

碳中和目标下森林生态系统固碳功能

刘延坤¹, 陈瑶^{2*}, 刘玉龙², 李云红², 田松岩¹, 邵英男¹

¹黑龙江省生态研究所森林生态与林业生态工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

²黑龙江省生态研究所牡丹江森林生态系统定位观测研究站, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月17日; 发布日期: 2025年11月24日

摘要

森林生态系统的碳汇功能将会对碳中和目标产生重要影响。文中从全球、全国和区域尺度综述了森林生态系统碳储量、固碳速率的研究概况, 分析了影响森林生态系统固碳速率不确定性的主要因素, 着重总结了黑龙江省森林生态系统固碳功能的相关研究成果, 并展望了黑龙江省森林生态系统固碳功能发展趋势, 以期为制定区域生态管理、实现碳中和目标提供参考。

关键词

碳中和, 森林生态系统, 固碳功能

Carbon Sequestration Function of Forest Ecosystems under the Goal of Carbon Neutrality

Yankun Liu¹, Yao Chen^{2*}, Yulong Liu², Yunhong Li², Songyan Tian¹, Yingnan Shao¹, Hailing Zhang²

¹Key Laboratory of Forest Ecology and Forestry Ecological Engineering, Heilongjiang Ecology Institute, Harbin Heilongjiang

²Mudanjiang Forest Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Heilongjiang Ecology Institute, Harbin Heilongjiang

Received: October 20, 2025; accepted: November 17, 2025; published: November 24, 2025

Abstract

The carbon sink function of forest ecosystem will have an important impact on the goal of carbon

*通讯作者。

文章引用: 刘延坤, 陈瑶, 刘玉龙, 李云红, 田松岩, 邵英男. 碳中和目标下森林生态系统固碳功能[J]. 世界生态学, 2025, 14(4): 419-427. DOI: 10.12677/ije.2025.144048

neutrality. In this paper, carbon sink and carbon sequestration rate of forest ecosystem were reviews from the global, national, and regional scale. The main factors on the uncertainty in carbon sequestration rate of forest ecosystem were analyzed. The related research results of the carbon sequestration of forest ecosystem in Heilongjiang Province were emphatically summarized, and the development trends were prospects, in order to provide the reference for the regional ecological management and the carbon neutrality.

Keywords

Carbon Neutrality, Forest Ecosystem, Carbon Sequestration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为实现 2030 年碳达峰、2060 年碳中和目标，林业应对气候变化的地位和作用被提升到一个新的高度[1]。2020 年中央经济工作会议也将“开展大规模国土绿化行动，提升生态系统碳汇能力”作为“碳达峰、碳中和”的内容纳入了“十四五”开局之年我国经济工作重点任务。

森林生态系统的碳汇功能将会对碳中和目标产生重要影响，然而估算陆地生态系统碳汇仍然是全球碳预算中最不确定的部分[2]，中国区域陆地生态系统碳汇的估算同样有很大的不确定性[3][4]，甚至中国陆地生态系统碳汇能力被严重低估[5]，不同研究手段(联网观测、国家清查、模型模拟和大气反演等)估算的森林生态系统碳源/汇结果差异巨大[6]，其中气候、森林类型、林龄等因素导致森林生态系统固碳速率具有不确定性和可变性，目前研究仍缺乏空间明确且全面的碳积累速率估算值[7]，限制了森林碳中和能力的准确评估[8][9]，为估算森林生态系统碳达峰、碳中和目标实现带来了很大的不确定性[10]。开展森林生态系统碳源/汇研究是制定区域生态管理、保证生态安全、实现碳中和目标的迫切需求[6]。本文拟综述森林生态系统固碳功能及其影响因素，通过分析影响森林生态系统固碳速率不确定性的重要因素，着重分析黑龙江省森林生态系统碳储量与固碳速率研究现状，以期促进我国森林生态系统固碳功能研究，为制定黑龙江省区域生态管理、保障生态安全、实现碳中和目标提供参考。

