0~60 cm、0~80 cm或0~100 cm<sup>[74-75]</sup>。此外,通过大量阅读相关文献发现,大多数情况下随着土层深度增加,有机碳储量呈减小趋势<sup>[76]</sup>。

#### 3.2 森林生态系统土壤有机碳碳库估算模型

对森林生态系统土壤有机碳储量的定量估算,对于全面理解森林生态系统的碳平衡机制具有至关重要的意义。因此,对森林生态系统土壤有机碳的精确估算显得尤为重要。目前,估算森林生态系统土壤有机碳储量的方法主要有土壤类型法、植被类型-生命带研究法、地理信息估算法、模型估算法、相关关系估算法等<sup>[8]</sup>。森林生态系统土壤有机碳碳库估算方法及模型见表3。

#### 3.3 动态分析

进一步分析在目前现存的土壤有机碳储量估算方法可以发现,土壤类型-植被类型和生命地带法最常用且最有代表性。但由于土壤在空间上呈现复杂的镶嵌性,土壤有机碳估算会受到气候以及植被和生物的作用影响,故不同森林类型采用不同方法进行估算和结果必然会存在差异。与此同时,目前国内收录在库的土壤碳属性相关数据资源较少,所

表 3 森林生态系统土壤有机碳碳库估算方法及模型

方法分类	含义	适用范围	优点	缺点
土壤类型法	土壤类型法是基于网格来计算土壤有机碳储量的方法, 通过土壤剖面获得的数据来计算分类单元的土壤有机碳储量, 再根据各种分类层次汇合土壤剖面数据, 最后可根据传统计算公式及区域或国家尺度土壤图上的面积计算得到土壤有机碳蓄积总量 <sup>[77]</sup> 。	适用于土壤分类完整且土地变更频率低的区域 <sup>[78]</sup> 。	土壤类型法数据容易获取。	存在土壤剖面分布不均从而出现空间差异的可能
植被类型 - 生命地带研究法	植被类型 - 生命地带法是基于不同生命地带土壤有机碳的密度与该类型生命带面积的乘积来计算总的森林土壤有机碳储量 <sup>[79]</sup> 。	该方法适用于大尺度的、具有不同植被类型和生命地带的土壤有机碳含量特征的森林土壤碳储量估算 <sup>[80]</sup> 。	该方法对了解不同植被类型的土壤有机碳储量总量比较容易, 且各个植被类型还可以包含多种土壤类型, 分布范围更加广泛, 更能反映气候因素及植被分布状况对土壤有机碳储量的影响。	但这样的统计中不确定因素将增多, 计算误差也较大 <sup>[81]</sup> 。
地理信息系统估算法	地理信息系统 (GIS) 技术作为一种先进的地学数据处理方法, 通过地理坐标或空间位置对地学空间数据进行全面处理。GIS 技术能够促成土壤图的数字化转换, 同时构建出综合全面的土壤属性数据库。GIS 技术利用空间分析功能和模型, 可以精确计算出每个土壤属性或不同土层的碳储量 <sup>[82]</sup> 。	该方法适用于大尺度的、具有复杂地形区域的土壤有机碳估算。	该方法不仅能够估算碳储量, 还能深入分析其空间分布特征 <sup>[83-84]</sup> 。	但该方法容易受到地图精度、数据相关和连续性以及模型参数等因素的制约 <sup>[85]</sup> 。
模型估算法	模型估算法是利用环境因子、气候因子和土壤属性等数据, 通过构建数学关系模型 (如相关关系模型、机理过程模型、基于实测数据和遥感数据的模型等), 来确定进入土壤碳库有机碳的质量及有机碳分解速率, 从而估算土壤有机碳储量 <sup>[86]</sup> 。	该方法适用于受多种因素综合影响区域的土壤有机碳估算。	该方法计算简便, 可以模拟预测未来碳储量的动态变化, 已被广泛应用于区域或全球陆地生态系统土壤有机碳储量的估算研究中。	但模型参数不易确定, 且忽略了土壤类型和植被类型分布的多样性及影响因子的多样性, 易存在较大的误差 <sup>[87]</sup> 。
相关关系模型估算法	相关关系估算法是通过分析土壤有机碳蓄积量与采样点的各种环境变量和土壤属性之间的相关性, 以此建立一定的数学统计关系从而实现利用有限数据计算出土壤有机碳蓄积量的方法 <sup>[88]</sup> 。	该方法多用于环境变量明确但实测数据有限的区域的土壤有机碳估算 <sup>[89]</sup> 。	该估算方法得到的结果相关性较高, 且数据都是通过实测得出的, 可靠性较高, 计算简便。	但该方法在区域上进行应用前, 应对其统计关系进行验证, 故其初期操作过程较繁琐 <sup>[90]</sup> 。

