

黑龙江山林场森林生态系统碳储量、 碳密度及碳汇增加途径

赵忠宝^{1,2}, 李宏志³, 王海民⁴, 马珍珍⁴, 董晓盛⁴, 郭建军³

[1. 河北环境工程学院 生态学系, 河北 秦皇岛 066102;

2. 河北省农业生态安全重点实验室, 河北 秦皇岛 066102; 3. 张家口市塞北林场
(市国有林场管理处), 河北 张家口 075000; 4. 张家口市黑龙江山林场, 河北 赤城县 075599]

摘要: [目的] 量化黑龙江山林场森林生态系统的碳储量与碳密度格局, 提出增汇优化路径, 为区域森林碳汇潜力评估提供数据支撑。 [方法] 以样地调查和室内测定数据为基础, 结合乔木生物量模型, 利用 GIS 技术, 研究河北省黑龙江山林场森林生态系统碳储量、碳密度的分布特征及其增汇途径。 [结果] ① 黑龙江山林场森林生态系统总碳储量为 1.87×10^6 t, 平均碳密度为 173.57 t/hm², 碳密度大小顺序为: 土壤层 > 乔灌层 > 腐殖质层 > 枯落物层 > 林下灌木层 > 林下草本层。碳储量分配特征大小顺序与碳密度一致, 土壤碳库最大, 占总碳储量的 66.30%。 ② 乔木林总碳储量为 5.44×10^5 t, 平均碳密度为 56.72 t/hm²。白桦林和榆林是乔木林分碳储量的主体, 占乔木林分总碳储量的 84.36%, 并以中、幼龄林为主, 具有较大的增汇空间和潜力。 ③ 海拔、坡度、坡向影响水热、土壤、人类干扰等因素的分配, 对黑龙江山林场森林生态系统碳储量、碳密度的空间分布有显著影响。 [结论] 未来黑龙江山林场森林具有较大的增汇空间和潜力; 加强森林抚育、预防火灾、控制森林病虫害、保护森林土壤等措施提升森林质量, 减少碳排放, 是黑龙江山林场森林增汇的有效途径。

关键词: 碳储量; 碳密度; 增汇途径; 黑龙江山林场

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0144-11

中图分类号: S718.55

文献参数: 赵忠宝, 李宏志, 王海民, 等. 黑龙江山林场森林生态系统碳储量、碳密度及碳汇增加途径[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 144-154. Zhao Zhongbao, Li Hongzhi, Wang Haimin, et al. Forest carbon storage, carbon density and increasing carbon sink pathways at Heilongshan forest farm [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 144-154. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.012; CSTR: 32312.14. stbctb. 2025.05.012.

Forest carbon storage, carbon density and increasing carbon sink pathways at Heilongshan forest farm

Zhao Zhongbao^{1,2}, Li Hongzhi³, Wang Haimin⁴, Ma zhenzhen⁴, Dong Xiaosheng⁴, Guo Jianjun³

[1. Department of Ecology, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao,

Hebei 066102, China; 2. Hebei Key Laboratory of Agro-ecological Safety, Qinhuangdao, Hebei

066102, China; 3. Saibei Forest Farm (State-owned Forest Farm Management Office), Zhangjiakou,

Hebei 075000, China; 4. Zhangjiakou Heilongshan Forest Farm, Chicheng County, Hebei 075599, China]

Abstract: [Objective] The carbon storage and density patterns at the Heilongshan forest farm ecosystem were quantify analyzed, and effective carbon sequestration enhancement strategies were put forward, to provide critical data for assessing regional forest carbon sink potential. [Methods] Based on field investigations and laboratory analysis, combined with biomass models of trees and forest resource data and using GIS technology, the distribution characteristics of carbon storage and carbon density of main forest types at Heilongshan forest farm were studied and pathways for increasing carbon sequestration were proposed. [Results] ① The total carbon

收稿日期: 2025-01-09

修回日期: 2025-06-11

采用日期: 2025-06-12

资助项目: 河北省科技厅重点研发计划项目碳达峰、碳中和创新专项“基于全口径的河北省森林生态系统碳储量、碳汇潜力与增汇途径研究”(22374208D)

第一作者: 赵忠宝(1980—), 男(汉族), 河南省滑县人, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学、森林碳汇等方面的研究。Email: zhaozhongbao@hebuee.edu.cn.

storage and average carbon density of the forest ecosystem was 1.87×10^6 t and 173.57 t/hm², respectively. The average carbon density was in the following order: soil layer > tree and shrub layer > humus layer > litter layer > understory shrub layer > understory herbaceous layer. The allocation characteristics of carbon storage were consistent with carbon density. Soil carbon storage was the highest, accounting for 66.30% of the total carbon storage. ② The total carbon storage and carbon density of the arbor forests were 5.44×10^5 t and 56.72 t/hm², respectively. *Betula platyphylla* and *Ulmus pumila* forests were the major sources of carbon storage in the arbor forests, accounting for 84.36% of the arbor forests carbon storage. They are mainly composed of middle-aged and young forests with great potential for carbon sequestration. ③ Altitude, slope, and aspect regulated the spatial distribution of factors, such as water and heat, soil, and human interference, which had a significant impact on the spatial allocation of forest ecosystem carbon storage and carbon density. [Conclusion] In the future, the forests of Heilongshan forest farm have great carbon sequestration capacity and potential. Strengthening forest nurturing, preventing fires, controlling forest pests and diseases, protecting forest soil and other measures to improve forest quality and reduce carbon emissions are effective ways to increase forest sinks in Heilongshan forest farm.