目前针对森林生态系统固碳功能研究方法主要包括实测外推、遥感反演、涡度相关三种方法。实测外推多采用生物量转换法、生物量经验回归法等方法[7]，以野外实际调查数据或森林资源清查数据估算森林碳储量[8]，特别是我国已经获取了九次的全国森林资源清查数据，从中比较容易得到评估森林碳储量的林分因子，此方法因精度高、计算直接、目标明确而被广泛采用，但由于相关计算参数(如林分生物量与蓄积量之间的比值等)随着区域、林分结构等因素的变化而改变的导致估算精度有待提高[9]。遥感反演虽然大面积的森林碳储量、固碳速率评估可以通过遥感反演实现[10]，但在卫星获取数据的过程中，会受到大气的干扰，以至于影响其估算碳储量的精度[11]。随着近地面遥感技术的发展可大面积提取蓄积和生物量等参数使得区域尺度碳储量估算精度有效提高[12]，但此方法估算结果在尺度转化上存在较大误差，仍需以样地尺度调查为支撑[13]。涡度相关测定 CO_2 通量不受生态系统类型的限制，直接测定碳通量，可以自动长期连续精细观测。但由于其仪器昂贵，对研究人员技术要求高，数据处理复杂，在复杂地形容易受到泄流影响，限制其在碳汇功能研究中广泛应用。基于大量实测数据，在林分水平上建立林分乔木层碳储量预测模型，将遥感解译、样地调查与模型模拟等方法综合运用来减少研究误差、解决尺度耦合问题，对准确评价我国森林生态系统的碳储量、固碳速率具有重要意义。

2. 森林生态系统碳汇功能不确定性

生态系统碳源汇功能研究中因土壤碳储量较为稳定, 尤其针对大尺度研究, 常用森林植被层碳储量作为评价森林生态系统碳汇功能的基本参数[14], 植被层固碳速率作为固碳潜力预测的关键参数[15], 目前研究从林分[16]、林龄[14]、区域[7][17]、国家[18]-[20]以及全球尺度[21]对森林生态系统碳储量、固碳速率的研究揭示了不同气候条件下多种森林类型的固碳现状及动态变化。

固碳速率对评估森林生态系统碳汇功能至关重要, 研究人员收集全球 10 个国家的 13112 个碳积累参数, 实测 66 个环境协变量绘制了全球 1 公里分辨率植物碳积累速率图, 表明由于各生态区域碳累计速率差异导致政府间气候变化专门委员会(IPCC)的违约率可能平均低估了地上部分碳累积率的 32% [22]。在巴西亚马逊地区, 次生林固碳速率比原始森林快 20 倍, 且西部次生林的固碳速率($3.0 \pm 1.0 \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)比东部次生林($1.3 \pm 0.3 \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)高约 60% [23]。Gower [24]等对北方森林生态系统研究表明落叶林的地上净初级生产力总是大于常绿林, 而常绿林地下净初级生产力大于落叶林。张全智等[25]对东北六种温带森林杨桦林、硬阔叶林、红松林、兴安落叶松林、杂木林和蒙古栋林的固碳速率进行了测定, 结果表明六种林型的固碳速率介于 $6.2 \sim 8.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。可见不同森林类型固碳速率差异较大, 针对同一植被分区的所有植被采用同一个固碳速率对森林生态系统测算精度较差。

青海省[25](植被固碳速率为 $1.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 固碳潜力为 $8.50 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$)、甘肃省[26](天然林固碳速率为 $0.79 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 固碳潜力为 $1.92 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$)、吉林省[27](植被固碳速率 $0.92 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、河北省[28](植被固碳速率为 $0.07 \sim 1.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)等省份对区域尺度森林生态系统乔木层碳储量及固碳速率特征(均以植被碳储量变化估算)进行了研究, 相关研究结果见表 1。

Table 1. Characteristics of vegetation carbon storage and carbon sequestration rate [26]-[31]

表 1. 植被碳储量及固碳速率特征[26]-[31]