得土壤有机碳储量估算结果存在很大不确定性。

在未来, 针对森林生态系统土壤有机碳碳库估算模型方面的改善研究, 主要在于模型的优化及数据验证的不可或缺性。其中, 在模型优化方面, 可考虑如何通过整合多个环境因子和土壤属性数据来优化土壤碳储量模型估算方法, 以提高其预测准确性; 在估算的过程中, 强调数据验证的重要性, 可探索提出在不同气候和土壤条件下对模型进行验证

和校准的方法。

## 4 森林生态系统枯落物碳库及估算模型

### 4.1 森林生态系统枯落物碳库的内涵

枯落物是指植被地上和地下部分枯萎后并全部返还给土壤的有机质, 也称凋落物<sup>[91]</sup>。随着全球气候变化的加剧以及社会各界对碳循环过程的日益

重视,对森林生态系统的枯落物碳库及其估算模型的研究越来越受到关注<sup>[92]</sup>。

但是通过对比国内外相关研究发现,不同地区不同植被关于枯落物碳库范畴的定义也不完全一致。例如,在《森林生态系统碳储量计量指南》中枯落物是指土壤层以上,直径小于5.0 cm,处于不同分解状态的所有死生物量,包括凋落物、腐殖质,以及难以从地下生物量中区分出来的细根<sup>[93]</sup>;王忠禹等研究者在研究黄土丘陵典型植被枯落物性状时,认为枯落物不仅分布在土壤表层,同时分布在土壤层0~5 cm深度左右<sup>[92]</sup>;Paul等研究者所研究的天然林凋落物总量包括细木屑(直径<10 cm)、凋落物和发酵腐殖质物质(FH)等3部分<sup>[94]</sup>。

#### 4.2 森林生态系统枯落物碳库的估算模型

截至目前,国内外对森林生态系统的枯落物碳库及其估算模型的研究较少。通过归纳总结,本研究将相关估算模型分为两类,一类是基于生物量建模,另一类基于机理建模。其中,基于生物量建模的方法主要围绕枯落物平均单位面积生物量、枯落物含碳率以及林分面积等参数对枯落物碳库碳储量进行建模估算<sup>[95]</sup>。基于机理建模的方法主要围绕枯落物分解率、年凋落物量、林地枯落物积累量等相关参数进行建模,其代表性模型有枯落物分解率估算模型<sup>[96]</sup>。

#### 4.3 动态分析

目前,对于森林生态系统枯落物碳库的估算方法多采用直接收集法,而通过构建分解速率模型、生物量模型、遥感估算模型对枯落物碳库进行评估研究罕见。总体来说,国内外对森林生态系统的枯落物碳库及其估算模型的研究还有待加强和深入研究。针对森林生态系统枯落物碳库的估算研究还有很大的研究进步空间这一现状,在探讨的过程中,应强调不同季节对枯落物的动态变化,探讨其对森林碳循环的影响。此外,可考虑气候、生物、人为干扰等多重因素的综合影响,来构建更加全面准确的枯落物碳库估算模型。与此同时,在全球气候变化的背景下,探讨枯落物碳库动态变化的新特征和新规律十分必要。

### 5 森林生态系统枯死木碳库及估算模型

#### 5.1 森林生态系统枯死木碳库的内涵

枯死木是森林生态系统的重要组成部分。枯死木不仅对推动生态系统能量流动、固碳、森林演替

更新有着重要的影响,而且在维持物种多样性等方面也发挥着不可或缺的作用,例如,为鸟类觅食、筑巢、贮藏食物提供必要场所,为哺乳动物提供栖息地等。此外,在全球气候变化的背景下,研究枯死木碳库的动态和特征,对于揭示森林生态系统碳循环规律,明确森林生态系统碳汇(源)过程,有着重要的意义<sup>[97-98]</sup>。

通过归纳分析国内外相关文献可以发现,在不同的研究或标准中对枯死木阈值的设定是不同的。例如,在《森林生态系统碳储量计量指南》(LY/T 2988—2018)中,枯死木是指枯落物以外的所有死生物量,包括枯立木,枯倒木以及直径 $\geq 5.0$  cm的枯枝、死根和树桩<sup>[93]</sup>。按照IPCC报告与Paul等研究者的统计数据要求与,枯死木是指枯立木、枯倒木、死根和直径 $\geq 10$  cm的树<sup>[94,99]</sup>。

#### 5.2 森林生态系统枯死木碳库估算模型

通过阅读相关文献或资料可以发现,枯死木碳库碳储量的相关估算模型主要通过枯死木的平均单位面积生物量、枯死木含碳率以及林分面积等相关参数对碳储量进行估算。目前,枯死木碳库碳储量主要通过森林生态系统调查及实验测定得出。这种枯死木碳储量估算方法相对来说费时费力,同时准确度不高。

#### 5.3 动态分析

如今无人机及传感器技术在各个领域被广泛应用,具有省时省力、便于携带、分辨率高、准确度高<sup>[100]</sup>的特点。在未来,可探讨采用无人机、激光雷达等新技术对枯死木进行高效监测的方法,并评估其在碳储量估算中的应用潜力。

