

# 森林固碳计量方法研究综述

胡海波<sup>1</sup>, 刘佳璇<sup>1</sup>, 丁冬霞<sup>1</sup>, 周红卫<sup>2</sup>, 陈凤<sup>3</sup>, 刘鑫宇<sup>1</sup>, 马冰<sup>2</sup>, 胡超<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;

2. 江苏省环境地质调查大队, 江苏 南京 211100; 3. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

**摘要:** 森林在全球碳循环中扮演着关键角色, 不仅有助于减缓气候变化, 还在改善生态环境、促进社会经济可持续发展等方面发挥着重要作用。虽然以往的研究也探讨了森林固碳计量方法, 但大多数集中在地上部分, 且缺乏对基础理论的深入探讨。本研究针对前人研究的不足, 从基础理论分析出发, 探讨森林固碳的特点、过程及其影响机制, 重点分析了植物、土壤和凋落物的固碳计量方法。综述了各方法在不同测算尺度下的应用效果, 系统比较了各方法的优势和局限性。最后, 讨论了当前研究重点和发展趋势。研究表明, 各种森林固碳计量方法皆有一定的局限性, 估算精度各异。因此, 研究者应根据现有数据、计量尺度和精度需求, 合理选择最适宜的计量方法。本文有助于深入理解森林固碳机制、掌握森林固碳计量方法, 可为森林经营管理和应对气候变化策略提供科学依据。

**关键词:** 森林; 碳储量; 生物量; 计量方法; 影响机制

中图分类号: S718.56

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2024)11-0058-12

## A review of measurement methods of forest carbon sequestration

HU Haibo<sup>1</sup>, LIU Jiaxuan<sup>1</sup>, DING Dongxia<sup>1</sup>, ZHOU Hongwei<sup>2</sup>, CHEN Feng<sup>3</sup>, LIU Xinyu<sup>1</sup>, MA Bing<sup>2</sup>, HU Chao<sup>2</sup>

(1. Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Geological Environment Exploration Institute of Jiangsu Province, Nanjing 211100, Jiangsu, China;

3. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, Jiangsu, China)

**Abstract:** Forests play a critical role in the global carbon cycle, and their carbon sequestration not only contributes to climate change mitigation, but also improves the ecological environment and promotes sustainable social economic development. Although previous studies have also explored the measurement methods of forest carbon sequestration, most of them have focused on the above-ground sequestration and lacked in-depth discussion of the basic theories. Aiming at the shortcomings of previous studies, this study discussed the characteristics, processes and influencing mechanisms of forest carbon sequestration based on basic theoretical analysis. We focused on the analysis of carbon sequestration measurement methods for plants, soils and litter, summarized the application effects of each method at different measurement scales, systematically compared the advantages and limitations of each method. Finally, we discussed main topic of the current research and the development trend. This study showed that all forest carbon sequestration measurement methods had certain limitations and the estimation accuracy varied. Therefore, researchers should reasonably choose the most appropriate measurement method according to the existing data, measurement scale and accuracy requirements. This paper contributes to an in-depth understanding of forest carbon sequestration mechanisms and methodological principles, and provides a scientific basis for forest management and climate change response strategies.

**Keywords:** forest; carbon sequestration; biomass; measurement method; influencing mechanism

全球气候变化给生态系统和人类社会带来了巨大的挑战<sup>[1]</sup>。气候变化导致的极端天气事件频

繁发生<sup>[2]</sup>, 如洪水、干旱和飓风, 不仅导致生态环境的破坏<sup>[3]</sup>, 还直接威胁到水资源的供应和国

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 江苏省太湖流域重要生态功能区生态地质环境综合调查项目(2200113); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022305); 国家林业和草原局江苏长江三角洲森林生态系统定位研究项目(2022132077); 常州市生态绿城建设研究专项(2021-108)。

第一作者: 胡海波(huhb2000@aliyun.com), 教授, 博士, 博士研究生导师。

引文格式: 胡海波, 刘佳璇, 丁冬霞, 等. 森林固碳计量方法研究综述[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(11): 58-69.

HU H B, LIU J X, DING D X, et al. A review of measurement methods of forest carbon sequestration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(11): 58-69.

家的设施安全<sup>[4]</sup>。此外,气候变化还加剧了生物多样性的丧失,破坏了自然生态系统的平衡,进而影响了全球食物链和生态服务<sup>[5]</sup>。

随着全球气候问题的日益严峻,国际社会对于减少温室气体排放以及增强碳汇能力的关注度不断攀升。森林,作为陆地生态系统的核心组成部分,利用植物的光合作用吸收大气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>),并将CO<sub>2</sub>转化为有机碳。而且,通过将有机碳储存在森林植物的各个部位(如树干、枝叶、根系)以及土壤中,减少大气中的CO<sub>2</sub>浓度,缓解了全球气候变化<sup>[6]</sup>。因此,森林作为重要碳汇具有不可估量的价值,准确计量森林的碳汇功能变得愈发重要。

森林生态系统碳储量包括森林植被、土壤碳储量以及枯落物的碳储量<sup>[7]</sup>。尽管已有大量研究探讨了森林固碳计量方法,但这些研究大多只集中于描述单一部分固碳的计量方法(例如地上部分)。此外,不同研究采用的数据来源、估算方法以及研究区域尺度不同,导致森林碳储量的估算结果存在显著差异,需要进一步区分。现有研究对于森林固碳的理论基础、过程机制以及不同计量方法的系统比较尚有不足。因此,本文针对前述研究的不足,展开进一步探讨,为森林固碳计量工作提供科学依据。

本文旨在系统探讨森林固碳的特点、过程及其影响机制,并对国内外植物、土壤和凋落物的固碳计量方法进行详细分析。通过综述和比较不同计量方法在各测算尺度下的应用效果,提出相应的改进建议。本文的研究不仅有助于深化对森林固碳机制的理解,还为森林管理和气候变化应对策略提供了科学支持。

## 1 森林固碳特点、过程及机制

森林作为全球碳循环的关键组成部分,具有显著的碳源和碳汇功能。其固碳特点、过程及机制反映了森林生态系统的复杂多样。这些基础理论不仅有助于了解森林固碳计量的方法原理,同时也为全球变化的应对提供坚实的理论基础。

### 1.1 森林固碳的特点

森林固碳是一个长期的动态过程。森林在林木生长的不同阶段展现出不同的碳吸收速率。研究表明,俄勒冈州和华盛顿州西部将 $5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的成熟林转变为幼龄林,100年内反而使大气中增加了 $1.5 \times 10^9 \sim 1.8 \times 10^9 \text{ Mg}$ 的碳<sup>[8]</sup>,由此可以看

出将成熟林转化为年轻的速生林并不会减少大气中的CO<sub>2</sub>。Law等<sup>[9]</sup>的研究也印证了这一发现。他们的研究结果表明,俄勒冈州黄松老林的生态系统总碳含量(包括植被、土壤和凋落物)为 $210 \text{ Mg/hm}^2$ ,约为幼林的两倍( $100 \text{ Mg/hm}^2$ )。此外,森林多层次的碳汇功能是森林固碳的另一特点,即森林固碳包括植被、土壤和凋落物皆有不同程度的碳汇能力。有研究表明,长白山温带阔叶红松林生态系统总碳储量为 $243.36 \text{ Mg/hm}^2$ ,其中植被碳储量为 $144.49 \text{ Mg/hm}^2$ ,土壤碳储量为 $96.11 \text{ Mg/hm}^2$ ,而凋落物则仅有 $2.76 \text{ Mg/hm}^2$ ,即植被、土壤和凋落物的碳储量分别占总碳储量的59%,39%,和2%<sup>[10]</sup>。Sun等<sup>[7]</sup>的研究中植被、土壤和凋落物的碳储量的分配比例呈现相似的特征,约60%的碳储存在植被中,30%储存在土壤中,其余10%储存在凋落物中。这些估计值会因森林类型、地区和具体生态系统条件的不同而有所变化。