区域	年份	森林面积 (hm^2)	碳储量 (Tg)	固碳速率 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	方法
青海省	2003~2011	35.78×10^4	27.38	1.06	清查数据 + 样地调查 + 异速生长方程 蓄积 - 生物量回归方程
	2008*	35.78×10^4	11.18		
甘肃省	1996~2011	168.38×10^4	179.04	0.79	清查数据 + 样地调查 + 异速生长方程
吉林省	2009~2014	758.09×10^4	505.76	0.92	清查数据 + 样地调查 + 蓄积 - 生物量回归方程
河北省	2004~2010	220.00×10^4	59.66	0.07~1.87	清查数据 + 样地调查 + 蓄积 - 生物量回归方程 + CBM-CFS3 模型
辽宁省	2005*	533.98×10^4	133.94		清查数据 + 蓄积 - 生物量回归方程 + CBM-CFS3 模型

*只采用一年数据计算碳储量。

各省份森林植被固碳现状与速率的研究也表明不同起源、研究区域、森林结构、林龄的植被碳储量、固碳速率差异较大且规律也不尽相同(表 2、表 3), 导致森林碳储量和碳汇的预测存在较大的不确定性。一方面可能是由于物种自身生物学特性及对生境适应能力的不同, 不同物种组成的森林植被固碳能力存在较大差异; 另一方面可能是由于碳储量和生物多样性之间的协同与权衡, 碳储量和生物多样性之间的关系在全球尺度上是协同的, 但当在一个更小的研究区域时, 生物多样性和碳储量也可能存在权衡关系, 这种协同与权衡的关系进而导致林分尺度固碳速率差异。

Table 2. Effect of stand age on vegetation carbon storage [26]-[29]
表 2. 林龄对植被碳储量影响[26]-[29]

区域	起源	林分龄组	林分组成	区域
青海省		过熟林 > 中龄林 > 成熟林 > 近熟林 > 幼龄林	云冷杉占 50%以上, 柏木林占 20%, 桦树林占 9%杨树林占不到 1%	—
甘肃省	天然林是人工林 4.52 倍	为过熟林 > 成熟林 > 近熟林 > 中龄林 > 幼龄林	天然林中栎类和阔叶混交林最高, 占 30.89%; 人工林刺槐、杨树和云杉人工林为主, 占 50%以上	—
吉林省		幼龄林 > 过熟林 > 近熟林 > 中龄林	阔叶混交林最高, 针阔混交林和蒙古栎林次之, 三者占近 80%	自东向西明显的降低变化
河北省		0~10 > 10~20 > 20~30 > 30~40	阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林	从西北到东南呈升高趋势

Table 3. Factors influencing carbon sequestration rate by stand age [26] [28] [29]
表 3. 林龄对固碳速率影响因素[26] [28] [29]

区域	林分龄组	林分组成	区域
青海省	林随着龄级的上升, 碳密度呈现不断上升的趋势。	柏木林 > 云冷杉林 > 杨树林 > 桦木林 桦树林呈现负增长	
吉林省	过熟林 > 幼龄林 > 近熟林 > 中龄林 > 成熟林	椴树林和胡桃楸林相对较高, 蒙古栎林、红松林、杂木林和臭冷杉林次之, 针叶混交林、樟子松林、云杉林、黄菠萝松林和白桦林呈负增长	整体以南部 > 中部和东部 > 西部, 且西部的白城、松原呈负增长
河北省	幼龄林和中龄林固碳潜力大, 成熟林固碳潜力小	阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林	即从西北向东南呈递增趋势

由表 1~4 可以看出各区域固碳速率研究结果之间相差数倍之多, 森林分布的广泛性、森林生态系统结构的复杂性以及评估数据的代表性和方法学的差异性, 造成森林碳汇评估的结果普遍存在精度低、不确定性高的问题, 对未来固碳潜力的预测结果相差几倍甚至达一个数量级。一方面各类评估数据来源主要来源于森林资源清查、野外样地调查监测数据及文献数值, 不同类型数据对总体代表性具有不确定性, 导致了估算结果的不确定性; 二是不同研究采用异速生长方程、蓄积-生长方程所采用碳含量、生物量扩展因子、林龄界定方法等参数和模型形式的差异导致了估算结果的不确定性; 三是研究数据调查周期不确定性, 比如分别采用第六次、七次、八次清查数据得到的固碳速率也有所偏差。因此, 对森林碳汇的精准评估和未来固碳潜力的准确预测, 必须有一套科学有效的计量方法和评估体系。