### 6 森林生态系统碳库的影响因素

#### 6.1 地上生物量碳库的影响因素

归纳已有研究可以把地上生物量碳库的影响因素分为地理环境、气候变化、林分结构、人类活动等4类<sup>[101-102]</sup>。其中,地理环境因素是影响森林地上碳储量的重要因素之一,包含地形、坡位、坡向、坡度、太阳辐射总强度、海拔等具体因素<sup>[103-104]</sup>。

气候变化会改变植被的生长环境,如气候变化会导致CO<sub>2</sub>浓度增加、气温升高、降雨量的变化和森林结构调整,进而影响森林的生长过程以及有机碳的积累<sup>[105-106]</sup>。

林分结构是影响森林地上生物量的另一重要因素。如Ullah等人认为,在单一物种占主导地位的

林分中,单棵树木的大小变化和林分密度是温带森林中地下生物量较高的关键<sup>[107]</sup>;Ali 等人研究发现,气候和土壤对地上生物量的直接影响并不强烈,但会通过林分结构间接影响地上生物量<sup>[108]</sup>;Ali 等人在另一研究中发现,林分结构多样性是中国东部副热带次生林地上碳储量变化的主要决定因素<sup>[109]</sup>。

人类活动对地上生物量碳库的影响也十分显著。如过度采伐森林、燃烧化石燃料、环境污染、过度放牧、不合理的土地利用方式变化等活动都在不同程度上改变着植被生物量和碳储量<sup>[110-111]</sup>。因此需要合理的土地管理和保护措施来提高植被生物量和碳储量。

## 6.2 地下生物量碳库的影响因素

影响森林生态系统地下生物量的研究相对较少,其影响因素可以分为生物因素和非生物因素<sup>[112]</sup>。其中,非生物因素是指年均温、海拔、降水、土壤类型、地形等环境因子;生物因素包括植被本身特性(森林类型、树种、树龄、生长阶段等)、人类和动物活动干扰<sup>[113]</sup>。

## 6.3 土壤有机碳碳库的影响因素

土壤有机碳在生态系统碳循环过程中扮演着重要角色,其影响因素包括海拔、氮沉降、气候、土壤理化因素、林分生长与植被类型、人为因素等因素<sup>[114]</sup>。例如已有研究表明,通常海拔与土壤有机碳存在显著的正相关,随着海拔的增高土壤有机碳的含量增加<sup>[115]</sup>。

氮沉降会使土壤理化性质的改变,还会使土壤微生物响应,从而影响森林土壤有机碳的矿化,最终影响森林有机碳库的固存<sup>[116]</sup>。此外,氮的微量变化会引起整个循环系统以及森林土壤有机碳的变化,所以氮在整个循环系统中是至关重要的,会影响土壤有机碳的稳定性。

气候是影响土壤有机碳含量的重要因素之一。气候条件的不同会影响土壤有机碳的积累和分解。如在温带气候下,土壤有机碳的积累和分解受到季节变化的影响。在生长季节,植物生长旺盛,有机物的输入量较大,土壤有机碳含量较高,而在非生长季节,有机物输入量减少,土壤有机碳含量较低<sup>[117-118]</sup>。此外,温度不仅影响土壤微生物的分解,同时与土壤有机碳的分解存在相关性<sup>[119]</sup>。

在土壤理化因素方面,土壤含水量通过影响土壤微生物的活性和土壤团聚体,进而影响土壤有机碳的积累和转化过程<sup>[120]</sup>。此外,土壤有机碳与土壤容重、全氮、全磷有明显的相关性<sup>[121]</sup>。

林分生长因素中,林龄、林分大小、树高、树径和林分生物量密度等均与土壤有机碳碳库有关<sup>[122]</sup>。此外,据张彦军等研究者对太白山北坡一带的研究可以看出植被类型对土壤有机碳的影响十分显著<sup>[123]</sup>。

在林地经营和伐木等人类活动的干扰下,土壤有机碳会流失和分解<sup>[124]</sup>。但森林抚育、恢复、造林等经营措施能够通过改变林分结构及土壤理化性质进而影响森林土壤碳库。

由此可以看出,土壤有机碳的含量往往是多种因素综合作用的结果。因此土壤有机碳碳库具有潜在的不稳定性,易受到各种因素的影响。

## 6.4 枯落物碳库的影响因素

通过整理已有研究,可以把枯落物碳库的影响因素分为气候因素、林分起源、群落的组成和结构、森林发育演替、土壤因素与地形因素等 6 类。其中,气候因素是影响枯落物碳库的主要因素<sup>[125]</sup>,主要跟温度和湿度两个因子有关。对于温度而言,呈现温度越高越促进枯落物分解的趋势,随着纬度的变化,不同森林枯落量和分解速率大小为热带>亚热带>温带<sup>[126]</sup>。湿度的主要影响因素是降水,降水既存在着淋溶补给为分解者提供水分,促进分解枯落物的作用,也存在着降水过多,抑制枯落物分解的作用,从而影响枯落物的分解。因此枯落物现存量可以通过生物枯落物量与枯落物分解速率的比较来展现。