### 1.2 森林固碳的过程

森林固碳过程是长期复杂的生态过程<sup>[11]</sup>。其中,光合作用是森林固碳的核心,森林的固碳能力很大程度上取决于植物的光合作用效率。植物通过光合作用吸收大气中的CO<sub>2</sub>,并将其转化为有机物,储存在部分树干、枝叶和根系中<sup>[12]</sup>。根据国家林业和草原局研究,一株健康的树木每年可以通过光合作用固定约 $4 \sim 18 \text{ kg}$ 的CO<sub>2</sub>。植物的呼吸作用,作为光合作用的副产物,可以将一部分吸收的碳重新释放回大气中,但整体上植物仍可以维持净碳吸收<sup>[13]</sup>。IPCC报告指出,植物呼吸作用仅消耗光合作用产物的30%~60%,这显示出森林的净碳吸收仍然显著<sup>[14]</sup>。此外,土壤和凋落物在森林固碳过程中也起到重要作用。土壤碳的来源主要是植物的凋落物和根系<sup>[15]</sup>。通过微生物活动和凋落物的分解,碳在土壤中被转化固定,形成土壤有机碳库<sup>[16]</sup>。全球土壤有机碳库估算约 $1.5 \times 10^{11} \text{ Mg}$ ,比大气中的碳量还多。有研究表明,森林土壤碳的存量约占全球土壤有机碳的50%<sup>[17]</sup>。凋落物(如叶子、枝条和根系)通过微生物的分解作用将有机碳部分转化为土壤有机质,另一部分则以CO<sub>2</sub>形式释放<sup>[18]</sup>。研究表明,较慢的凋落物分解速率有助于增加土壤有机碳的积累,因为分解过程中一部分有机碳被转化为稳定的土壤有机质<sup>[19]</sup>。这进一步表明了凋落物的分解速率对土壤碳储量和碳循环的效率有直接影响<sup>[20]</sup>。

### 1.3 森林固碳的影响机制

森林固碳过程受多种因素的影响。立地条件、树种选择和经营管理直接或间接地影响碳平衡的动态调节系统。以下将分别探讨这些因素对各类碳储量的影响机制。

#### 1.3.1 立地条件对森林固碳过程的影响

气候条件如温度和降水都会影响林木的生长和碳吸收速率。已有研究发现, 随着立地年平均气温的增加, 森林生物量也以每摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  $5 \sim 13 \text{ Mg}/\text{hm}^2$  的速率增长<sup>[21]</sup>, 由此可见, 随着温度的增加林木的生长速率变大。在寒带, 84% 的碳存在于土壤有机质中, 只有 16% 存在于植被中, 而在热带, 碳在植被和土壤之间的分配几乎相等<sup>[22]</sup>。这一结果可能是因为寒带气候寒冷, 植被的生长季缩短, 碳吸收速率低, 热带森林与之相反, 其碳吸收速率较高<sup>[23]</sup>。此外, 降水也是影响森林固碳过程的关键因素之一。研究表明, 从年降水量为 1 240 mm 的林分到年降水量为 642 mm 的林分, 凋落物的分解量减少了 56%, 其固碳量减少了 10%<sup>[24]</sup>。降水增多, 土壤湿度增加并抑制根系的氧气 ( $\text{O}_2$ ) 供应, 从而调节凋落物转化为土壤有机质的分解过程, 影响土壤固碳<sup>[25]</sup>。由此发现, 土壤条件也会影响森林固碳过程。研究表明, 随着 pH 值升高 1 个单位, 碳矿化速率增加约 20% ~ 40%<sup>[26]</sup>。这一结果也侧面说明了, 酸性土壤中的酸性条件会增加土壤中有有机物质的矿化速率, 加速有机碳的分解减少碳的积累<sup>[27-28]</sup>。

最后地形也是影响因素之一。低坡度区平均碳储量最大为  $570.67 \pm 40 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ , 相反高坡度区平均碳储量最小为  $421.2 \pm 56.2 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ , 平均总碳储量在坡东方向最高 ( $778.13 \pm 75.93 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ), 在坡西南方向最低 ( $358.58 \pm 73.45 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ )。由此推测, 坡度较大的地区, 土壤受到强烈的雨水冲刷, 造成严重土壤侵蚀, 导致土壤肥力下降, 影响植物的生长和森林固碳过程<sup>[29]</sup>。此外, 坡东方向更利于水分的积累, 形成湿润环境, 利于植物生长和固碳<sup>[30]</sup>。

#### 1.3.2 树种生物学特性对固碳过程的影响

树种的生物学特性, 包括树种寿命、生长速率和木材密度等, 皆对固碳过程产生重要影响。不同树种的寿命影响碳固定的持续时间。长寿命树种, 如红杉、橡树等, 可以在其几百年的生长过程内持续固碳, 并将碳储存在木质部中, 因而长寿命树种在其成熟期具有较大的碳储量。研究表明, 西双版纳橡胶林成熟期的总碳储量达到  $285.02 \pm 15.12 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ <sup>[31]</sup>。相比之下, 寿命较

短的树种, 如桦树等, 在其成熟期后, 固碳能力下降, 凋落物大量坠落并被分解, 释放部分碳<sup>[32]</sup>。例如, 小兴安岭白桦林成熟期的植被碳储量仅为  $49.39 \pm 3.09 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ <sup>[33]</sup>, 桦林的总碳储量为  $271 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ <sup>[34]</sup>。此外速生的短轮作杨树人工林 ( $8 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ) 和桉树人工林 ( $6 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ) 的年净碳固存速率最高<sup>[35]</sup>。这类速生树种的碳储量一般都在成熟后趋于稳定。慢生树种则与之相反, 随着树龄增加碳储量持续增高。

#### 1.3.3 经营管理对固碳过程的影响机制

森林经营管理, 包括采伐策略、施肥和种植密度, 对森林固碳过程均有显著影响。研究表明, 清除采伐会导致森林地表碳储量显著下降约 30% 左右<sup>[36]</sup>。与之相反, 选择性采伐甚至比未采伐的森林总碳储量增加 37%<sup>[37]</sup>。因此, 选择性采伐是最佳的采伐模式, 能保留更多的树木和森林结构, 从而增强森林的固碳能力<sup>[38]</sup>。其次, 施肥可以通过改善土壤条件, 影响树木的生长和碳吸收速率。且施肥的效果依赖于肥料类型和施用量。例如, 额外的氮肥输入可以显著提高树木的生长速率, 据估计, 在 1960—2000 年期间, 氮的输入使得森林净碳固存每年增加约  $1.18 \times 10^5 \text{ Mg}$ <sup>[39]</sup>, 相当于该时期树木和土壤净碳固存的 10% ( $1.17 \times 10^6 \text{ Mg}$ )。但过量施肥可能导致温室气体排放的增加, 因此需谨慎斟酌用量。此外, 森林的高密度种植通常可以增加单位面积上的树木数量, 有效促进碳吸收, 但过高的密度可能导致树木间的种间竞争, 影响林分的生长。中等密度种植 (如 2 000 株 / $\text{hm}^2$ ) 可以实现最佳的碳储量和碳吸收效率, 最大碳储量达  $115.17 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。而高密度种植的森林 (3 300 株 / $\text{hm}^2$ ) 在初期碳吸收速率较高, 但随着时间的推移, 可能由于养分竞争而导致生长减缓, 影响森林碳储量 ( $13.70 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ )<sup>[40]</sup>。

## 2 森林固碳方法

### 2.1 植物固碳方法

森林植物固碳量的估算通常基于生物量测算 (如国际上常用生物量乘以生物含碳量来确定森林碳储量)。其中, 生物含碳量可以参考现有数据成果, 如果树种尚未测定含碳量, 则可使用近似树种含碳量或该地区树种的平均值代替。