Table 4. Characteristics of regional carbon density and carbon sequestration rates under different research methods [27] [29] [31]-[33]
表 4. 不同研究方法下区域碳密度和固碳速率特征[27] [29] [31]-[33]

区域	气候特征	森林类型	林龄	评估年份	碳密度 (TC·hm ⁻²)	固碳速率 (TC·hm ⁻² ·a ⁻¹)	研究方法	估算模型关键参数
河北省	北温带半干旱和湿润季风气候区	阔叶林、针叶林、混交林、经济林、	按照 10a 一个龄级	2004~2010	阔叶林 26.09; 针叶林 26.14 针阔混交林 24.50	0.07~1.87	清查数据 + 样地调查 + 蓄积 - 生物量回归方程 + CBM-CFS3 模型	第 7 次全国森林资源连续清查数据 + 野外调查数据; 生物量采用蓄积 - 干材生物量转换方程和二元材积表; 参考文献选取参数。

续表

河北省	北温带半干旱和湿润季风气候区	阔叶林、针叶林、混交林等	幼、中、近熟、成熟、过熟龄组分类	2013~2018	阔叶林 23.36 针叶林 15.62; 针阔混交林 16.88;	0.31	清查数据 + ICPP 估算公式	第 8、9 次全国森林资源连续清查数据; 碳储量采用 ICPP 估算公式; 参考森林生态系统碳储量计量指南、平原地区造林项目碳汇核算技术规程选取参数
辽宁省	温带大陆性季风气候	针阔叶混交林		2005	2 平均 25.08; 阔叶林 28.99;	3.21	蓄积 - 生物量回归方程 + CBM-CFS3 模型	采用蓄积 - 生物量模型模型及参数采用文献数据
辽宁省	温带大陆性季风气候	针阔叶混交林		2010~2020		1.46	异速生长方程 + 中国森林生态系统固碳模型(FCS)	数据来源于野外实地调查数据; 异速生长方程采用胸径和树高模型; 采用不同树种树高-胸径异速生长方程计算生物量, 同一林型各龄组的加权平均碳密度。碳储量由不同林型各组分碳密度乘以相对应的面积加和。
甘肃省	温带季风气候	亚热带常绿阔林带、暖温带落叶阔叶林带	幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林	1996~2011	179.04	0.79	清查数据 + 样地调查 + 异速生长方程	
甘肃省	温带季风气候	亚热带常绿阔林带、暖温带落叶阔叶林带	幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林	2010~2020		0.30	异速生长方程 + 中国森林生态系统固碳模型(FCS)	数据来源于野外实地调查数据; 异速生长方程采用胸径和树高模型;

固碳速率与区域碳排放的关系

森林碳汇是陆地生态系统中最大的碳库，也是吸收化石燃料造成的碳排放的重要方式。有效发挥森林碳汇碳吸收潜力是实现碳中和目标的关键途径。黄玫等[34]的研究表明，1981 年~2020 年云南省森林生态系统固碳速率 $0.73\text{TC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\sim 1.16\text{TC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间，碳汇量 $8.40\sim 29.29\text{TC}\cdot\text{a}^{-1}$ ，贡献云南省 85% 的碳汇量；1981 年~2020 年云南省碳排放 $5.38\text{TC}\cdot\text{a}^{-1}\sim 57.00\text{TC}\cdot\text{a}^{-1}$ ，年均增长率达 6.08%；随着社会经济发展碳排放量增加，森林生态系统碳中和贡献指数由 156% 下降到 51.39%。河北省 2000~2005 年、2005~2010 年、2010~2015 年和 2015~2020 年期间净碳排放增加速度分别为 0.83、0.72、0.20、0.17 $\text{TC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，呈现增速放缓趋势[35]。我国实施退耕还林、天然林保护、山水林田湖草沙一体化、生态保护与修复工程等一系列重要举措，大幅提高森林生态系统碳汇。但面对碳排放量仍需要继续提升生态系统碳汇增量，强化森林资源保护、提升森林质量。由于森林生态固碳速率估算存在一系列的不确定性，且目前的石化燃料碳排放量估算不区分品类多采用一个总的系数估算对碳排放估算也具有不确定，可能低估或高估森林生态系统碳中和能力，针对区域碳汇贡献指数的估算仍具有一定的不确定性，有待建立健全相关科学