林分起源对枯落物碳库碳储量有着至关重要的影响作用。如,一般天然林的枯落物输入量要显著大于人工林。天然林是经过长期的演变与发展形成的,具有一大批的优势属种和丰富的种群、群落,形成了稳定的生态系统。天然林枯落物输入量大,分解速度快,能够较好的实现养分的自给自足。人工林受人类活动的影响较大,人类干预相对较多,不利于实现水土保持和养分的积累,枯落物的存量也相对较低。因此,大力提倡保护天然森林,减少天然林转变为人工林。

群落的组成和结构是影响枯落物存量的重要因素之一。群落的物种组成决定了枯落物的类型和数量,群落中物种的多样性和数量会影响枯落物的总量和种类,群落的结构也会影响枯落物的分布和存量。如林分密度、树冠层次、林下层结构等因素都会影响枯落物在地面上的积累和分解<sup>[127]</sup>。

森林在不同的发育演替阶段,枯落物碳库量会有明显的区别。例如对于天然次生林来说,随着群

落的发育,凋落物会呈增加的趋势,当群落发育到成熟阶段,林分郁闭后枯落物量达到最大值并维持稳定<sup>[128]</sup>。此外,枯落物还受生物节律的影响<sup>[129]</sup>。

土壤因素主要表现为土壤PH等理化参数对枯落物碳库的影响<sup>[130]</sup>。例如已有研究证明,巨尾桉纯林通过产生酚酸类代谢产物,造成土壤酸化,进而影响土壤微生物以及当地树木的生长,从而影响枯落物碳库<sup>[131]</sup>。

地形因素对枯落物碳库也有一定的影响。地形坡度等自然要素参数的差异性,导致了森林生态系统中不同区域在光照强度、水分分布、养分含量及降水量等方面呈现出不同的环境条件,这些条件进而对植被的生长状况产生了影响,进而影响了该区域枯落物的现存量。通常随海拔的增高枯落物的存量减少,黄石德等在武夷山的三种不同的海拔梯度中的凋落物总量结果即印证了这一观点<sup>[132]</sup>。

### 6.5 枯死木碳库的影响因素

病虫害、地力衰退、相对单一的群落结构、不利的气候等都会导致枯死木的形成。如,鼓山风景区在2017—2019三年由于松墨天牛种群灾害导致松枯死木一万余株<sup>[133]</sup>。

及时进行枯死木清理,切断病虫害传播来源,将诱捕物种和清理病虫害相结合,是减少枯死木的有效途径。如,地力衰退更是导致华北落叶松大面积人工林枯死的直接原因<sup>[134]</sup>。需要注意的是,林地地力衰退的修复是一个长期的过程,不同地区和不同类型的林地可能需要采取不同的修复措施。

## 7 结语与展望

本研究系统地梳理并探讨了森林生态系统五大碳库(地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤有机碳碳库、枯落物碳库及枯死木碳库)的碳储量估算模型及其影响因素,在一定程度上弥补当前研究在整体性方面的不足。随着科技的不断发展,尤其是遥感技术、大数据分析和人工智能技术的突飞猛进,我们有望在未来实现多源数据的有机融合与互补,进一步建立并应用新的更适用各种对象的估算模型,从而显著提升碳储量估算的精度和效率。同时,森林碳储量的研究是一个跨学科领域,涉及生态学、地理学、气候学、环境科学等多个方面。因此,加强跨学科合作,开展综合性研究至关重要。这将有助于我们更全面、更深入地理解森林碳储量的复杂性和多样性,为科学决策提供更有力的支撑。

在全球努力实现“双碳目标”的大背景下,我国森林生态系统的重要性日益凸显。作为自然界的主要碳汇,森林生态系统承载着巨大的碳储量,对于维护气候稳定、推动碳中和进程发挥着不可或缺的“压舱石”作用。本研究对五大碳库碳储量估算模型的深入梳理与分析进一步揭示,精准计量森林碳储量是实现“双碳目标”的基石。因此,我们必须持续加强森林碳汇能力的建设与提升,通过优化森林结构、提高森林质量等有效措施,不断增强森林生态系统的碳吸收和储存能力。

然而,我们也必须清醒地看到,尽管我国已在森林碳库研究方面取得了显著进展,但与国际先进水平相比,我们仍面临诸多挑战。其中,碳计量技术的标准化和普及程度不高、碳储量动态监测体系尚待完善等问题尤为突出。为了克服这些短板弱项,我们需要紧密跟踪国际国内最新发展动态,积极引进并研发先进的碳计量技术与方法,不断提升森林碳储量的监测精度和评估准确性。通过这些努力,我们将能够更科学、更有效地管理和保护森林碳库资源,为实现可持续发展和应对全球气候变化作出更大贡献。