Keywords: carbon storage; carbon density; increasing carbon sink pathways; Heilongshan forest farm

当前全球气候变暖已成为人类共识,而其带来的危害已经严重威胁到自然生态系统的平衡以及人类社会的可持续发展^[1]。在应对全球气候变暖的措施中,森林碳汇被公认为最经济、最安全、最有效的固碳增汇手段之一,已成为世界各国实现碳达峰、碳中和目标的重要路径^[2]。世界各国学者也因此开展了大量的有关森林生态系统碳储量与碳汇的研究,有关森林碳储量研究方法较多,主要有样地清查法^[3]、IPCC法^[4]、转换因子连续函数法^[5]、异速生物量模型^[6]、遥感法^[7]、模型模拟法^[8]、综合法等^[4,9],以上估算方法适用于不同研究对象和数据特征,在不同空间尺度应用中结果差异较大。中国学者利用不同技术手段和方法,多聚焦于自上而下的国家^[5,10]、省^[9]、市^[11]尺度下森林碳储量研究,并取得大量研究成果,为中国参与全球气候谈判以及编制林业国家自主贡献提供了重要支撑。然而,由于森林资源具有区域性、多样性等特点,再加上评估方法的复杂性,目前大尺度下已有评估结果仍存在精度低、不确定性高等问题^[12],并且已有研究以碳储量、碳密度评估为主,而对增汇途径的报道较少。

国有林场是区域森林资源最集中的区域,也是区域森林碳汇的主要供给者、生产者,在维护区域生态平衡、构建国家生态安全格局及减缓气候变化中发挥着重要作用。国有林场是一个区域森林资源的集中体现,从国有林场小尺度评估森林碳储量、碳密度更有利于降低评估结果精度低、不确定性高等问题^[13]。开展林场级尺度下森林碳储量、碳密度的研究可为大尺度下开展森林碳储量、碳密度的研究提供精确的数据支撑。因此,本研究以张家口市黑龙江林场为研究对象,基于2023年森林资源数据,采用

样地清查法,结合乔木树种异速生物量模型和GIS技术,评估黑龙江林场森林生态系统碳储量、碳密度,在评估的基础上提出森林增汇的途径,旨在为黑龙江林场提供森林碳汇基础数据,为全面评估河北省森林系统碳储量与碳汇潜力提供数据支撑和参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与林分类型特征

黑龙江林场位于河北省张家口市赤城县东北部,地理坐标为东经 $116^{\circ}00'26''$ — $116^{\circ}12'21''$,北纬 $41^{\circ}15'43''$ — $41^{\circ}23'27''$ 。地处蒙古高原与华北平原的过渡地带,位于燕山山脉的西段,地质构造复杂,地势北高南低,海拔 $1\ 267\sim 2\ 300$ m(图1)。属东亚大陆性季风气候,四季分明。冬季寒冷,夏季凉爽,昼夜温差大。年平均气温为 6.3 °C,平均年降水量为 563 mm,平均无霜期 124 d。黑龙江林场总经营面积为 $12\ 648.39$ hm²,其中林地面积 $10\ 758.15$ hm²,非林地面积 $1\ 890.25$ hm²。林地中乔木林地面积 $9\ 586.02$ hm²,灌杂林地面积 $1\ 170.28$ hm²(图2),森林覆盖率为 83.8% 。林场所在地区属华北植物区系,高等植物有 754 种,其中木本植物 158 种,草本植物 596 种,植被垂直分布明显,自上而下大致可分亚高山草甸、灌丛、矮林、落叶阔叶林、针叶林5个植被类型。主要针叶乔木树种有落叶松(*Larix gmelinii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、桦树(*Betula*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、榆(*Ulmus pumila* L.)等;主要灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、榛(*Corylus heterophylla*)以及接骨木(*Sambucus williamsii*)等,具体林分特征详见表1。

草本植物主要有风毛菊(*Saussurea japonica*)、蒿(*Artemisia L.*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)等。

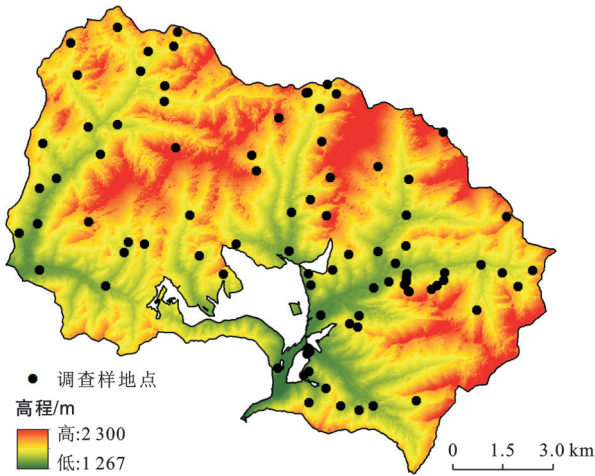


图1 黑龙江林场高程和样地点分布

Fig.1 Elevation and survey sample distribution at Heilongshan forest farm

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与数据收集

本研究共调查样地 85 个(图 1),其中乔木林样地 75 个,面积大小为 25.8 m×25.8 m,灌木林样地 10 个,面积大小为 5 m×5 m,包含黑龙江林场所有植被和林龄类型,样地调查时间 2023 年 7—9 月。在乔木林样地每个角顶点向内布设 1 个 5 m×5 m 的灌木样方,在灌木样方内布设一个 1 m×1 m 样方。在每个

灌木林样地对角线上设置 3 个 1 m×1 m 样方。其他数据来源 2023 年黑龙江林场森林资源数据,主要包括森林资源面积、林种、优势树种、林龄、蓄积量等。

1.2.2 森林植被各层生物量和碳储量计算

(1) 调查样地乔木层生物量和碳储量计算。对乔木林样地所有胸径≥5 cm 的林木(不包括枯立木)进行每木检尺,记录乔木胸径和树高。筛选出适合研究区单木生物量模型方程(表 2),计算调查样地乔木层生物量。样地乔木层生物量乘以其树种的含碳率即为样地碳储量。

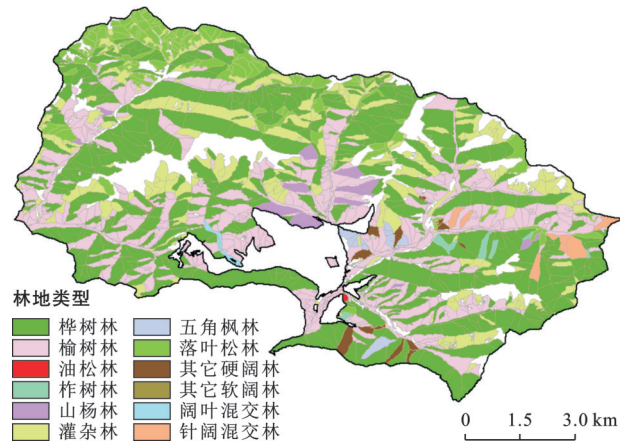


图2 黑龙江林场优势树种分布

Fig.2 Distribution of advantageous tree species at Heilongshan forest farm

表 1 黑龙江林场主要林分类型基本特征

Table 1 Basic characters of main forest stands at Heilongshan forest farm

优势树种	面积/hm ²	密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	平均树高/m	占总面积比例/%
桦树(白桦、黑桦)	5 490.77	450~2 310	15.42	7.17	51.04
榆树(山榆、榆)	2 600.94	270~1 905	7.54	6.83	24.18
落叶松	890.24	660~2 610	14.91	7.67	8.28
山杨	194.83	855~2 970	11.35	6.43	1.81
硬阔类(水曲柳、核桃楸、白蜡、刺槐等)	118.03	850~2 280	7.29	4.36	1.10
蒙古栎	57.17	870~1 890	13.54	6.44	0.53
五角枫	87.07	1 005~1 245	9.9	5.01	0.81
油松	3.28	652~759	25	9	0.03
软阔类(椴树、柳树等)	5.63	700~975	6.9	4.9	0.05
针阔混交林	114.87	1 005~2 325	16.49	6.41	1.07
阔叶混交林	25.04	7 000~945	13.6	6.20	0.23
灌杂林	1 170.28	300~400	—	1.27	10.88