技术评价体系。

3. 黑龙江省森林生态系统碳汇功能

3.1. 黑龙江省森林特征

黑龙江省地处我国东北部,北自漠河,东起黑龙江与乌苏里江汇合点。南北相距跨越纬度达 10° 以上,东西相距跨越经度达 13° 以上,故水热条件不一致,影响植物组成与植被类型,黑龙江省森林植被区划分为 3 个植物区和 3 个亚区,3 个植物区分别是大兴安岭植物区、小兴安岭-老爷岭植物区、松嫩平原植物区。

大兴安岭植物区按照垂直分布规律,地带性顶级群落包括藓类-兴安落叶松林、杜鹃-兴安落叶松林、蒙古栎-兴安落叶松林,及经火干扰后形成次生白桦林、次生蒙古栎林以及落叶松人工林等。

小兴安岭-张广才岭亚区按自然地理分区进一步划分为小兴安岭地区、张广才岭地区。在各区域地带性顶级群落包括阔叶红松混交林、云冷杉红松林以及云冷杉天然林,以及干扰后形成次生针阔混交林、次生阔叶混交林、次生白桦林、次生山杨林、次生蒙古栎林,红松人工林、落叶松人工林、云杉人工林、樟子松人工林等。老爷岭亚区地带性顶级群落为红松、沙冷杉阔叶混交林,以及干扰后形成次生阔叶混交林、次生栎树林、次生山杨林,落叶松人工林等。穆棱-三江平原亚区地带性顶级群落为阔叶红松混交林,及干扰后形成落叶松人工林、蒙古栎林、杂木林等。

3.2. 森林生态系统碳汇功能

在大小兴安岭地区,包括落叶松、樟子松、红松等人工林,阔叶红松林、云冷杉林等原始林,以及白桦、蒙古栎、山杨等天然次生林。其中人工林碳储量落叶松林、樟子松林、红松林分别为 $74.45\sim130.455\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [36] [37]、 $29.89\sim117.08\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [38]、 $31.40\sim130.20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [39]; 原始阔叶红松林和云冷杉林碳储量分别为 $101.42\sim214.60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [40]、 $23.10\sim130.30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [39]; 天然次生白桦林、蒙古栎林和山杨林碳储量分别为 $18.8\sim88.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $11.17\sim68.90\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $21.81\sim64.39\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [39] [40]。其中,地带性顶级群落阔叶红松林碳储量分别是落叶松人工林、樟子松人工林、红松人工林的 1.36~1.64 倍、1.83~3.51 倍、1.65~3.23 倍,分别是白桦次生林、蒙古栎次生林和山杨次生林的 2.42~6.60 倍、3.11~9.08 倍、3.33~4.65 倍。

3.3. 黑龙江省森林生态系统碳固碳速率研究

研究主要集中在小兴安岭主要包括长白落叶松人工林和红松人工林、阔叶红松原始林和云冷杉原始林林以及白桦次生林和山杨次生林等林型,其固碳速率依次分别约为 $3.479\text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $5.70\text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $3.61\sim5.72\text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $4.69\text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $6.03\text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $3.67\text{ tC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ [40]-[42]。

3.4. 黑龙江省森林生态系统碳储量、固碳速率影响因素

相同林型在不同地域间碳储量存在差别,如白桦次生林碳储量大小兴安岭分别为 $38.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $52.31\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相差 1.38 倍; 蒙古栎次生林碳储量大小兴安岭分别为 $29.38\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40.35\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相差 1.37 倍 [38] [39]。