### 参考文献:

- [1] 王效科,冯宗炜,欧阳志云.中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J].应用生态学报,2001(1):13-16.
- [2] 唐玉芝.基于CBM-CFS3模型的贵州高原森林生态系统碳储量时空变化[J].测绘学报,2023,52(10):1800.
- [3] 付玉杰,田地,侯正阳,等.全球森林碳汇功能评估研究进展[J].北京林业大学学报,2022,44(10):1-10.
- [4] Kuuluvainen T, Gauthier S. Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change [J]. Forest Ecosystems, 2018, 5 (4): 361375.
- [5] Zhao M, Yang J, Zhao N, et al. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013 [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 448: 528-534.
- [6] 吴金友,李俊清.造林项目碳计量方法[J].东北林业大学学报,2010,38(6):115-116+137.
- [7] Rooyen M W V, Rooyen N V, Stoffberg G H. Carbon sequestration potential of post-mining reforestation activities on the KwaZulu-Natal coast, South Africa [J]. Forestry, 2012, 86(2): 211-223.
- [8] Zhang C, Ju W, Chen J M, et al. China's forest biomass

- carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008 [J]. *Climatic Change*, 2013, 118(3/4): 933-948
- [ 9 ] Zhao M W, Yue T X, Sun X F, et al. Combining LPJ-GUESS and HASM to simulate the spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 249-268.
- [ 10 ] Sun W, Liu X. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China [J]. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(1): 37-50.
- [ 11 ] Fouse J A, Eagle M J, Kroeger K D, et al Estimating the aboveground biomass and carbon stocks of tall shrubs in a preresoration degraded salt marsh [J]. *Restoration ecology*, 2023, 31(1): e13684.
- [ 12 ] Liu K, Wang J, Zeng W, et al. Comparison and Evaluation of Three Methods for Estimating Forest above Ground Biomass Using TM and GLAS Data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(34):1-20.
- [ 13 ] Johnson J L, Raw J L, Adams J B. First report on carbon storage in a warm-temperate mangrove forest in South Africa [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106566.
- [ 14 ] Fisher J T. Optimizing aboveground carbon mapping in Afrotropical forests to fulfil IPCC carbon reporting standards [J]. *Forest Ecology and Management*, 2024, 552: 121583.
- [ 15 ] Arnan A, Sytze B, Martin H et al. A comprehensive framework for assessing the accuracy and uncertainty of global above-ground biomass maps [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 272: 112917.
- [ 16 ] Zhou X, Hu C, Wang Z. Distribution of biomass and carbon content in estimation of carbon density for typical forests [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 48: e02707.
- [ 17 ] 何英. 森林固碳估算方法综述 [J]. *世界林业研究*, 2005 (1): 22-27.
- [ 18 ] 曹吉鑫, 田赞, 王小平, 等. 森林碳汇的估算方法及其发展趋势 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 2001-2005.
- [ 19 ] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势 [J]. *应用生态学报*, 2004 (8): 1468-1472.
- [ 20 ] 傅乐乐, 苏建兰. 中国竹林碳汇量测算及其潜力预测 [J]. *中国林业经济*, 2023(3): 96-102.
- [ 21 ] 张志, 田昕, 陈尔学, 等. 森林地上生物量估测方法研究综述 [J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(5): 144-150.
- [ 22 ] 娄雪婷, 曾源, 吴炳方. 森林地上生物量遥感估测研究进展 [J]. *国土资源遥感*, 2011 (1): 1-8.
- [ 23 ] 张林. 雀儿山西南坡植被碳贮量与土壤有机碳贮量估算 [D]. 成都: 四川农业大学, 2008.
- [ 24 ] 陈科屹, 王建军, 何友均, 等. 黑龙江大兴安岭重点国有林区森林碳储量及固碳潜力评估 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1725-1734.
- [ 25 ] 吕勇, 唐代生. 林木材积与生物量的相关性探讨 [J]. *中南林业调查规划*, 1997, 16(2): 13-15.
- [ 26 ] 刘领, 王艳芳, 悦飞雪, 等. 基于森林清查资料的河南省森林植被碳储量动态变化 [J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 864-873.
- [ 27 ] 郝媛, 马俊杰. 生态环评中森林植被生物量的估算方法 [J]. *地下水*, 2012, 34(6): 215-217.
- [ 28 ] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000 [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2): 378-390.
- [ 29 ] 李巍, 王传宽, 张全智. 林木分化对兴安落叶松异速生长方程和生物量分配的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35 ( 6 ) : 679-168.
- [ 30 ] 闻馨, 刘凯, 曹晶晶, 等. 基于森林冠层高度和异速生长方程的中国红树林地上生物量估算 [J]. *热带地理*, 2023, 43(1): 1-11.
- [ 31 ] 赵林, 殷鸣放, 陈晓非, 等. 森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述 [J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(1): 59-63.
- [ 32 ] 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(5): 121-128.
- [ 33 ] 戴景晟. 林分碳汇计算方法研究与应用 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [ 34 ] 刘淑琴, 夏朝宗, 冯薇, 等. 西藏森林植被乔木层碳储量与碳密度估算 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3127-3134.
- [ 35 ] 张永杰. 森林碳储量研究方法与发展展望 [J]. *农家参谋*, 2019 (10): 136-136.
- [ 36 ] Warren J G, Hattey J A, Turner J C, et al. Comparison of two micrometeorological methods to determine ammonia volatilization from lagoon swine effluent [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(9/10): 1339-1356.
- [ 37 ] 高琛, 黄龙生, 刘甲午, 等. 森林碳汇测量方法对比分析 [J]. *河北林业科技*, 2014(1): 35-37.
- [ 38 ] 戴景晟. 林分碳汇计算方法研究与应用 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [ 39 ] Huang Y, He X, Dai Y, et al. Hybrid game cross efficiency evaluation models based on interval data: A case of forest carbon sequestration [J]. *Expert Systems with Application*, 2022, 204(10): 1-14.
- [ 40 ] 陈璐. 我国暖温带森林碳储量特点及成因分析 [D]. 北京: 中央民族大学, 2021.
- [ 41 ] 冯雅榕. 基于箱式法的内蒙古典型草原二氧化碳通量动态研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [ 42 ] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 1981-2002 年中国东北地区森林生态系统碳储量的模拟 [J]. *应用生态学报*,