(2) 灌木层、草本层、枯落物层、腐殖质层生物量和碳储量计算。在样方内按灌木层、草本层、枯落物层、腐殖质层分层取样,灌木层灌木较多时选取标准木取样、称重,灌木较少时采用全部收获法取样、称

重;草本层、枯落物层、腐殖质层采用全部收获法取样、称重^[14]。并选取灌木(茎、枝、叶、根)、草本、枯落物、腐殖质各 100~300 g 样品,称重。把样品放入鼓风干燥箱 85 °C 烘干至恒重,计算样方、样地生物量。

灌木林(灌丛)取样、样品测定同于灌木层。样地和样方生物量分别乘以相应的含碳率为其碳储量。

(3) 乔木、灌木、草本、枯落物含碳率参考文献[15]中规定的值,腐殖质含碳率测定参考文献[16]中的方法。

(4) 森林植被各层碳储量计算:样地碳储量除以其面积为样地碳密度。不同林龄、不同林分类型各层样地平均碳密度乘以其林分面积为森林植被各层碳储量。

表 2 主要研究林分单木生物量模型

Table 2 Biomass model of individual trees in main studied forest stands

优势树种	生物量方程	来源文献
落叶松	$W_{总}=0.073\ 02D^{2.472\ 98}+0.028\ 29D^{2.364\ 03}$	[17]
榆树	$W_{总}=0.185\ 3D^{2.175\ 2}+0.071\ 9D^{2.140\ 1}$	[17]
桦树	$W_{总}=0.111\ 46D^{2.429\ 83}+0.050\ 84D^{2.249\ 04}$	[17]
山杨	$W_{总}=0.685\ 8D^{1.913\ 8}$	[18]
五角枫	$W_{总}=1.939\ 4D^{1.648\ 3}$	[18]
杂木	$W_{总}=10^{1.930+2.535\times\lg D}/1\ 000+0.256(10^{1.930+2.535\times\lg D}/1\ 000)$	[19]
蒙古栎(栎类、硬阔类)	$W_{总}=0.093\ 93D^{2.546\ 08}+0.052\ 09D^{2.301\ 30}$	[17]
油松	$W_{总}=0.086\ 11D^{2.461\ 57}+0.010\ 93D^{2.664\ 78}$	[17]
软阔类	$W_{总}=0.241\ 1D^{2.046}$	[17]

注:W_总为优势树种总生物量(包括地上和地下生物量);D为优势树种胸径。

1.2.3 土壤层碳储量计算

在样地内沿对角线均匀设置 3 个土壤剖面,去除覆盖上面的枯落物后,每个土壤剖面按照 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm 从上至下分 4 层取样,分层深度不足的样地据实分层。在每层用环刀法取原状土,带回实验室测土壤含水率和容重。同时,各层自下而上取鲜土 200~300 g,将样地各剖面同一土层的样品混合,采用四分法取样品约 250 g 带回实验室风干、磨碎、过筛用于土壤有机质测定,同时测定 2 mm 以上石砾含量和体积。土壤有机质测定参考文献[20]中的方法。

土壤层有机碳密度和碳储量估算参照文献[15]中的方法,计算公式为:

$$SOC_i = \sum_{j=1}^n 0.58 \times C_j \times D_j \times E_j \times \frac{(1 - G_j)}{100} \quad (1)$$

式中:SOC_i为第 i 种林分土壤各层有机碳密度之和(kg/m²);C_{ij}为第 i 种林分第 j 层土壤有机质含量(g/kg);D_{ij}为第 i 种林分第 j 层土壤的容重(g/cm³);E_{ij}第 i 种林分第 j 层土壤的厚度(m);G_{ij}第 i 种林分第 j 层直径≥2 mm 的石砾所占体积百分比(%)。

$$TOC_i = \sum_{i=1}^n 10 \times A_i \times SOC_i \quad (2)$$

式中:TOC_i为第 i 种林分土壤各层有机碳储量之和(t);A_i为第 i 种林分面积(hm²)。

1.2.4 森林生态系统碳储量空间分布

研究区域 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),经 ArcGIS 10.8 软件提取

DEM 数据得到坡度、坡向空间信息数据,与林场碳密度矢量数据进行叠加、统计得到不同高程、坡度、坡向森林生态系统碳储量、碳密度。

2 结果与分析

2.1 黑龙江林场不同林分类型碳储量与碳密度分析

黑龙江林场乔木林总碳储量 5.44×10⁵ t,平均碳密度 56.72 t/hm²。灌杂林总碳储量 4 014.06 t,平均碳密度为 3.43 t/hm²(表 3)。乔木不同林分碳储量在 67.84~342 624.05 t,其大小顺序为:桦树>榆树>落叶松>针阔混交林>蒙古栎>五角枫>山杨>阔叶混交林>硬阔类>油松>软阔类,不同林分碳储量差异的主要原因与乔木林的面积大小有关。在阔叶林中,桦树、榆树林碳储量分别占乔木林总碳储量的 63.00% 和 21.36%,二者是黑龙江林场乔木林碳储量的主体,并且二者大部分处于中、幼龄林阶段,生长旺盛,具有很大的碳汇潜力。针叶林中,落叶松林碳储量最大,占乔木林总碳储量的 10.96%,大部分已处于近成熟林阶段,碳汇能力处于最强时期。①不同乔木林分碳密度在 12.05~115.20 t/hm²(表 3),其大小顺序为:油松>针阔混交林>阔叶混交林>蒙古栎>落叶松>桦树>榆树>五角枫>山杨>硬阔类>软阔类。油松林碳密度最大,主要因为油松处于成熟林阶段,单位面积蓄积量和生物量高。其次是针阔混交林和阔叶混交林,由于混交林植被结构的复杂性和多样性,提供了丰富的生态位,其单位面积生物量相对较大。而软阔类碳密度最小,主要原因