由于自然干扰或人为干扰,我省大面积地带性顶级植被原始阔叶红松林退化形成天然次生林,在旱生条件下形成蒙古栎林-阔叶混交林(以蒙古栎、黑桦等为优势树种)-针阔混交林(以红松、蒙古栎、黑桦等为优势树种),在中生条件下形成枫桦林-阔叶混交林(以枫桦、椴树等为优势树种)-针阔混交林(以红松、枫桦、椴树等为优势树种),在湿生条件下形成杨桦林-阔叶混交林(以山杨、白桦等为优势树种)-云冷杉林。这些天然次生林群落由于缺失大量关键建群树种和珍贵树种,在林地生产力、林分质量等方

面与原始林存在明显的差异,导致森林无法发挥其碳汇功能。如天然林中云杉和蒙古栎种群在幼、中龄级中表现出衰退迹象,特别是蒙古栎种群,大量蒙古栎存在萌发生长,郁闭后完全依靠自然稀疏自然更新差、生产力较低、干材形质较差,生态功能退化,在我省小兴安岭区域的研究表明蒙古栎次生林碳储量仅为原始阔叶红松林的 1/3~1/9 [40] [41]。桦树林在成熟林阶段甚至成为碳源[28]。

人工林以落叶松、红松、樟子松为主。大兴安岭植物区人工林主要以樟子松为主,小兴安岭-老爷岭植物区、松嫩平原植物区人工林主要以落叶松、红松为主,各区域绝大多数的落叶松人工林属于中幼龄,长期的纯林经营导致林分结构简单、稳定性差、生物多样性低、生产力低下等问题,病虫害也频繁发生,无法有效发挥其生态功能。林龄、区域、林分类型都是影响森林植被碳储量和分布格局的重要因素,对我省森林固碳研究主要集中在大小兴安岭碳储量及其变化研究,对固碳速率的估算多采用森林资源清查数据在全省尺度上进行估算并预测碳汇潜力[42],而从大兴安岭(以漠河为例,年平均气温-5.5℃,年平均降水量 460.8 mm)、小兴安岭(以伊春为例,年平均气温 1℃,年平均降水量 750~820 mm)到东部山区(以牡丹江为例,年平均气温 4.3℃,年平均降水量 460.8 mm)气候条件相差较大,各区碳储量、固碳速率差异较大,不分区以全省森林资源清查数据拟合主要森林类型固碳速率-林龄曲线显然误差较大。

4. 研究展望

我国气候带跨越热带至寒温带,涵盖从湿润至干旱各个气候区,森林生态系统类型复杂多样,导致植被和土壤碳积累过程呈现区域性差异,加之研究方法不同,造成估算结果存在较大误差。因此,方法同一化、时间同步化地估测区域尺度森林生态系统碳汇及分配特征是探明我国森林碳汇现状的先决条件。

黑龙江省丰富的森林资源、巨大的固碳潜力决定了其在增加森林固碳、减缓温室效应等方面发挥着至关重要的作用。首先,碳汇功能与固碳潜力评估关键参数(植被固碳速率、生态系统呼吸等)的缺失,导致针对黑龙江省森林生态系碳汇功能尚不明确,要发挥其在“碳达峰、碳中和”中的重要作用,亟需精准针对不同起源、年龄序列、林分类型、立地条件评估其森林生态系统碳汇功能与固碳潜力。其次,林地和草地空间上扩张潜力有限,应从“植树种草”转变为“提高林草碳汇能力”,从数量到管理转变。在制定全省“双碳”工作路线,要考虑区域的碳汇和碳排放不平衡格局,客观分析各县(市、区)其碳排放和碳汇增长潜力实际情况。此外,森林分布的广泛性、森林生态系统结构的复杂性以及评估数据的代表性和方法学的差异性,造成森林碳汇评估的结果普遍存在精度低、不确定性高的问题,对未来固碳潜力的预测结果相差几倍甚至达一个数量级。因此,对森林碳汇的精准评估和未来固碳潜力的准确预测,亟需结合遥感、样地调查等方法系统研究森林生态系统固碳速率时空差异特征获取关键参数,构建科学有效的计量方法和评估体系。经过多年来我国在黑龙江省实施重大生态修复工程,黑龙江省森林生态质量得以大幅提升,但仍存在部分次生林、人工林林分质量较低,结构不合理,碳汇功能不稳定等问题,亟需通过现有林分碳汇功能分析,协调森林碳汇功能与树种多样性及林分结构关系,构建森林生态系统碳汇功能维持/提升的技术方法,进一步发挥森林生态系统在碳中和目标中的作用。