- 2009, 20(2): 241–249.
- [43] 朱婵瓔, 王让会, 陈东强. 南京城市森林生态系统生产力与碳储量的计算 [J]. 林业科技开发, 2013, 27(3): 53–56.
- [44] 巴特利, 巴克, 张旭东, 等. 森林生态系统碳循环研究的模型方法 [J]. 世界林业研究, 2008, 21(1): 9–13.
- [45] 尹惠妍. 大区域森林生物量估算方法研究 [D]. 中国林业科学研究院, 2014.
- [46] Hu Y, Xu X, Wu F, et al. Estimating forest stock volume in Hunan province, China, by integrating in situ plot data, Sentinel-2 images, and linear and machine learning regression models [J]. Remote Sensing, 2020, 12: 186.
- [47] Ma P, Ren J, Sun G, et al. Multiscale superpixelwise prophet model for noise-robust feature extraction in hyperspectral images [J]. IEEE T Geosci Remote, 2023, 61: 1–12.
- [48] Ma T, Zhang C, Ji L, et al. Development of forest aboveground biomass estimation, its problems and future solutions: A review [J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111653.
- [49] Agata H, Aneta L, Dariusz Z, et al. Forest aboveground biomass estimation using a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data [C]. IGARSS 2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2018: 9026–9029.
- [50] 宋通通. 崇明生态岛森林碳储量遥感估算研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2024.
- [51] Ma T, Hu Y, Wang J, et al. A novel vegetation index approach using sentinel-2 data and random forest algorithm for estimating forest stock volume in the Helan Mountains, Ningxia, China [J]. Remote Sensing, 2023, 15: 1853.
- [52] Le Toan T, Beaudoin A, Riou J, et al. Relating forest biomass to SAR data [J]. IEEE T Geosci Remote, 1992, 30: 403–411.
- [53] 李静. 基于光学和 SAR 遥感的福建省森林生物量估算 [D]. 福州: 福州大学, 2019.
- [54] 贾康, 刘媛媛, 范文义. 应用全极化合成孔径雷达数据构建多变量估算森林地上生物量模型 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(1): 61–66+102.
- [55] 田静. 森林生物量遥感估测及人为干扰对森林碳储量影响研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [56] 曹依林. 基于多源遥感的区域森林生物量估测 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2023.
- [57] Kaasalainen S., Holopainen M., Karjalainen M., et al. Combining lidar and synthetic aperture radar data to estimate forest biomass: status and prospects [J]. Forests, 2015, 6: 252–270.
- [58] Beland M, Parker G, Sparrow B, et al. On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 450: 117484.
- [59] Ren C, Jiang H, Xi Y, et al. Quantifying temperate forest diversity by integrating GEDI LiDAR and multi-temporal sentinel-2 imagery [J]. Remote Sensing, 2023, 15(375): 1–18.
- [60] Qisheng H, Erxue C, Ru A, et al. Above-Ground Biomass and Biomass Components Estimation Using LiDAR Data in a Coniferous Forest [J]. Forests, 2013, 4(4): 984–1002.
- [61] Santi E, Paloscia S, Pettinato S, et al. Machine-learning applications for the retrieval of forest biomass from airborne P-band SAR data [J]. Remote Sensing, 2020, 12(804): 1–17.
- [62] 田晓敏, 张晓丽. 森林地上生物量遥感估算方法 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(8): 137–148.
- [63] Ghosh S. M., Behera M. D. Aboveground biomass estimates of tropical mangrove forest using Sentinel-1 SAR coherence data – The superiority of deep learning over a semi-empirical model [J]. Computers & Geosciences, 2021, 150: 104737.
- [64] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [S]. 2006, Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan.
- [65] 刘佳, 项文化, 徐晓, 等. 湖南会同 5 个亚热带树种的细根构型及功能特征分析 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 938.
- [66] Spawn S A, Sullivan C C, Lark T J, et al. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010 [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 112.
- [67] 李娜. 基于地面和遥感数据估算亚热带森林地下生物量 [D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [68] Litton, C M, Raich, J W, Ryan M G, et al. Carbon allocation in forest ecosystems [J]. Global Change Biology, 2007, 13(10): 2089–2109.
- [69] 尹艳豹, 曾伟生, 唐守正. 中国东北落叶松立木生物量模型的研建 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(9): 23–26+92.
- [70] 曾伟生, 唐守正. 东北落叶松和南方马尾松地下生物量模型研建 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 1–6.
- [71] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils [J]. Science, 1999, 284: 2095.
- [72] 宋致华. 子午岭桥山林区不同林分碳库储量及其影响因素研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [73] 袁渭阳, 李贤伟, 张健, 等. 不同年龄巨桉林土壤呼吸及其与土壤温度和细根生物量的关系 [J]. 林业科学, 2009, 45(11): 1–8.
- [74] Zhuo Z, Chen Q, Zhang X, et al. Soil organic carbon storage, distribution, and influencing factors at different depths in the dryland farming regions of Northeast and North China [J]. Catena, 2022, 210: 105934.