是软阔类林相差,树高和胸径较小,单位面积生物量相对较低。②乔木林不同林龄碳储量在 46 645.21~286 159.11 t 之间(图 3),其大小顺序为中龄林>近熟林>幼龄林>成熟林。中龄林碳储量最大,主要原因是其面积和蓄积最大,分别占乔木林总面积和总蓄积的 46.91% 和 55.93%。而不同林龄乔木林碳密度大小顺序为:成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,这表明随着林龄的增长,树木的生物量不断增加,从而导致碳密度增加。从林龄来看,黑龙江山林场乔木林以中、幼龄林为主,二者面积占乔木林面积的 80.96%,未来森林碳汇潜力较大。

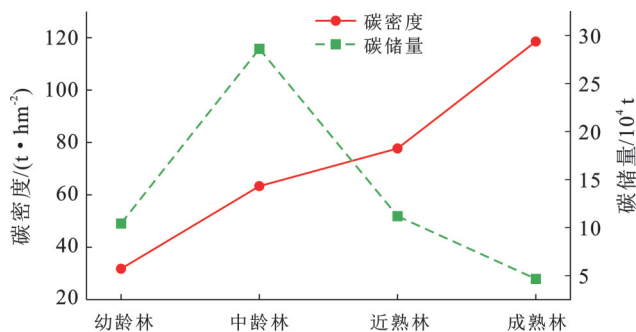


图 3 黑龙江山林场不同林龄碳储量与碳密度

Fig.3 Carbon storage and carbon density of different forest ages at Heilongshan forest farm

表 3 黑龙江山林场主要林分碳储量与碳密度

Table 3 Carbon storage and carbon density of main forest stands at Heilongshan forest farm

优势树种	面积/hm ²	平均碳密度/(t·hm ⁻²)	碳储量/t	占总碳储量比例/%
桦树	5 490.77	62.40	342 624.05	62.54
榆树	2 600.94	44.66	116 157.98	21.20
落叶松	890.24	66.93	59 583.76	10.88
山杨	194.83	17.09	3 329.64	0.61
硬阔类	118.03	15.39	1 816.48	0.33
蒙古栎	57.17	72.10	4 121.96	0.75
五角枫	87.07	40.17	3 497.60	0.64
油松	3.28	115.20	377.86	0.07
软阔类	5.63	12.05	67.84	0.01
针阔混交林	114.87	87.76	10 080.99	1.84
阔叶混交林	25.04	86.78	2 172.97	0.40
灌杂林	1 170.28	3.43	4 014.06	0.73
合计	10 758.15	52.00	547 845.19	100

2.2 林下灌木、草本、枯落物和腐殖质层碳密度与碳储量分析

从表 4 可知,无论是林下灌、草、枯落物还是腐殖质层碳密度,不同林分之间具有一定的差异。腐殖质

层、枯落物层碳密度相对较高,林下灌木层次之,林下草本层最小。林下灌木层碳密度在 0.87~2.12 t/hm²,平均为 1.31 t/hm²,总碳储量为 13 780.44 t。草本层碳密度在 0.06~0.29 t/hm²,平均为 0.17 t/hm²,总碳储量为 2 060.64 t。枯落物层碳密度在 0.62~2.89 t/hm²,平均碳密度为 1.53 t/hm²,总碳储量为 16 639.61 t。腐殖质层碳密度在 1.93~5.93 t/hm²,平均碳密度为 3.89 t/hm²,总碳储量为 48 990.18 t。林下灌木、草本、枯落物和腐殖质层总碳储量为 81 470.87 t。造成不同林分林下灌木、草本、枯落物和腐殖质层碳储量、碳密度大小差异的主要原因与林分面积、林种、林分结构、郁闭度、坡度、坡向以及人畜干扰等因素密切相关。郁闭度大的近成熟林、成熟林林下灌草稀少,碳密度相对较低。而人为干扰严重的中、幼龄林林分林下灌草盖度相对较低,碳密度也相对较低。处于阳坡和坡度陡的林分林下枯落物层相对较薄,而阴坡和坡度较缓的林分枯落物层相对较厚,碳密度较高。针叶林树种林下枯落物分解相对缓慢,枯落物碳密度相对较高。

2.3 黑龙江山林场土壤层碳储量与碳密度分析

黑龙江山林场不同林分土壤层平均有机碳含量 7.46~68.80 g/kg,桦树林各层有机碳含量明显高于其他林分。各林分土壤层有机碳含量均在 0—10 cm 层最大,并随土层深度的增加呈现减少趋势。距地表深度 0—10,10—20,20—30,30—50 cm 土层的平均有机碳含量分别 44.99,29.01,19.67,11.09 g/kg。方差分析显示,大部分林分的土壤(0—10,10—20,20—30,30—50 cm)有机碳含量差异显著($p < 0.05$) (表 5)。造成各林分土壤有机碳含量与土壤碳密度差异较大的原因与林分土层厚度、枯落物厚度、光照、水分、地形以及人畜干扰等因素有关。经计算,林分土壤碳密度在 52.62~138.71 t/hm²,最大的为桦树林 138.71 t/hm²,最小的为灌木林分 52.62 t/hm²。

黑龙江山林场森林土壤层总的碳储量为 1.24×10^6 t,平均碳密度为 115.07 t/hm²,大于乔木层碳储量和平均碳密度。土壤层碳储量在 268.04~761 624.71 t,其中桦树林土壤碳储量最大,占土壤总碳储量的 61.52%,油松林最小,仅占土壤总碳储量的 0.02%。各林分土壤碳储量大小顺序为:桦树(61.52%)>榆树(22.00%)>落叶松(6.59%)>灌杂林(4.97%)>山杨(2.25%)>针阔混交林(0.78%)>硬阔类(0.77%)>五角枫(0.54%)>蒙古栎(0.33%)>阔叶混交林(0.18%)>软阔类(0.04%)>油松(0.02%)。

表4 黑龙江山林场林下灌木、草本、枯落物和腐殖质层碳密度与碳储量

Table 4 Carbon density and storage of understory shrubs, herbs, litter and humus layer at Heilongshan forest farm