基金项目

黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2025-1-B035、CZKYF2021-2-C006);黑龙江省重点研发项目(GA21C030);中央财政推广项目(黑[2023] TG29 号)。

参考文献

- [1] 陈雅如, 赵金成. 碳达峰、碳中和目标下全球气候治理新格局与林草发展机遇[J]. 世界林业研究, 2021, 34(6): 1-5.
- [2] Corinne, L.Q., Robbie, M., Josep, G., *et al.* (2016) Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8, 605-649.

- [3] Piao, S., Fang, J., Ciais, P., Peylin, P., Huang, Y., Sitch, S., *et al.* (2009) The Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems in China. *Nature*, **458**, 1009-1013. <https://doi.org/10.1038/nature07944>
- [4] Jiang, F., Wang, H.W., Chen, J.M., Zhou, L.X., Ju, W.M., Ding, A.J., *et al.* (2013) Nested Atmospheric Inversion for the Terrestrial Carbon Sources and Sinks in China. *Biogeosciences*, **10**, 5311-5324. <https://doi.org/10.5194/bg-10-5311-2013>
- [5] Wang, J., Feng, L., Palmer, P.I., Liu, Y., Fang, S., Bösch, H., *et al.* (2020) Large Chinese Land Carbon Sink Estimated from Atmospheric Carbon Dioxide Data. *Nature*, **586**, 720-723. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2849-9>
- [6] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [7] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 等. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5093-5105.
- [8] Adams, A.B., Pontius, J., Galford, G.L., Merrill, S.C. and Gudex-Cross, D. (2018) Modeling Carbon Storage across a Heterogeneous Mixed Temperate Forest: The Influence of Forest Type Specificity on Regional-Scale Carbon Storage Estimates. *Landscape Ecology*, **33**, 641-658. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0625-0>
- [9] Wu, S., Li, J., Zhou, W., Lewis, B.J., Yu, D., Zhou, L., *et al.* (2018) A Statistical Analysis of Spatiotemporal Variations and Determinant Factors of Forest Carbon Storage under China's Natural Forest Protection Program. *Journal of Forestry Research*, **29**, 415-424. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0462-z>
- [10] 巫明焱, 董光, 王艺积, 等. 川西米亚罗自然保护区森林地上碳储量遥感估算[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 621-628.
- [11] 徐凯健, 曾宏达, 朱小波, 等. 基于五种大气校正的多时相森林碳储量遥感反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3493-3498.
- [12] Knapp, N., Fischer, R., Cazcarra-Bes, V. and Huth, A. (2020) Structure Metrics to Generalize Biomass Estimation from Lidar across Forest Types from Different Continents. *Remote Sensing of Environment*, **237**, Article 111597. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111597>
- [13] 马学威, 熊康宁, 张俞. 森林生态系统碳储量研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 62-67.
- [14] Nabuurs, G.J., Thürig, E., Heidema, N., Armolaitis, K., Biber, P., Cienciala, E., *et al.* (2008) Hotspots of the European Forests Carbon Cycle. *Forest Ecology and Management*, **256**, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.009>
- [15] Tong, X., Brandt, M., Yue, Y., Ciais, P., Rudbeck Jepsen, M., Penuelas, J., *et al.* (2020) Forest Management in Southern China Generates Short Term Extensive Carbon Sequestration. *Nature Communications*, **11**, Article No. 129. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13798-8>
- [16] 陈科屹, 张会儒, 张博, 等. 基于地理加权回归拓展模型天然次生林碳储量空间分布[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1175-1183.
- [17] 廖国莉, 段劼, 贾忠奎. 辽东地区不同林龄长白落叶松人工林生态系统碳储量分配特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 8-13.
- [18] 李宸宇, 朱建华, 张峰, 等. 基于 NbS 的北京市乔木林固碳能力分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13-22.
- [19] 张煜星, 王雪军, 蒲莹, 等. 1949-2018 年中国森林资源碳储量变化研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1-14.
- [20] Fang, J., Chen, A., Peng, C., Zhao, S. and Ci, L. (2001) Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**, 2320-2322. <https://doi.org/10.1126/science.1058629>
- [21] Zhao, J., Ma, J., Hou, M. and Li, S. (2019) Spatial-Temporal Variations of Carbon Storage of the Global Forest Ecosystem under Future Climate Change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **25**, 603-624. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09882-5>
- [22] Susan, C.C., Sara, M.L., David, G., *et al.* (2020) Mapping Carbon Accumulation Potential from Global Natural Forest Regrowth. *Nature*, **585**, 545-550.
- [23] Heinrich, V.H.A., Dalagnol, R., Cassol, H.L.G., Rosan, T.M., de Almeida, C.T., Silva Junior, C.H.L., *et al.* (2021) Large Carbon Sink Potential of Secondary Forests in the Brazilian Amazon to Mitigate Climate Change. *Nature Communications*, **12**, Article No. 1785. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>
- [24] Gower, S.T., Krankina, O., Olson, R.J., Apps, M., Linder, S. and Wang, C. (2001) Net Primary Production and Carbon Allocation Patterns of Boreal Forest Ecosystems. *Ecological Applications*, **11**, 1395-1411. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1395:nppaca\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1395:nppaca]2.0.co;2)
- [25] 张全智. 东北六种温带森林碳密度和固碳能力[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [26] 陈科宇, 字洪标, 阿的鲁骥, 等. 青海省森林乔木层碳储量现状及固碳潜力[J]. 植物生态学报, 2018, 42(8): 831-840.
- [27] 关晋宏, 杜盛, 程积民, 等. 甘肃省森林碳储量现状与固碳速率[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 304-317.