- [75] Zhang T, Song B, Han G, et al. Effects of coastal wetland reclamation on soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus in China: A meta-analysis [J]. *Land Degradation and Development*, 2023, 34(11): 3340–3349.
- [76] 王海燕, 张洪江, 杨平等. 不同水土保持林地土壤有机碳研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(5): 535–539.
- [77] 孙冬晓, 康剑, 张中瑞, 等. 东江中下游流域森林土壤有机碳空间分布特征研究 [J]. *林业与环境科学*, 2022, 38(4): 38–42.
- [78] 齐也, 丁晓纲, 王洋, 等. 西江下游流域森林土壤有机碳空间分布特征 [J]. *林业与环境科学*, 2022, 38(4): 33–37.
- [79] 赵苗苗, 赵娜, 刘羽, 等. 森林碳计量方法研究进展 [J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 3797–3807.
- [80] 蔡云, 周焮涛. 森林生态系统固碳估算方法研究进展 [J]. *绿色科技*, 2020 (18): 48–50.
- [81] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 典型陆地生态系统土壤碳储量计算研究进展 [J]. *生态科学*, 2016, 35(6): 191–198.
- [82] 张炎周, 梁玉喜, 代立东, 等. 四川森林土壤有机碳储量估算方法选择 [J]. *四川林业科技*, 2011, 32(6): 44–51.
- [83] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征 [J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1217–1225.
- [84] 宋满珍, 刘琪璟, 吴自荣, 等. 江西省森林土壤有机碳储量研究 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2010, 34(2): 6–10.
- [85] 石文博. 西藏森林生态系统碳储量及其空间分布格局 [D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
- [86] 张兴锐, 齐国辉, 陈利英, 等. 森林植被和土壤碳储量研究进展 [J]. *青海农林科技*, 2023 (1): 56–61.
- [87] Ren C, Jiang H, Xi Y, et al. Quantifying temperate forest diversity by integrating GEDI LiDAR and multi-temporal sentinel-2 imagery [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(375):1–18.
- [88] 李学斌, 樊瑞霞, 刘学东. 中国草地生态系统碳储量及碳过程研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1845–1851.
- [89] 薛亮, 马海州, 曹广超, 等. GIS 技术在区域土壤有机碳储量估算方面的应用—以柴达木盆地为例 [J]. *生态环境*, 2003(4):419–422.
- [90] 周国模, 刘恩斌, 余光辉. 森林土壤碳库研究方法进展 [J]. *浙江林学院学报*, 2006(2): 207–216.
- [91] 韩雅璐. 伊金霍洛旗不同凋落物对土壤有机碳转化的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [92] 王忠禹, 王兵, 刘国彬, 等. 黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 2020–2031.
- [93] 国家林业和草原局. 森林生态系统碳储量计量指南: LY/T 2988—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [94] Amanda H, Paul D, Jamie S. A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(2): 291–306.
- [95] 李星梅. 山西灵空油松天然次生林凋落物动态特征及其影响因子分析 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [96] 刘增文, 高文俊, 潘开文, 等. 枯落物分解研究方法和模型讨论 [J]. *生态学报*, 2006 (6): 1993–2000.
- [97] 赵嘉诚, 李海奎. 广东省森林死木碳库特征 [J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 550–559.
- [98] Hararuk O, Kurz W A, Didion M. Dynamics of dead wood decay in Swiss forests [J]. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(3): 462–477.
- [99] IPCC. Intergovernmental panel on climate change. Good practice guidance for land use. Land-use change and forestry(Task 1) [M]. Japan: IGES, 2003.
- [100] 陈魏冬. 基于无人机航拍图像的松枯死木自动识别与定位 [D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [101] 郝文芳, 陈存根, 梁宗锁, 等. 植被生物量的研究进展 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2008 (2): 175–182.
- [102] Bukoski J J, Cook S C, Melikov C, et al. Rates and drivers of aboveground carbon accumulation in global monoculture plantation forests [J]. *Nature communications*, 2022, 13(1):1–13.
- [103] 马秀, 陈伟, 徐雁南, 等. 基于自适应核带宽度 Mean Shift 算法的单木识别研究 [J]. *森林工程*, 2024, 40(2): 92–101+126.
- [104] 董玉洁, 毛岭峰, 张敏, 等. 华东地区亚热带典型常绿阔叶林地上生物量与环境因子的关系 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2024, 48(1):74–80.
- [105] Stegen J C, Swenson N G, Enquist B J, et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(5): 744–754.
- [106] Slik J W F, Paoli G, McGuire K, et al. Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(12): 1261–1271.
- [107] Ullah F, Gilani H, Sanaei A, et al. Stand structure determines aboveground biomass across temperate forest types and species mixture along a local-scale elevational gradient [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 486: 118984.
- [108] Ali A, Lin S L, He J K, et al. Climate and soils determine aboveground biomass indirectly via species diversity and stand structural complexity in tropical forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 432: 823–831.
- [109] Ali A, Yan E R, Chen H Y H, et al. Stand structural