优势树种	面积/hm ²	灌木层平均碳密度/(t·hm ⁻²)	草本层碳密度/(t·hm ⁻²)	枯落物层平均碳密度/(t·hm ⁻²)	腐殖质层碳密度/(t·hm ⁻²)	总碳储量/t
桦树	5 490.77	1.46±3.16	0.14±0.17	1.77±1.04	5.93±7.86	51 064.16
榆树	2 600.94	1.10±1.03	0.27±0.19	1.08±1.15	3.04±2.21	14 279.16
落叶松	890.24	1.06±1.25	0.19±0.15	2.89±2.18	4.53±4.18	7 718.38
山杨	194.83	2.12±2.36	0.07±0.05	1.05±1.01	3.35±2.80	1 283.93
硬阔类	118.03	1.03±1.96	0.14±0.18	1.40±1.21	4.06±3.90	782.54
蒙古栎	57.17	1.54±1.38	0.10±0.11	1.51±1.32	4.00±5.24	408.77
五角枫	87.07	1.37±1.28	0.21±0.14	1.46±1.01	2.55±2.86	486.72
油松	3.28	1.05±0.97	0.17±0.16	2.53±2.91	4.51±3.80	27.12
软阔类	5.63	1.35±1.43	0.06±0.03	1.15±1.27	3.48±2.43	34.00
针阔混交林	114.87	1.33±1.68	0.19±0.12	1.58±2.21	4.25±2.23	844.30
阔叶混交林	25.04	1.41±2.21	0.17±0.14	1.36±1.14	5.05±3.67	200.07
灌杂林	1 170.28	0.87±0.72	0.29±0.18	0.62±0.44	1.93±1.41	4 341.74
合计	10 758.15	1.31±0.33	0.29±0.17	2.89±1.53	5.93±3.89	81 470.87

注:数据为平均值±标准误。下同。

表5 黑龙江山林场不同林分类型土壤层有机碳含量及碳密度

Table 5 Organic carbon content and carbon density in soil layers of different forest stands at Heilongshan forest farm

林分类型	各层平均含碳率/(g·kg ⁻¹)				各层碳密度/(t·hm ⁻²)				碳密度合计/(t·hm ⁻²)
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	
桦树	68.8±17.28 ^f	50.2±12.62 ^e	35.15±6.75 ^f	18.82±4.13 ^e	43.34	38.01	31.38	25.98	138.71
榆树	50.3±13.02 ^e	33.65±7.71 ^d	22.39±3.93 ^e	12.31±2.86 ^d	36.44	30.44	20.27	17.57	104.72
落叶松	39.30±15.96 ^e	30.05±13.68 ^d	21.33±7.89 ^e	15.73±5.84 ^f	30.20	28.21	18.11	15.09	91.61
山杨	67.16±18.03 ^f	49.24±10.99 ^e	34.24±10.14 ^f	14.71±2.72 ^e	49.92	39.69	29.55	24.02	143.18
硬阔类	32.53±13.76 ^b	19.52±10.71 ^b	15.86±8.82 ^e	7.99±2.25 ^b	23.56	29.45	13.90	13.33	80.24
蒙古栎	32.86±10.72 ^b	19.18±6.67 ^b	14.34±5.97 ^{bc}	9.22±2.26 ^{bc}	28.05	18.18	14.54	11.60	72.37
五角枫	32.71±13.05 ^b	17.96±7.28 ^b	16.53±5.97 ^e	7.88±1.74 ^b	25.54	19.13	16.65	14.98	76.3
油松	45.0±7.52 ^d	27.77±8.62 ^e	14.85±4.26 ^e	10.04±3.41 ^e	34.45	22.49	12.92	11.86	81.72
软阔类	49.10±9.80 ^e	24.03±6.66 ^e	13.39±2.03 ^b	8.90±1.60 ^b	40.61	23.77	12.34	11.47	88.19
针阔混交林	44.14±8.97 ^d	26.68±6.07 ^e	18.93±2.13 ^d	10.21±1.94 ^e	33.73	20.87	16.18	13.52	84.3
阔叶混交林	49.23±3.78 ^e	32.81±3.53 ^d	18.96±2.66 ^d	9.81±1.42 ^{bc}	37.75	26.41	16.54	9.04	89.74
灌杂林	28.76±8.99 ^a	17.04±5.11 ^a	10.06±1.15 ^a	7.46±0.93 ^a	21.06	13.70	9.27	8.59	52.62
合计	44.99±13.04	29.01±11.20	19.67±7.81	11.09±3.58	33.72	25.86	17.63	14.75	115.07

注:表中字母表示相同土壤层次群落间的比较,字母不同表示差异显著($p<0.05$)。

2.4 黑龙江山林场森林生态系统碳储量及其分配特征

黑龙江山林场森林生态系统总碳储量为 1.87×10^6 t, 平均碳密度为 173.57 t/hm^2 (表6)。由表6可知,碳储量分配特征大小顺序为:土壤层(66.30%)>乔灌林(29.34%,其中乔木占29.13%,灌杂占0.21%)>腐殖质层(2.62%)>枯落物层(0.89%)>林下灌木层(0.74%)>林下草本层(0.11%)。碳密度分配特征大小为:土壤层(115.07 t/hm^2)>乔灌层(50.92 t/hm^2)>腐殖质层(4.55 t/hm^2)>枯落物层(1.55 t/hm^2)>

林下灌木层(1.28 t/hm^2)>林下草本层(0.19 t/hm^2)。不同林分类型生态系统平均碳密度桦树林最大为 210.41 t/hm^2 ,灌杂林最小为 59.76 t/hm^2 ,其大小顺序为:桦树>油松>针阔混交林>阔叶混交林>落叶松>山杨>榆树>蒙古栎>五角枫>软阔类>硬阔类>灌杂林(表6)。造成不同林分生态系统碳储量与碳密度差异较大的原因,与立地条件、土壤厚度、林分类型、林龄、密度、生长位置等因素密切相关。

表 6 黑龙江林场不同林分类型各层碳储量分配及平均碳密度

Table 6 Carbon storage allocation and average carbon density in different forest types at Heilongshan forest farm