#### 2.1.1 平均生物量法

平均生物量法通过实地调查获得生物量数据。通过砍伐后测定样木的鲜重和含水量, 推算出样木的平均生物量, 用标准地的生物量乘以含碳量

来计算单位面积森林植物地上部分的碳储量。该方法包括皆伐法和生物量回归方程法（如异速生长方程等）。刘立斌团队用这三种方法来估算中国科学院普定喀斯特生态站样地胸径  $D \geq 1\text{cm}$  的木本植物地上生物量。结果显示，皆伐法的地上生物量为  $98.3 \text{ Mg/hm}^2$ ，而生物量回归方程法为  $91.2 \text{ Mg/hm}^2$ 。由此可见，皆伐法的估算值最接近实际情况，而生物量回归方程法次之。由于皆伐法准确性较高，因此广泛应用于森林生态学和生态系统碳循环研究中<sup>[42]</sup>。然而，该方法耗时长、消耗人力物力，并且不适用于大规模森林的生物量估算<sup>[43]</sup>。此外，这种方法通常需要在砍伐林木后进行测量<sup>[44]</sup>，而以往的研究大多集中在自然保护区等区域。生物量回归方程法相较于皆伐法具有显著优势，能够减少实地调查的工作量，并支持对森林生物量进行大规模估计。建立不同地区不同树种的异速生长方程，可以实现对生物量的无损估算。然而，该方法的数据获取较为困难，可靠性受到地区差异、范围大小等因素的影响，同时人工测量树木高度和胸径的准确性也可能存在问题。因此，生物量回归方程法更适用于大面积且需要长期进行森林碳汇量监测的研究。

### 2.1.2 生物量换算因子连续函数法

生物量换算因子连续函数法主要依赖森林资源清查数据来估算森林生物量。确定生物量与木材蓄积量之间的换算关系，即生物量扩展因子（Biomass expansion factor, BEF），是此方法的关键。研究表明，BEF 值会受到林龄、立地条件、林分密度等因素的影响，因此为了准确反映 BEF 的连续变化，需要将林分蓄积量作为 BEF 的函数。基于此方精云等<sup>[45]</sup>学者建立了“换算因子连续函数法”，并利用该方法估算中国森林生物量密度为  $84.2 \text{ Mg/hm}^2$ ，进一步计算出碳密度为  $42.1 \text{ Mg/hm}^2$ <sup>[46]</sup>。考青云等<sup>[47]</sup>通过该方法测算了出黑龙江省森林植被碳储量在两次清查期间的变化分别为  $8.11 \times 10^8$  和  $8.89 \times 10^8 \text{ Mg}$ 。生物量换算因子法适用于各类林分碳储量的计算，但由于将换算因子视作常数，可能会产生一定的误差。此外，此方法在实际应用中可能会得到偏小的数值，这可能与其在野外实测时更偏爱选取成熟的林分有关（成熟林 BEF 值较小）。该方法的计算公式如下：

$$\text{BEF} = a + \frac{b}{x}$$

$$Y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k A_{ijl} \text{BEF}_{ijl} \quad (\text{样地尺度})$$

$$Y = \sum_{i=1}^{30} \text{BEF} \times x_i \times A_i = a \sum_{i=1}^{30} A_i x_i + bA \quad (\text{区域或省区尺度})$$

$$Y = Ax\text{BEF} \quad (\text{全国尺度})$$

式中， $a$ 、 $b$  为常数， $Y$  为总生物量（Mg）； $A$  为总面积（ $\text{hm}^2$ ）； $x$  为平均蓄积量（ $\text{m}^3$ ），BEF 为相应的扩展因子；对于某一森林类型在第  $i$  省份  $A_i$ 、 $V_i$ 、 $x_i$  和  $\text{BEF}_i$  分别为总面积、总蓄积量、平均蓄积量及相应的扩展因子； $i$ 、 $j$  和  $l$  分别第  $i$  省区、第  $j$  地位级和第  $l$  龄级； $A_{ijl}$ 、 $x_{ijl}$  和  $\text{BEF}_{ijl}$  分别为林分面积、平均蓄积量和换算因子； $m$ 、 $n$  和  $k$  为第  $i$  省区、第  $j$  地位级和第  $l$  龄级的数量。

### 2.1.3 蓄积量扩展法

蓄积量扩展法的核心在于使用蓄积扩大系数来计算生物量。屈亚妮等<sup>[48]</sup>基于该方法估算了云南省普洱市思茅镇森林的总固碳量为  $4.9 \times 10^7 \text{ Mg}$ ；陈周光等<sup>[49]</sup>根据所获得的森林蓄积量数据计算出 2019 年浙江省森林的碳汇量为  $4.18 \times 10^8 \text{ Mg}$ ；文勇军等<sup>[50]</sup>在云南省“十三五”期间的森林资源监测数据基础上，计算出森林总碳储量由  $2.19 \times 10^9 \text{ Mg}$  增到  $2.39 \times 10^9 \text{ Mg}$ 。蓄积量扩展法简单易操作，考虑了林下植物及土壤的固碳量且精度较高，适合基于宏观森林资源调查数据的森林固碳计量。然而，该方法的前提是将生物量转换因子和扩展因子视作常数，且并未考虑林分种类、林木生长状况及立地条件对相关因子的影响。相关计算公式如下<sup>[51]</sup>：

$$Y = \sum (S_{ij} \times C_{ij}) + \alpha \sum (S_{ij} \times C_{ij}) + \beta \sum (S_{ij} \times C_{ij})$$

$$C_{ij} = V_{ij} \times \delta \times \rho \times \gamma$$

式中  $ij$  表示第  $i$  区第  $j$  类； $S_{ij}$  为森林面积大小（ $\text{hm}^2$ ）； $C_{ij}$  为森林碳密度（包括枝桠、树根）（ $\text{Mg/hm}^2$ ）； $V_{ij}$  为单位面积森林蓄积量（ $\text{m}^3$ ）； $\alpha$  为林下碳转换系数（IPCC<sup>[52]</sup>默认值取 0.195）； $\beta$  为土壤碳转换系数（IPCC 取 1.244）； $\delta$  为生物量扩展系数（IPCC 默认值为 1.90）； $\rho$  为干质量系数（IPCC 取 0.5）； $\gamma$  为含碳率（IPCC 取 0.5）

### 2.1.4 模型模拟法

森林植被碳储量受多种因素影响，因此在测算森林固碳量时，需全面考虑生态系统的静态与动态因素。模型模拟法能够结合多方面的数据与影响因素，提供相对精准的碳储量估算。例如，赵方圆等<sup>[53]</sup>运用 InVEST 模型研究祁连山林区乔木林的碳储量时空变化。结果表明，在 2016—2019 年间，该区域的乔木林碳储量增长了  $2.58 \times 10^6 \text{ Mg}$ ，年均碳汇量为  $8.63 \times 10^5 \text{ Mg}$ 。这一结果展示了模

型在捕捉时间动态变化特征的强大能力。与此同时, 夏全升等<sup>[54]</sup>也使用 InVEST 模型, 基于芜湖市 2021 年土地利用数据, 估算该市的碳储量为  $1.2 \times 10^7$  Mg。这些研究显示了 InVEST 模型的广泛适用性, 能够有效适应不同区域的碳储量估算需求。然而, 随着森林生态系统的复杂性增加, 其他模型如 FORCCHN 模型在模拟大尺度和复杂森林动态方面展现了更强的灵活性和精确性。例