-
- [28] 范春楠, 韩士杰, 郭忠玲, 等. 吉林省森林植被固碳现状与速率[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 341-353.
- [29] 张滨, 张丽娜, 刘秀萍, 等. 河北省北部森林植被碳储量和固碳速率研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 392-402.
- [30] 胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 青海省森林生态系统植被固碳现状研究[J]. 西南农业学报, 2015, 28(2): 826-832.
- [31] 甄伟, 黄玫, 翟印礼, 等. 辽宁省森林植被碳储量和固碳速率变化[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1259-1265.
- [32] 周志峰, 王耀, 贾刚, 等. 河北省乔木林碳储量现状与固碳潜力预测[J]. 林业资源管理, 2022, 4(2): 45-53.
- [33] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [34] 黄玫, 石岳, 孙文娟, 等. 云南省生态系统碳汇及其对碳中和的贡献[J]. 植物生态学报, 2024, 48(10): 1243-1255.
- [35] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 碳中和目标下河北省土地利用碳排放格局演变与多情景模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 261-270.
- [36] 王霓虹, 高萌, 李丹. 长白落叶松人工林乔木层生物量分布特征及其固碳能力研究[J]. 植物研究, 2014, 34(4): 554-560.
- [37] 马炜. 长白落叶松人工林生态系统碳密度测定与预估[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [38] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 大兴安岭 5 种典型林型森林生物碳储量[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5745-5760.
- [39] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 140-158.
- [40] 蔡慧颖. 小兴安岭典型森林生态系统的碳储量与生产力[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [41] 闫平, 冯晓川. 原始阔叶红松林碳素储量及空间分布[J]. 东北林业大学学报, 2006(5): 23-25.
- [42] 任继勤, 夏景阳. 基于碳密度-林龄关系的黑龙江省森林碳汇潜力预测[J]. 环境科学研究, 2017, 30(4): 552-558.