- diversity rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in Eastern China [J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(16): 4627–4635.
- [110] 崔永琴, 马剑英, 刘小宁, 等. 人类活动对土壤有机碳库的影响研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 407–414.
- [111] Liu Q, Wang F, Liu R, et al. Aboveground litter input alters the effects of understory vegetation removal on soil microbial communities and enzyme activities along a 60-cm profile in a subtropical plantation forest [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 176: 104489.
- [112] Chen R, Ran J, Hu W, et al. Effects of biotic and abiotic factors on forest biomass fractions [J]. *National Science Review*, 2021, 8(10): 79–88.
- [113] 胡宇美, 马理辉, 李蕊, 等. 黄土高原地区森林生态系统地下生物量影响因素 [J]. *生态学报*, 2021, 41(21): 8643–8653.
- [114] 李冰, 陈林, 庞丹波, 等. 基于文献计量分析近 11 年土壤有机碳的研究进展 [J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(4): 138–151.
- [115] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 [J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437–5448.
- [116] 苏立城, 陈晓珊, 罗志忠, 等. 氮添加对森林土壤有机碳库固存及 CO<sub>2</sub> 排放影响的研究进展 [J]. *生态学报*, 2024 (7): 1–17.
- [117] Huang W, Spohn M. Effects of long-term litter manipulation on soil carbon, nitrogen, and phosphorus in a temperate deciduous forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 12–18.
- [118] 韩中海, 李会平, 刘新轩, 等. 凋落物输入改变对暖温带栓皮栎林表层土壤有效磷的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1109–1115.
- [119] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响 [J]. *应用生态学报*, 2002 (6): 709–714.
- [120] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述 [J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(3): 142–150.
- [121] 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 等. 大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 [J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3809–3815.
- [122] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异 [J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 833–843.
- [123] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局 [J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 629–639.
- [124] Min W, Qiuxiang T, Chang L, et al. The fate of litter-derived dissolved organic carbon in forest soils: results from an incubation experiment [J]. *Biogeochemistry*, 2019, 144(2): 133–147.
- [125] 李淳. 我国森林生态系统枯落物现存量研究进展 [J]. *江西农业*, 2019, (8): 110+126.
- [126] 刘士玲, 郑金萍, 范春楠, 等. 我国森林生态系统枯落物现存量研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2017, 30(1): 66–71.
- [127] 赵磊, 王兵, 蔡体久, 等. 江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 203–208+246.
- [128] 冉松松, 许子君, 万晓华. 不同林龄的天然次生林和杉木人工林恢复过程中凋落物量变化 [J]. *福建农业科技*, 2022, 53(1): 59–65.
- [129] 邹碧, 李志安, 丁永祯, 等. 南亚热带 4 种人工林凋落物动态特征 [J]. *生态学报*, 2006 (3): 715–721.
- [130] 张玲玉, 赵学强, 沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1900–1908.
- [131] 张培, 庞圣江, 杨保国, 等. 不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分的影响 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 49(2): 31–37.
- [132] 黄石德, 黄雍容, 高伟, 等. 沿海拔梯度武夷山 3 种典型森林凋落物及养分归还动态 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(4): 394–402.
- [133] 吴禹杰. 鼓山风景区松墨天牛种群监测及松枯死木发生浅析 [J]. *农业灾害研究*, 2022, 12(11): 173–175.
- [134] 郭振明, 银在永. 论我区华北落叶松人工林地力衰退导致出现枯死木的原因与防治对策 [J]. *内蒙古林业调查设计*, 2002 (S1)26–27.