林分类型	面积/ hm ²	乔灌木/ t	林下灌木 层/t	林下草本 层/t	枯落物层/ t	腐殖质层/ t	土壤层 /t	碳密度/ (t·hm ⁻²)
桦树	5 490.77	342 624.05	8 016.52	768.71	9 718.66	32 560.27	761 624.71	210.41
榆树	2 600.94	116 157.98	2 861.03	702.25	2 809.02	7 906.86	272 370.44	154.87
落叶松	890.24	59 583.76	943.65	169.15	2 572.79	4 032.79	81 554.89	167.21
山杨	194.83	3 329.64	413.04	13.64	204.57	652.68	27 895.76	166.86
硬阔类	118.03	1 816.48	121.57	16.52	165.24	479.20	9 470.73	102.26
蒙古栎	57.17	4 121.96	88.04	5.72	86.33	228.68	4 137.39	151.62
五角枫	87.07	3 497.60	119.29	18.28	127.12	222.03	6 643.44	122.06
油松	3.28	377.86	3.47	0.56	8.30	14.79	268.04	205.19
软阔类	5.63	67.84	7.60	0.34	6.47	19.59	496.51	106.28
针阔混交林	114.87	10 080.99	152.78	21.83	181.49	488.20	9 683.54	179.41
阔叶混交林	25.04	2 172.97	35.31	4.26	34.05	126.45	2 247.09	184.51
灌杂林	1 170.28	4 014.06	1 018.14	339.38	725.57	2 258.64	61 580.13	59.76
合计	10 758.15	547 845.19	13 780.44	2 060.64	16 639.61	48 990.18	1 237 972.67	173.57

2.5 黑龙江林场森林生态系统碳储量空间分布特征

黑龙江林场森林生态系统碳储量、碳密度具有明显的海拔梯度现象(图4)。随海拔升高,森林生态系统碳储量呈现增加趋势,到海拔1 600~1 800 m处达到最大,而后呈现下降趋势。碳储量主要分布在海拔1 400~2 000 m,占总碳储量的91.23%。森林生态系统碳密度各海拔高层处差别并不十分明显,随海拔升高大致呈现下降趋势,在海拔1 800~2 000 m最小,为170.25 t/hm²,而后呈增加趋势,在海拔2 000~2 300 m处最大,为177.92 t/hm²。

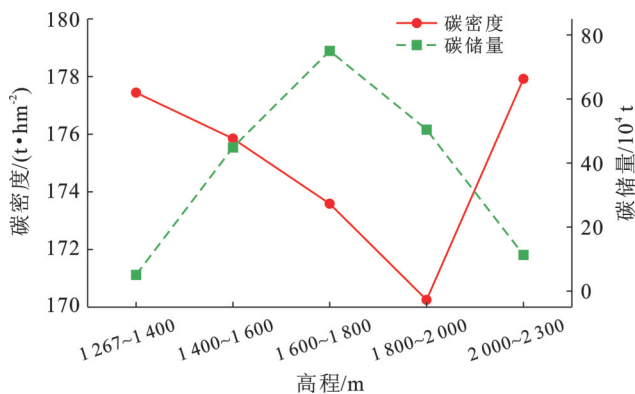


图 4 黑龙江林场不同海拔梯度碳储量与碳密度

Fig.4 Carbon storage and carbon density at different altitude gradients of Heilongshan forest farm

坡度对黑龙江林场森林生态系统碳储量、碳密度具有明显的影响(图5)。从平缓坡(0°~5°)到缓坡(5°~15°)、斜坡(15°~25°)、陡坡(25°~35°)碳储量呈增加趋势。在陡坡处达到最大,陡坡占总碳储量的44.12%。而后再从急坡(35°~45°)到险坡(>45°)呈下降趋势,险坡处最小,仅占总碳储量的1.29%。

而碳密度从缓坡到险坡呈增加趋势,险坡最大,为183.24 t/hm²,缓坡最小为169.94 t/hm²。

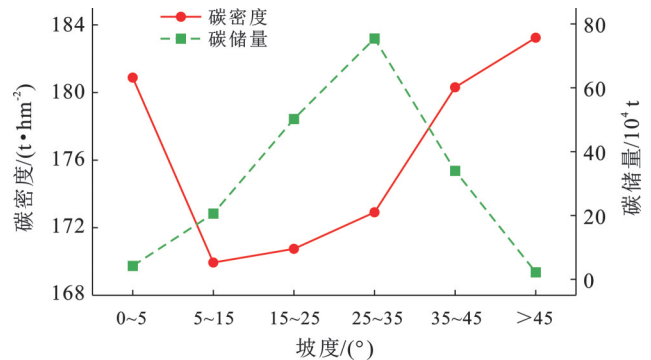


图 5 黑龙江林场不同坡度碳储量与碳密度

Fig.5 Carbon storage and carbon density at different slopes of Heilongshan forest farm

黑龙江林场森林生态系统碳储量、碳密度受坡向影响较为明显(图6)。半阴坡碳储量最大,占总碳储量的30.98%,其次阴坡,占27.21%,半阳坡占24.15%,阳坡占17.43%,而平坡最小,仅占0.22%。阴坡、半阴坡碳储量明显高于阳坡、半阳坡。而碳密度以平坡最大(200.17 t/hm²),阳坡最小(131.24 t/hm²)。阴坡(199.95 t/hm²)、半阴坡(192.30 t/hm²)碳密度同样明显高于阳坡、半阳坡(166.58 t/hm²)。

3 讨论

3.1 土壤层厚度对森林生态系统碳储量、碳密度的影响

黑龙江林场森林生态系统总碳储量为 1.87×10^6 t,平均碳密度为173.57 t/hm²,低于中国森林生态系统平均碳密度258.83 t/hm²[21],也低于太行山柳林河流

域森林生态系统碳密度 $208 \text{ t/hm}^{2[22]}$,其原因可能与土壤层碳密度相对较低有关,土壤层碳密度与土壤类型、容重、取样深度、有机质含量以及土壤中所含 2 mm 砾石的体积等因素有关^[23],由于黑龙江林场土壤厚度范围在不同海拔、不同坡度处差别较大,其平均厚度在 $30\text{--}80 \text{ cm}$,本研究土壤取样深度为 50 cm ,而其他学者研究取样深度大多在 $60\text{--}100 \text{ cm}^{[22]}$ 。黑龙江林场土壤层碳储量最大,是碳储量的主体,占总碳储量的 66.30% 。而碳密度为 115.07 t/hm^2 ,明显高于乔木层的碳储量(总碳储量的 29.13%)和碳密度(56.72 t/hm^2),与前人研究的结果土壤层碳储量大于乔木层碳储量相一致^[21],主要原因是黑龙江林场大多数林分生长于阴坡、半阴坡,土壤湿度大,枯落物、腐殖分解慢,有利于土壤有机质积累,土壤中有机碳含量较高。然而有学者研究结果认为乔木层碳储量及碳密度大于土壤层,可能与研究的土壤类型及取样深度等有关^[22]。