如, Zhao 等<sup>[55]</sup>结合遥感数据, 利用 FORCCHN 模型模拟了云南、广西和广东的森林碳储量, 结果表明云南省森林单位面积碳储量最大, 为  $7.28 \times 10^7$  Mg/a, 广西和广东的森林碳储量分别为  $1.85 \times 10^7$  Mg/a 和  $1.01 \times 10^7$  Mg/a。这一研究突显了 FORCCHN 模型在大区域碳储量模拟中的优势, 尤其是在结合遥感数据后, 能够更灵活地捕捉不同森林区域的碳储量变化。

表 1 植物固碳生物量法的几种常用方法<sup>†</sup>  
Table 1 Common methods of forest carbon sequestration biomass

方法 Methods	公式 Formulas	所需数据 Required data	尺度 Dimensions
皆伐法 Clear cutting method 生物量回归方程法 Biomass regression equation method	$Y=A \times y \times d$ $Y=A \times a \times (D^b H)^c \times d$	平均生物量, 碳含量, 森林面积 / 树高, 胸径	小尺度
生物量换算因子连续函数法 Biomass expansion factor continuous function method	$Y=A \times V \times BEF \times d$ $BEF = a + \frac{b}{V}$	平均蓄积量, 森林面积, 碳转化系数	小尺度
蓄积量扩展法 Accumulation expansion method	$Y=A \times (a \times V + b) \times d$	平均蓄积量, 森林面积, 含碳率, 转化系数	小尺度

<sup>†</sup>  $Y$  为植被碳储量,  $A$  为森林面积,  $y$  为平均生物量,  $V$  为平均蓄积量,  $D$  为胸径,  $H$  为树高,  $D$  为森林含碳率, BEF 为生物量扩展因子;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。  
 $Y$  is vegetation carbon storage,  $A$  is forest area,  $y$  is average biomass,  $V$  is average accumulation,  $D$  is breast height diameter,  $H$  is tree height,  $D$  is forest carbon content, and BEF is biomass expansion factor;  $a$ ,  $b$  and  $c$  are constants.

除了 InVEST 和 FORCCHN 模型外, CO<sub>2</sub>FIX 模型在研究森林生态系统碳通量方面也被广泛应用。该模型通过关注森林中的生物量、土壤碳储量以及林产品间的碳通量动态<sup>[56]</sup>, 帮助研究者更好地理解森林吸收与释放二氧化碳的过程<sup>[57]</sup>。董灵波等<sup>[58]</sup>通过 CO<sub>2</sub>FIX 模型, 发现帽儿山地区长白落叶松人工林每公顷可固定碳 271.57 Mg。同样, Cheng 等<sup>[59]</sup>利用河南省森林数据和 CO<sub>2</sub>FIX 模型, 预测出 2019 至 2060 年河南省乔木林的碳密度将从 28.64 Mg/hm<sup>2</sup> 增加至 76.04 Mg/hm<sup>2</sup>。这表明, CO<sub>2</sub>FIX 模型不仅能够模拟当前碳储量, 还具备预测未来潜在固碳能力的优势。

尽管不同模型各自具有独特的优势和适用场景, 但它们的共同目标是通过结合各种数据与参数, 提升碳储量估算的准确性。然而, 许多模型基于静态或经验统计, 带有较多假设, 可能会在复杂的生态系统中存在许多不确定性。因此, 综合利用遥感和 GIS 技术, 结合模型模拟法, 能够为大尺度碳循环过程提供更加全面和精确的评估与支持。

### 2.1.5 遥感估算法 (GIS)

随着卫星通信技术的飞速发展, 基于遥感数据的碳储量估算方法逐渐成为主流。通过 RS (遥感)、GIS (地理信息系统) 和 GPS (全球定位系统) 等 3S 技术, 可以获取大尺度的植被碳储量信息, 进一步提高碳储量估算的精度和效率<sup>[60]</sup>。遥感技术中的光学遥感数据是一种常用且成本较低的手

段。然而, 在生物量密度较高的地区, 光学遥感信号可能会饱和, 导致数据失真, 并容易受到气候条件的影响<sup>[61]</sup>。相比之下, 合成孔径雷达 (SAR) 具有全天候、全天时的优势, 且不易受天气影响<sup>[62]</sup>。SAR 不仅能穿透森林冠层, 获取森林结构的深层信息, 还可以捕捉树干和树枝的相关数据<sup>[63]</sup>。这种技术在不同深度的森林冠层数据采集中都表现出极大的潜力。例如, 姬永杰等<sup>[64]</sup>采用 P 波段 SAR 数据, 测算出大兴安岭森林生态站单位面积森林地上生物量 45.00 Mg/hm<sup>2</sup>。激光雷达 (Lidar) 是另一种强大的工具, 该技术通过主动扫描, 捕捉森林地表的三维结构信息。虽然 Lidar 数据能够提供更高的测量精度, 但由于获取成本较高, 其应用范围相对有限。然而, Ma 等<sup>[65]</sup>优化了森林碳储量建模方法, 结合机载激光雷达数据, 在美国 8 个州构建了高分辨率的森林碳储量地图, 估算其地上碳储量为  $1.13 \times 10^9$  Mg。这种高精度数据为未来碳储量预测和生态系统管理提供了强有力的支持。

在遥感估算方法中, 多元回归分析法常被用于结合遥感影像与地面生物量数据, 构建回归模型, 以此估算碳储量<sup>[66]</sup>。例如, Merganič 等<sup>[67]</sup>通过多元回归分析, 估算出俄罗斯北部普托拉纳高原森林的单位面积生物量为 6.47 ~ 149.00 Mg/hm<sup>2</sup>。杨伟志等<sup>[68]</sup>基于此法反演西宁市的森林生物量, 估算其森林总碳储量为  $4.99 \times 10^5$  Mg。尽管回归分析法具有易操作和低成本的优点, 但在处理复

杂森林结构时,模型的结果可能会受到分特征、季节变化和天气状况的影响。为了提高估算精度,人工智能方法逐渐被引入森林碳储量估算中。通过神经网络、随机森林等算法,解决复杂的非线性问题,提高精度<sup>[62]</sup>。Foody等<sup>[69]</sup>利用人工智能模型估算婆罗洲热带雨林的生物量,结果显示其与传统回归分析法的相关系数高达0.9,证明了人工智能模型在精度上的优势。谭雨欣等<sup>[70]</sup>基于XGBoost算法,反演广西茅尾海红树林保护区的地上生物量,估算结果显示无瓣海桑单位面积地上生物量为19.14~138.46 Mg/hm<sup>2</sup>。

总体来说,遥感估算方法通过结合多种技术手段,如SAR、Lidar、多元回归分析和人工智能,不仅能够在大尺度上提供精准的碳储量估算,还可以根据不同森林结构和气候条件灵活调整,进一步提升估算结果的可靠性和适用性。

### 2.1.6 其他技术

除了模型模拟法和遥感估算法,其他技术也在森林碳通量测算中起到了关键作用。其中,涡度相关EC(eddy covariance)技术是直接且非破坏性测量碳通量的先进手段之一<sup>[71]</sup>。Larsen等<sup>[72]</sup>通过EC技术估算出丹麦Jutland地区的地上生物量为980±43 Mg/hm<sup>2</sup>。该技术不仅能够研究森林不同年龄阶段的碳通量变化,还可以分析干扰因素对碳通量的影响。由于EC系统可以长时间自动运行,因此适合监测碳通量的时间变化。然而,EC技术的使用前提是理想的气候条件、较为平坦的地形和坚实的经济基础,因此在全球范围内,其站点数量有限。

另外,箱式法以其简单便捷的操作方式,被广泛用于评估特定植被的CO<sub>2</sub>通量。与EC技术相比,箱式法主要用于测定小范围内植被的部分CO<sub>2</sub>通量,如叶片和枝干的CO<sub>2</sub>排放量。这种方法虽然操作灵活且数据准确,但受限于自动化观测的能力和观测范围,主要应用于小尺度的研究,难以用于大范围的碳通量估算。随着各种技术的发展,森林碳储量估算已经实现了从小尺度精确观测到大尺度模拟推测的跨越。然而,森林生态系统中的碳储量不仅仅存在于植物体内,土壤也是重要的碳库之一。准确评估土壤碳储量同样是理解整体碳循环的重要环节。

## 2.2 土壤碳储量估算方法

森林土壤碳库由有机碳库和无机碳库两部分组成,尤其是有机碳库,作为碳循环中的活跃成分,

对维持生态系统的生产力与稳定性有重要意义。土壤碳储量的估算方法根据研究尺度和数据获取方式的不同,可以分为土壤类型法、生命带法、模型估算法和遥感估算法几类:

土壤类型法是按空间分布和深度采集土样,测定其有机碳(SOC)含量,并结合土壤类型面积推算出区域土壤有机碳储量。例如,查印水等<sup>[73]</sup>利用土壤类型法,估算出我国鄱阳湖地区的土壤有机碳储量平均值为1.13×10<sup>9</sup> Mg,碳密度为12.03 kg/m<sup>2</sup>。张亦凡等<sup>[74]</sup>同样使用该方法,测算了华南地区0~60 cm土层的有机碳储量为2.5×10<sup>6</sup> Mg。该方法简单且易于操作,适用于小尺度区域,在大尺度研究中,由于采样工作量巨大,存在明显的局限性。

生命带法则是通过将不同生态系统的土壤有机碳密度与其面积相乘,计算出整个区域的碳储量。Post等<sup>[75]</sup>基于土壤剖面数据,估算全球土壤有机碳储量为1.4×10<sup>18</sup> Mg。尽管这种方法可以在无详细土壤剖面资料时使用,但由于植被类型面积的精确度有限,再加上土地利用方式的变化,计算结果可能会产生较大误差。

土壤有机碳受多种环境因子影响,模型估算法则是通过建立数学模型来估算区域土壤碳储量。例如,李海萍等<sup>[76]</sup>基于随机森林模型和克里金插值法,估算了0~20 cm土壤的有机碳总储量分别为1.7×10<sup>8</sup>和2.4×10<sup>8</sup> Mg。模型估算法能够模拟土壤碳储量的动态变化,并解决不同尺度下的估算问题。然而,模型的参数设置和初始化通常较为复杂,同时缺乏足够的观测数据支持,可能导致结果误差较大。

遥感估算法则是通过土壤分布图和空间数据库,结合数字化和模块化分析手段,推算区域土壤有机碳储量。例如,Guo等<sup>[77]</sup>基于深度学习算法,通过空间均匀采样,得出土壤有机碳分布集中在4.2 kg/m<sup>2</sup>左右。该方法能够解决土壤碳储量由点尺度到区域尺度带来的尺度扩展问题,便于推算土壤碳储量的动态变化,且适合与其他方法结合,以提高估算精度,但需要结合大范围的土壤基础数据。

总体来说,土壤碳储量估算方法各具优势,从土壤类型法的实地测量,到模型和遥感技术的应用,每一种方法都为特定情境下的碳储量估算提供了独特的解决方案。结合不同方法的优点,有助于我们更全面地理解土壤碳库在全球碳循环中的作用。

## 2.3 凋落物碳储量估算

尽管凋落物碳储量仅占森林生态系统总碳储量的约 5%<sup>[7]</sup>, 它仍在森林生态系统的物质循环中依然扮演着重要角色。凋落物通过分解和碳固定等过程, 直接影响森林土壤碳库的变化。为了更准确地评估森林碳储量, 凋落物碳储量的估算是必不可少的。目前, 广泛应用的凋落物碳储量估算方法主要包括实地收集干重法、碳含量分析法和遥感结合样地法。实地收集干重法是最常见的凋落物碳储量测量手段。该方法将在样地中收集到的凋落物样品在实验室中烘干至恒质量, 以测定其干质量。然后, 将单位面积上的凋落物干质量乘以凋落物碳含量系数(通常为 45% ~ 50%)得出其碳储量。例如, 在巴西棕榈沼泽的一项研究中, 利用该方法估算年凋落物产量为 3.58 Mg/hm<sup>2</sup><sup>[78]</sup>。该方法操作简单、成本低廉, 适合小区域和短期研究, 尤其适用于分布较均匀的凋落物。然而, 由于采样需要大量人力和时间, 且受天气等外部条件影响较大, 实地收集干重法较难应用于大范围区域的长期监测。碳含量分析法通过实验设备(如元素分析仪)直接测定凋落物样品中的碳含量, 并利用这些数据来推算碳储量。Benício 等<sup>[79]</sup>基于此方法, 估算出凋落物组分的年固碳总量为 3.99 Mg/hm<sup>2</sup>。与实地收集干重法相比, 碳含量分析法能够更加准确地测定不同类型凋落物的碳含量, 如叶片、枝条和果实等。然而, 使用元素分析仪的成本较高, 分析过程耗时, 且需要实验室设备和技术支持, 因此仅适用于小规模、高精度的碳储量测量。随着遥感技术的发展, 结合遥感与地面样地调查的数据分析方法, 已成为估算大尺度区域凋落物碳储量的有效手段。该方法利用卫星或无人机遥感技术捕捉植被和凋落物的分布数据, 结合地面样地调查, 建立模型来估算区域凋落物碳储量。Lee 等<sup>[80]</sup>学者基于随机森林模型, 估算出针叶林凋落物碳储量为 4.63 ± 0.18 Mg/hm<sup>2</sup>。这一方法适用于大范围区域的碳储量估算和长期动态监测, 但由于模型构建复杂, 且受多种环境与气候因素影响, 估算精度可能受到限制, 并存在一定的误差。

## 3 不同尺度下碳储量测算方法的适用性

森林碳储量的测算方法应根据研究的空间尺度和精度需求进行相应选择。不同尺度下, 研究的侧重点各有不同, 所需的测算方法也应随之调整。

## 3.1 小尺度研究

在小尺度研究中, 通常具有较高测算精度和精密的原始数据, 依赖详细的实地测量和精细的仪器分析。生物量回归方程法是估算植物碳储量最常用的方法。虽然皆伐法获得的数据更为精确, 但与环保的理论相悖, 所以很难得到广泛的应用。这两种方法都需人工测量树木的胸径、树高等数据, 结合回归方程估算植被碳储量。对于土壤碳储量, 土壤类型法是最典型的小尺度测算方法。通过采集不同土层的土壤样品, 结合实验室分析, 得到最为准确的土壤有机碳含量。在凋落物碳储量的测算中, 实地收集干重法是最精确的方式, 特别适用于小范围的碳储量测算。虽然这些方法得到的数据精度高, 但由于时间和人力成本较大, 通常只适用于局部区域的研究。

## 3.2 中尺度研究

在中尺度的研究中, 研究者需要在保持测算精度的同时, 降低人力、物力成本。研究者需要借助模型与扩展因子来实现估算。对于植物碳储量, 中尺度研究中常用的包括生物量换算因子连续函数法、蓄积量扩展法以及部分模型模拟法。这些方法都需以森林资源清查数据为基础, 结合不同森林类型的扩展因子和蓄积扩大系数, 估算较大范围内的碳储量。而部分模型模拟法(如 CO<sub>2</sub>FIX 模型)则能根据气候、地形和森林管理等方面的因素, 提供更为动态的碳储量估算。土壤碳储量的中尺度研究多采用生命带法和模型模拟法。生命带法通过有机碳密度和面积数据, 有效估算出中等区域的土壤碳储量。而模型模拟法(如 ROTH-C 模型)能对土壤碳储量变化趋势进行动态模拟。凋落物碳储量的测算中, 碳含量分析法在中尺度内可以适当应用, 但当研究区域较大时, 工作量和成本仍然较为庞大。为提升效率, 可以将碳含量分析法与模型估算法结合, 利用气候条件、森林类型等数据, 通过模型对整个区域的凋落物碳储量进行推算, 最后再通过得到的部分实测数据验证模型的准确性。