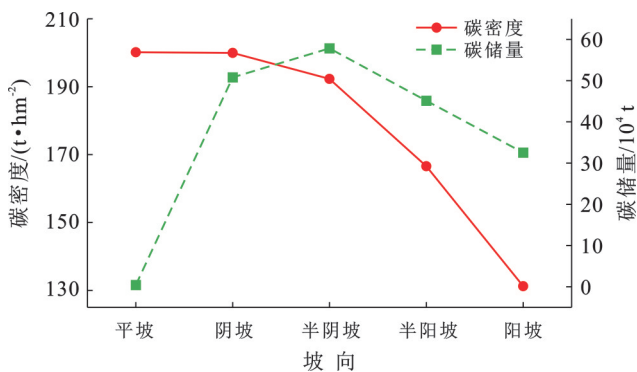


图6 黑龙江林场不同坡向碳储量与碳密度

Fig.6 Carbon storage and carbon density facing different slope directions of Heilongshan forest farm

3.2 林分类型及林龄对森林生态系统碳储量、碳密度的影响

森林植被的组成与空间分布决定森林碳储量的能力。黑龙江林场乔木层总碳储量 $5.44 \times 10^5 \text{ t}$,平均碳密度 56.72 t/hm^2 ,高于我国森林平均碳密度(40.66 t/hm^2)^[24]。从研究结果看,黑龙江林场以桦树林、榆树林为主,分布广、面积大,是黑龙江碳储量的主体,二者均以中幼林为主,有较大的增汇空间。乔木层碳密度高于中国森林平均碳密度的原因是黑龙江林场森林蓄积以中龄林、近成熟林为主,其蓄积量分别占总蓄积的 55.93% 和 22.45% ,单位面积蓄积分别为 116.35 和 $147.55 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,均高于中国同龄林^[24]。黑龙江林场乔木林不同林龄平均碳密度大小为:幼龄林 $<$ 中龄林 $<$ 近成熟林 $<$ 成熟林,与前人^[23]研究结果林龄越大碳密度越大结果一致,也进一步表明黑龙江林场未来有较大增汇潜力。

3.3 地形因素对森林生态系统碳储量、碳密度的影响

黑龙江林场海拔高差近千米,森林植被呈典型的垂直分布,也造成其碳储量、碳密度具有明显的垂直分布性。在海拔 $1400\text{--}2000 \text{ m}$,森林生态系统碳储量占总碳储量的 91.23% ,而在海拔 1400 m 以下和 2000 m 以上,仅占 2.83% 和 6.24% ,低海拔受人为干扰严重,而高海拔受土壤、水分等因素限制,森林面积小,碳储量相对较低。黑龙江林场属于典型的大陆性季风气候,水热是限制森林植被生长的主导因子,森林植被主要分布在阴坡、半阴坡、半阳坡等水热条件较好的区域,而阳坡主要生长耐旱的榆树、灌杂等树种。碳储量、碳密度均为半阴坡、阴坡高于半阳坡、阳坡。阳坡碳密度最小的原因是光照强,土壤水分蒸发快,立地条件差,限制了森林植被生长和土壤有机碳积累。从坡度上看,黑龙江林场森林植被主要分布在斜坡、陡坡。而随着坡度增加,土壤水分和养分减少,土层厚度变薄,易发生水土流失等不利于植被生长的因素增加,限制了森林植被生长和土壤有机碳的积累,造成森林面积小和碳储量低。另外,坡度大小也反映人类干扰程度,坡度越小人类干扰强度越大,不利于森林植被生长,坡度越大人类干扰的机会和强度越小,有利于植被生长,碳密度相对高。通过对土壤厚度、林分类型、蓄积量、林龄及地形等内在因素的分析,揭示了黑龙江林场森林生态系统碳储量与碳密度空间分异的驱动机制,表明森林固碳能力受内外多重因素协同影响。因此,科学优化森林结构与管理模式可成为提升森林碳汇能力外在关键因素。

4 黑龙江林场森林增汇途径分析

4.1 加强森林资源的抚育管理,提升森林质量

森林蓄积和面积是碳汇核算的关键指标,森林碳汇与二者成正比。黑龙江林场乔木林以幼龄林和中龄林为主,其面积分别占乔木林总面积的 34.13% 和 47.03% ,蓄积量分别占总蓄积量的 15.06% 和 55.93% 。未来林场应借助中央财政森林抚育补贴项目、国家储备林中央财政森林抚育补贴项目以及全国森林可持续经营试点等政策支持,科学编制并实施森林经营方案,精准提升森林碳汇功能。在经营策略上,可通过抚育间伐、透光伐、卫生伐等经营措施,调整树种组成与林分密度,改善林木生长环境,提升森林蓄积量。从林场地类现状来看,可供造林的土地面积十分有限,未来可以通过低质林改造、开展困难地造林等途径挖掘潜力,增加森林面积。

4.2 预防火灾,减少碳排放

火是森林生态系统重要的干扰因子,森林火灾一旦发生,积累在森林生态系统中多年的碳以燃烧的形式释放 CO_2 ,返回大气。赵凤君等^[25]研究发现全球每年森林火灾排放含碳气体约为 3.90×10^9 t,相当于化石燃料排放量的70%,且林火中的碳90%以 CO_2 形式排放。中国在1991—2000年平均每年因为火灾造成20.24~28.56 Tg的净释放,占中国2000年碳排放总量的2.7%~3.9%^[26]。黑龙江林场应坚持“预防为主,积极消灭”的森林防火方针,以林长制为抓手,建立科学合理防火规章制度和扑火预案、利用物联网技术建设森林火灾监测、预警系统,设置防火通道和防火检查站,加强防火宣传,增强人们的防火意识,减少碳排放。

4.3 控制森林病虫害发生,减少碳排放

森林病虫害一旦发生,轻者会影响植物生长,重者大面积死亡,都会降低林地生产力,增加碳排放。研究表明受昆虫和疾病干扰影响的地块树木的碳封存量比没有受到干扰的地块平均减少69%和28%^[27]。Kuruz等^[28]评估山地松毛虫疫病对大不列颠哥伦比亚省松树林的影响结果表明,在虫害最严重的几年,受害森林已成为一个大型的 CO_2 排放源,它排放的碳总量是加拿大火灾引起的碳排放量的3/4。松树是北半球碳储量的主要贡献者,而松树正受到松材线虫和日本松叶蜂入侵复合体的威胁,自1977年以来,该复合体导致北方森林中松树生态系统的碳汇赤字为1 857 Tg^[29]。黑龙江林场应坚持“预防为主,综合治理”病虫害防治方针,组建专业队伍,加强预警预报,对一些常见的病虫害做到早预防、早治愈,防止病虫害对树木和林分造成重大危害,延长树木寿命,增加其碳贮量。