## 3.3 大尺度研究

在全球或国家级别的研究中, 碳储量测算仍然面临着数据需求量大、模型参数设置困难等挑战。因此, 模型模拟法和遥感技术成为最主要的估算工具。在大尺度的植物碳储量测算中, 遥感估算法是最为高效的方法。其通过遥感卫星数据

(如光学遥感、激光雷达等),快速获取大范围森林植被的基础信息,从而估算目标区域的碳储量。模型模拟法(如 InVEST 模型)因其能动态监测大范围生态系统中的碳储量变化,在大尺度研究中早已得到广泛应用。对于土壤碳储量,大尺度研究也主要将模型模拟法与遥感技术相结合。模型模拟法(如 Roth-C 模型)通过整合土地利用变化等因素,动态估算土壤碳储量变化。结合遥感数据能帮助研究者对大尺度的土壤碳储量进行空间分析,并提高估算的精度。在全球或国家级别的研究中,凋落物实地收集干重法和碳含量分析法实施难度较大。因此,遥感结合样地法成为主要研究手段。在推算大范围内的凋落物碳储量的同时,跟踪凋落物的分解速率和碳排放情况。

不同尺度的碳储量测算方法有其适用性和局限性。小尺度研究注重精度,中尺度研究则平衡了效率、成本和精度,而在大尺度研究中,遥感技术与模型模拟法则是实现动态监测和估算的有效工具。因此,选择适当的碳储量测算方法需要综合考虑研究的尺度、精度需求和资金状况。

#### 4 当前研究重点与展望

在森林碳计量领域,当前研究集中于以下几个关键科学问题:1)森林碳固存机制的复杂性;2)计量方法的差异性;3)定量化研究中的不确定性和区域适用性。

森林碳储量的动态变化受到多因素的影响,包括立地条件、树种选择、森林经营管理等。森林生态系统中的碳固存机制和过程极其复杂,不仅与不同植物生长阶段的碳吸收有关,还与土壤和凋落物参与的碳循环过程有密切关联。当前研究对于生物地球循环过程的探讨已逐步深入,特别是在不同生态系统组分(如植被、土壤、凋落物)中的碳循环特征方面。例如,某些树种的生长速率及其与土壤的交互作用可能影响碳的固定和释放。因此,对于这些影响机制的进一步研究,对于理解森林碳储量的动态变化至关重要。

碳计量方法的核心在于如何在确保估算精度的前提下准确量化森林生态系统中的动态碳流动。现有的森林碳计量方法(包括植被、土壤和凋落物)主要基于实测数据法、模型模拟法、遥感估测法等。每种方法都有其理论基础,但各方法的适用范围和精度存在显著的差异性。了解这些方法的局限性与优势,可以帮助研究者选择最为合适的测算方法,也为估算方法的改进提供理论依据。定量化研究的重点在于减少数据和模型的不确定性,

并提升不同方法在各种区域和条件下的适用性。

研究区域、森林类型等方面会对碳储量计量结果产生影响,导致各计量方法的精度和适用性各异。此外,气候、地形和土壤等因素的异变性进一步增加了碳计量的难度。例如,气候变暖可能加速凋落物的分解,从而影响碳储量估算的准确性。因此,当前的研究应当集中于整合不同计量方法,结合最新的建模技术,尽可能的减少估算过程中的不确定性和局限性。融合生物量法与遥感技术,将实地监测数据与模型结合,实现更为全面的碳储量估算。模型的区域适用性是研究的关键,需要进一步调整模型参数以适用于不同区域的生态和环境条件。

最后,本文通过比较不同森林碳计量方法,基于分析不同条件下森林固碳计量方法的优势与局限性。为后续的研究提出以下改进建议:1)进一步研究各碳计量方法对森林碳储量的影响因素及其适用条件,以揭示不同方法的潜在差异性;2)探索多方法结合的综合计量策略,提高测量的准确性和普适性,尤其是在大尺度估算方面。

此外,未来的研究应着重于:1)开发更加精准的计量技术和工具,以提高森林碳储量测算的精度和适用性;2)在不同气候和森林类型下进行更大范围的实地验证,特别是针对全球气候变化背景下的森林碳储量研究;3)加强对碳计量方法理论基础的深入研究,以支持全球气候变化应对策略的制定。

#### 参考文献:

- [1] GAO Z Y, LI L Q, HAO Y. Financial risk under the shock of global warming: evidence from China[J]. *Business Strategy and the Environment*,2024,33(2):335-351.
- [2] KUMAR S, CHATTERJEE U, DAVID RAJ A, et al. Global warming and climate crisis /extreme events[C]//Climate crisis: adaptive approaches and sustainability. Cham: Springer Nature Switzerland,2023:3-18.
- [3] WOLF S, PAUL-LIMOGES E. Drought and heat reduce forest carbon uptake[J]. *Nature Communications*,2023,14(1):6217.
- [4] HAIT M, SAHU P. Natural hazards as a source of environmental pollution in the global south[C]//Biomonitoring of Pollutants in the Global South. Singapore: Springer Nature Singapore,2024: 153-190.
- [5] WEISKOPF S R, RUBENSTEIN M A, CROZIER L G, et al. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States[J]. *Science of the Total Environment*,2020,733:137782.

- [6] FLADE L, HOPKINSON C, CHASMER L. Allometric equations for shrub and short-stature tree aboveground biomass within boreal ecosystems of northwestern Canada[J]. *Forests*,2020,11(11):1207.
- [7] SUN W L, LIU X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China[J]. *Forest Ecosystems*, 2020,7:4.
- [8] HARMON M E, FERRELL W K, FRANKLIN J F. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests[J]. *Science*,1990,247(4943):699-702.
- [9] LAW B E, THORNTON P E, IRVINE J, et al. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages[J]. *Global Change Biology*,2001,7(7): 755-777.
- [10] 罗艺伟,张雷明,郭学兵,等. 温带阔叶红松林和南亚热带常绿林生态系统碳分配的比较研究 [J]. *资源与生态学杂志*, 2018,9(6):642-53.
- LUO Y W, ZHANG L M, GUO X B, et al. A comparative study of carbon allocation in temperate broadleaf red pine forest and southern subtropical evergreen forest ecosystems[J]. *Journal of Resources and Ecology*,2018,9(6):642-653.
- [11] CAO M K, WOODWARD F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change[J]. *Nature*, 1998,393(6682):249-252.
- [12] WANG Z C, WANG G Y, LI Y X, et al. Determinants of carbon sequestration in thinned forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2024,951:175540.
- [13] 袁钰娜,姜学兵. 森林生态系统碳估测方法及展望 [J]. *人民珠江*,2024,45(2): 90-96.
- YUAN Y N, JIANG X B. Methods and prospects of forest ecosystem carbon estimation[J]. *People's Pearl River*,2024,45(2): 90-96.
- [14] SOLOMON S. Intergovernmental panel on climate change: fourth assessment report summary for policymakers[J]. *International Legal Materials*,2008,47(1):99-121.
- [15] AI L, WU F Z, FAN X B, et al. Different effects of litter and root inputs on soil enzyme activities in terrestrial ecosystems[J]. *Applied Soil Ecology*,2023,183:104764.
- [16] ZHANG H C, GOLL D S, WANG Y P, et al. Microbial dynamics and soil physicochemical properties explain large-scale variations in soil organic carbon[J]. *Global Change Biology*,2020,26(4):2668-2685.
- [17] SCHARLEMANN J P, TANNER E V, HIEDERER R, et al. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*,2014,5(1):81-91.
- [18] LAL R. Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools[J]. *Energy & Environmental Science*,2008,1(1):86-100.
- [19] TIAN H Q, LU C Q, YANG J, et al. Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: Current status and future directions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*,2015,29(6):775-792.
- [20] LIU Y L, ZHANG A L, LI X Y, et al. Litter decomposition rate response to multiple global change factors: a meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2024,195:109474.
- [21] RAICH J W, RUSSELL A E, KITAYAMA K, et al. Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests[J]. *Ecology*,2006,87(1):76-87.
- [22] MALHI Y, BALDOCCHI D D, JARVIS P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests[J]. *Plant, Cell & Environment*,1999,22(6):715-740.
- [23] TANG J, CHENG H, FANG C M. The temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition is not related to labile and recalcitrant carbon[J]. *PLoS ONE*,2017,12(11):e0186675.
- [24] CAMPO J, MERINO A. Variations in soil carbon sequestration and their determinants along a precipitation gradient in seasonally dry tropical forest ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2016,22(5):1942-1956.
- [25] GREEN J K, SENEVIRATNE S I, BERG A M, et al. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake[J]. *Nature*,2019,565(7740):476-479.
- [26] JIN Z W, ZHANG X L, CHEN X M, et al. Dynamics of soil organic carbon mineralization and enzyme activities after two months and six years of biochar addition[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*,2023,13(2):1153-1162.
- [27] CURTIN D, CAMPBELL C A, JALIL A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998,30(1):57-64.
- [28] ZHENG J Q, BERNS-HERRBOLDT E C, GU B H, et al. Quantifying pH buffering capacity in acidic, organic-rich Arctic soils: measurable proxies and implications for soil carbon degradation[J]. *Geoderma*,2022,424:116003.
- [29] OLSON K R, AL-KAISI M, LAL R, et al. Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2016,71(3):61-67.
- [30] KOBLER J, ZEHETGRUBER B, DIRNBÖCK T, et al. Effects of aspect and altitude on carbon cycling processes in a temperate mountain forest catchment[J]. *Landscape Ecology*,2019,34(2): 325-340.
- [31] 徐睿,谢江,岩香甩,等. 西双版纳橡胶林与其他类型林分生物量及碳储量的比较 [J]. *热带作物学报*,2021,42(4):1145-53.
- XU R, XIE J, YAN X S, et al. Comparison on biomass and carbon storage of rubber plantation with other types of forest stands in

- Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2021,42(4):1145-1153.
- [32] SUGIYAMA A, GAME E T, WRIGHT S J. Planting exceptional tropical tree species to increase long-term carbon storage in assisted secondary succession[J]. Journal of Applied Ecology, 2024,61(1):7-12.
- [33] 张毅, 牟长城, 郑瞳, 等. 小兴安岭天然白桦林生态系统碳储量[J]. 北京林业大学学报, 2015,37(4):38-47.
- ZHANG Y, MOU C C, ZHENG T, et al. Ecosystem carbon storage of natural secondary birch forests in Xiaoxing'an mountains of China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2015,37(4):38-47.
- [34] 惠建平, 李文臣, 白玉茹, 等. 赤峰地区天然次生林主要树种碳储量及其经济价值估算[J]. 内蒙古林业科技, 2020,46(1):25-27.
- HUI J P, LI W C, BAI Y R, et al. Estimation of carbon storage and economic value of main tree species of natural secondary forests in Chifeng[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology,2020,46(1):25-27.
- [35] KAUL M, MOHREN G M, DADHWAL V K. Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2010,15:489-510.
- [36] NAVE L E, VANCE E D, SWANSTON C W, et al. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests[J]. Forest Ecology and Management,2010,259(5):857-866.
- [37] DAVIS S C, HESSL A E, SCOTT C J, et al. Forest carbon sequestration changes in response to timber harvest[J]. Forest Ecology and Management,2009,258(9):2101-2109.
- [38] HOU J H, TIAN J X, XU L, et al. Selective harvesting at rational intervals promotes carbon sequestration in temperate coniferous and broad-leaved mixed forests in China[J]. Journal of Forestry Research,2021,32(3):1025-1033.
- [39] DE VRIES W, REINDS G J, GUNDERSEN P, et al. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils[J]. Global Change Biology,2006,12(7):1151-1173.
- [40] BAI Y X, DING G J. Estimation of changes in carbon sequestration and its economic value with various stand density and rotation age of *Pinus massoniana* plantations in China[J]. Scientific Reports,2024,14(1):16852.
- [41] 刘立斌, 周运超, 程安云, 等. 利用皆伐法估算黔中喀斯特森林地上生物量[J]. 生态学报, 2020,40(13):4455-61.
- LIU L B, ZHOU Y C, CHEN A Y, et al. Aboveground biomass estimate of a karst forest in central Guizhou province, southwestern China based on direct harvest method[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(13):4455-4461.
- [42] PETREA S, RADU G R, BRAGA C I, et al. The role of wood density variation and biomass allocation in accurate forest carbon stock estimation of European beech (*Fagus sylvatica* L.) mountain forests[J]. Forests,2024,15(3):404.
- [43] TIMOTHY D, ONISIMO M, CLETAH S, et al. Remote sensing of aboveground forest biomass: a review[J]. Tropical Ecology, 2016,57:125-132.
- [44] 黄全, 李意德, 赖巨章, 等. 黎母山热带山地雨林生物量研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1991,15(3):197-206.
- HUANG Q, LI Y D, LAI J Z, et al. Biomass of a tropical montane rainforest in Lemu mountain[J]. Journal of Plant Ecology and Geobotany,1991,15(3):197-206.
- [45] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2007,37(6):804-12.
- FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000[J]. Scientia Sinica (Terra),2007,37(6):804-812.
- [46] 方精云. 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算[J]. 植物生态学报, 2000,24(5):635-638.
- FANG J Y. Forest carbon pools at mid- to high-latitudes in the northern Hemisphere may be much smaller than current estimates[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2000,24(5):635-638.
- [47] 考青云, 李家欣, 欧兴浪, 等. 黑龙江省森林植被碳储量时间变化及其影响因素的探究[J]. 中国林业经济, 2022(4):73-79.
- KAO Q Y, LI J X, OU X L, et al. Temporal change of forest vegetation carbon storage and its influencing factors in Heilongjiang province[J]. China Forestry Economy,2022(4):73-79.
- [48] 屈亚妮, 张加龙, 魏晓燕, 等. 森林碳汇和固碳潜力计算系统设计与实现[J]. 电子技术, 2023,52(1):115-117.
- QU Y N, ZHANG J L, WEI X Y, et al. Design and realisation of a calculation system for forest carbon sink and sequestration potential[J]. Electronic Technology,2023,52(1):115-117.
- [49] 陈周光, 龙飞, 祁慧博. 浙江省森林碳汇潜力及经济价值研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022,34(4):126-33.
- CHEN Z G, LONG F, QI H B, et al. Study on the potential and economic value of forest carbon sinks in Zhejiang province[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, 2022,34(4):126-133.
- [50] 文勇军, 杨韩. 云南省“十三五”期间森林碳储量动态变化及碳汇潜力分析[J]. 林业建设, 2022(4):22-5.
- WEN Y J, YANG H. Analysis of forest carbon stock dynamics and carbon sink potential in Yunnan province during the 13th Five-Year Plan period[J]. Forestry Construction,2022(4):22-25.
- [51] 令狐大智, 罗溪, 朱帮助. 森林碳汇测算及固碳影响因素研究

- 进展[J]. 广西大学学报(哲学社会科学版),2022,44(3):142-55.
- LINHU D Z, LUO X, ZHU B Z. Progress of forest carbon sink measurement and carbon sequestration influencing factors[J]. Journal of Guangxi University (Philosophy and Social Science), 2022,44(3):142-155.
- [52] CHANGE I. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[J]. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan, 2006.
- [53] 赵方圆, 王琼芳, 张华堂, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃省祁连山林区乔木林碳储量时空变化研究[J]. 西北林学院学报, 2023,38(4):233-40.
- ZHAO F Y, WANG Q F, ZHANG H T, et al. Spatial and temporal variation of carbon stocks in arboreal forests in the Qilian Mountains of Gansu province based on the InVEST model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023,38(4):233-240.
- [54] 夏全升, 洪欣, 桂翔, 等. 基于 InVEST 模型的芜湖市固碳能力及影响因子研究[J]. 水土保持通报, 2023,43(5):385-94.
- XIA Q S, HONG X, GUI X, et al. Study on carbon sequestration capacity and influencing factors in Wuhu city based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5): 385-394.
- [55] ZHAO J F, LIU D S, CAO Y, et al. An integrated remote sensing and model approach for assessing forest carbon fluxes in China[J]. Science of the Total Environment, 2022,811:152480.
- [56] NABUURS G J, SCHELHAAS M J. Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO<sub>2</sub>FIX[J]. Ecological Indicators, 2002,1(3):213-223.
- [57] NEGASH M, KANNINEN M. Modeling biomass and soil carbon sequestration of indigenous agroforestry systems using CO<sub>2</sub>FIX approach[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015,203:147-155.
- [58] 董灵波, 陈冠谋, 藺雪莹, 等. 基于 CO<sub>2</sub>FIX 模型的长白落叶松人工林碳汇和木材生产模拟[J]. 应用生态学报, 2022,33(10): 2653-2662.
- DONG L B, CHEN G M, LIN X Y, et al. Simulation of carbon sequestration and timber production in *Larix olgensis* plantation based on CO<sub>2</sub>FIX model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(10):2653-2662.
- [59] CHENG K L, WU J, MA X Z, et al. Simulation of carbon sink of arbor forest vegetation in Henan province of China based on CO<sub>2</sub>FIX Model[J]. Land, 2023,12(1):246.
- [60] WULDER M A, WHITE J C, NELSON R F, et al. Lidar sampling for large-area forest characterization: a review[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,121:196-209.
- [61] 杨雪峰, 咎梅, 木尼热·买买提. 基于无人机和卫星遥感的胡杨林地上生物量估算[J]. 农业工程学报, 2021,37(1):77-83.
- YANG X F, ZAN M, MUNIRE M M T. Above-ground biomass estimation of poplar forest based on UAV and satellite remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(1):77-83.
- [62] 徐丽华, 张结存, 黄博, 等. 基于 QuickBird 影像的城市森林碳储量遥感估测[J]. 应用生态学报, 2014,25(10):2787-93.
- XU L H, ZHANG J C, HUANG B, et al. Remote sensing estimation of urban forest carbon stock based on QuickBird images[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014,25(10):2787-2793.
- [63] NELSON R F, HYDE P, JOHNSON P, et al. Investigating RaDAR-LiDAR synergy in a North Carolina pine forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,110(1):98-108.
- [64] 姬永杰, 杨丛瑞, 张王菲, 等. 基于机载 P 波段全极化 SAR 数据的森林地上生物量估测[J]. 浙江农林大学学报, 2022,39(5): 971-980.
- JI Y J, YANG C R, ZHANG W F, et al. Forest aboveground biomass estimation based on airborne P-band fully polarised SAR data[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022,39(5): 971-980.
- [65] MA L, HURTT G, TANG H, et al. High-resolution forest carbon modelling for climate mitigation planning over the RGGI region, USA[J]. Environmental Research Letters, 2021,16(4):045014.
- [66] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 等. 城市森林碳汇及其核算方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2013,32(12):3368-3377.
- ZHOU J, XIAO R B, ZHUANG C W, et al. Urban forest carbon sink and its estimation methods: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(12):3368-3377.
- [67] MERGANIČ J, PICHLER V, GÖMÖRYOVÁ E, et al. Modelling impact of site and terrain morphological characteristics on biomass of tree species in Putorana region[J]. Plants, 2021,10(12): 2722.
- [68] 杨伟志, 赵鹏祥, 薛大庆, 等. 基于 Landsat-8 影像的西安市南北山森林生物量估测模型研究[J]. 西北林学院学报, 2016,31(2):33-37,97.
- YANG W Z, ZHAO P X, XUE D Q, et al. Estimation of forest biomass estimation model of North and South Mountain in Xining city based on Landsat-8 imagery[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(2):33-37,97.
- [69] FOODY G M, BOYD D S, CUTLER M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,85(4):463-474.
- [70] 谭雨欣, 田义超, 黄卓梅, 等. 北部湾茅尾海无瓣海桑红树林地上生物量反演——基于 XGBoost 机器学习算法[J]. 生态学报, 2023,43(11):4674-4688.
- TAN Y X, TIAN Y C, HUANG Z M, et al. Inversion of

- aboveground biomass of mulberry mangroves in the Maowei Sea, Beibu Gulf: based on XGBoost machine learning algorithm[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2023,43(11):4674-4688.
- [71] NANDAL A, YADAV S S, RAO A S, et al. Advance methodological approaches for carbon stock estimation in forest ecosystems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023,195(2):315.
- [72] LARSEN K S, IBROMA A, BEIER C, et al. Ecosystem respiration depends strongly on photosynthesis in a temperate heath[J]. *Biogeochemistry*,2007,85:201-213.
- [73] 查印水, 汤序军, 吴建勋, 等. 基于土壤类型法的鄱阳湖生态经济区土壤碳密度和碳储量评估 [J]. *江西科学*, 2020,38(4): 541-545.
- ZHA Y S, TANG X J, WU J X, et al. Evaluation of soil carbon density and carbon storage in Poyang Lake Ecological and Economic Zone based on soil type method[J]. *Jiangxi Science*,2020,38(4):541-545.
- [74] 张亦凡, 王海燕, 高子滢, 等. 华南地区森林土壤有机碳和全氮密度及储量估算 [J/OL]. *中国土壤与肥料*, 1-11[2024-10-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.s.20240710.1914.002.html>.
- ZHANG Y F, WANG H Y, GAO Z Y, et al. Estimation of organic carbon and total nitrogen density and storage in forest soils in South China[J]. *China Soil and Fertiliser*,1-11[2024-10-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.s.20240710.1914.002.html>.
- [75] POST W M, MANN L. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation[R]. United States: Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem (ESS-DIVE),1990.
- [76] 李海萍, 杜佳琪, 唐浩竣. 基于随机森林的县域土壤有机碳密度及储量估算 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021(3):1-8.
- LI H P, DU J Q, TANG H J. Estimation of soil organic carbon density and reserves in counties based on random forest model in county level[J]. *China Soil and Fertiliser Sciences in China*,2021(3):1-8.
- [77] GUO Z C, LI Y Q, WANG X Y, et al. Remote sensing of soil organic carbon at regional scale based on deep learning: a case study of agro-pastoral ecotone in northern China[J]. *Remote Sensing*,2023,15(15):3846.
- [78] SALES G D B, LESSA T A M, FREITAS D A, et al. Litterfall dynamics and soil carbon and nitrogen stocks in the Brazilian palm swamp ecosystems[J]. *Forest Ecosystems*,2020,7(1):39.
- [79] BENÍCIO R M A, LINHARES K V, LISBOA M A N, et al. Carbon stock and sequestration as a form of payment for environmental services in a sedimentary basin humid forest refuge in Brazilian semiarid[J]. *Environmental Development*,2023,45: 100796.
- [80] LEE S, LEE S, SHIN J, et al. Assessing the carbon storage of soil and litter from national forest inventory data in south Korea[J]. *Forests*,2020,11(12):1318.

[ 本文编校: 吴 毅 ]