4.4 保护好森林土壤碳库,防止碳流失

森林土壤碳库是陆地生态系统最大的有机碳库,同时又是潜在的最大碳排放源。《全球生态环境遥感监测2023年度报告》^[30]指出,1985—2020年,全球森林损毁导致森林生物量碳损失约 2.97×10^{10} t,表层土壤有机碳损失约 4.51×10^9 t。水土流失会导致土壤碳素净流失,中国每年因水土流失损失的有机质高达 1.63×10^8 t^[31]。黑龙江林场土壤碳储量为 1.24×10^6 t,占总碳储量的66.30%,土壤层碳储量是黑龙江林场碳储量的主体,保护现有森林植被、和土壤免遭破坏,减少水土流失和碳流失,对黑龙江林场至关重要。

5 结论

(1) 黑龙江林场森林生态系统总碳储量为

1.87×10^6 t,平均碳密度为173.57 t/hm²,碳储量分配特征为:土壤层>乔灌层>腐殖质层>枯落物层>林下灌木层>林下草本层。乔木林总碳储量为 5.44×10^5 t,平均碳密度为56.72 t/hm²。乔木林碳储量的大小顺序为:桦树>榆树>落叶松>针阔混交林>蒙古栎>五角枫>山杨>阔叶混交林>硬阔类>油松>软阔类。黑龙江林场乔木林以中、幼龄林为主,具有较大的增汇潜力。

(2) 地形因子通过调控光照、水热、土壤厚度和养分分配,直接或间接影响着森林生态系统碳储量、碳密度的空间分布。森林生态系统碳储量主要分布在海拔1 400~2 000 m,占总碳储量的91.23%。碳储量、碳密度均为半阴坡、阴坡高于半阳坡、阳坡。各坡度碳储量大小顺序为:陡坡>斜坡>急坡>缓坡>平缓坡>险坡。

(3) 加强森林抚育,预防火灾,控制森林病虫害,保护森林土壤等措施提升森林质量,减少碳排放,是黑龙江林场森林增汇的有效途径。

参考文献(References)

- [1] Gahlawat I N, Lakra P. Global Climate change and its effects[J]. Integrated Journal of Social Sciences, 2020, 7(1):14-23.
- [2] 刘世荣,王晖,李海奎,等.碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇变化预估与潜力提升途径[J].林业科学,2024,60(4):157-172.
Liu Shirong, Wang Hui, Li Haikui, et al. Projections of China's forest carbon storage and sequestration and ways of their potential capacity enhancement [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024,60(4):157-172.
- [3] 曹吉鑫,田贇,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.
Cao Jixin, Tian Yun, Wang Xiaoping, et al. Estimation methods of forest sequestration and their prospects [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5):2001-2005.
- [4] Pan Yude, Birdsey R A, Fang Jingyun, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. Science, 2011,333(6045):988-993.
- [5] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001,292(5525):2320-2322.
- [6] Fradette O, Marty C, Tremblay P, et al. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in afforested open woodlands with black spruce and jack pine, in the eastern Canadian boreal forest [J]. Forests, 2021,12(1):59.
- [7] Zhang Fanyi, Tian Xin, Zhang Haibo, et al. Estimation of aboveground carbon density of forests using deep learn-

- ing and multisource remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(13):3022.
- [8] Zhao Junfang, Liu Dongsheng, Zhu Yujie, et al. A review of forest carbon cycle models on spatiotemporal scales [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 339: 130692.
- [9] 崔高阳,陈云明,曹扬,等.陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析[J].*植物生态学报*,2015,39(4):333-342. Cui Gaoyang, Chen Yunming, Cao Yang, et al. Analysis on carbon stock distribution patterns of forest ecosystems in Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015,39(4):333-342.
- [10] Yao Ling, Liu Tang, Qin Jun, et al. Carbon sequestration potential of tree planting in China [J]. *Nature Communications*, 2024,15:8398.
- [11] 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(5):20-26. Lei Haiqing, Sun Gaoqiu, Zheng Deli. Carbon storage of forest ecosystem in Wenzhou City, Zhejiang Province, China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022,46(5):20-26.
- [12] 李海奎.碳中和愿景下森林碳汇评估方法和固碳潜力预估研究进展[J].*中国地质调查*,2021,8(4):79-86. Li Haikui. Research advance of forest carbon sink assessment methods and carbon sequestration potential estimation under carbon neutral vision [J]. *Geological Survey of China*, 2021,8(4):79-86.
- [13] 郭同方,吴水荣,张超,等.重点国有林区森林碳储量动态变化及增汇策略分析:以龙江森工为例[J].*江西农业大学学报*,2024,46(3):582-596. Guo Tongfang, Wu Shuirong, Zhang Chao, et al. Analysis on the dynamic changes of forest carbon stocks and sinks enhancement strategies in key state-owned forest regions: A case study on Longjiang Forest Group [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(3):582-596.
- [14] 国家林业和草原局.森林可燃物标准地调查技术规程:FXPC/LCF01[S].国务院第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组办公室印发,2021. National Forestry and Grassland Administration. Technical Regulations for Investigation of Forest Combustible Standard Sites:FXPC/LCF01[S]. Issued by the Office of the Leading Group for the First National Comprehensive Natural Disaster Risk Census of the State Council of the PRC, 2021.
- [15] 北京市质量技术监督局.林业碳汇计量监测技术规程:DB11/T 953—2013[S].北京:北京市质量技术监督局,2013. Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical regulations for forestry carbon accounting and monitoring:DB11/T 953—2013 [S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision, 2013.
- [16] 国家林业局.森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算:LY/T 1237—1999[S].北京:国家林业局,1999. State Forestry Administration of the People's Republic of China. Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio: LY/T 1237—1999 [S]. Beijing: State Forestry Administration, 1999.
- [17] 中华人民共和国生态环境部.温室气体自愿减排项目方法学造林碳汇(CCER-14-001-V01)[EB/OL](2023-10-24)[2025-01-07].https://www.hunan.gov.cn/zqt/zcsd/202310/31721537/files/6588_bbeadc3243_b68_b9_a2579_e72_cacfd.pdf. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Methodology of voluntary greenhouse gas emission reduction project afforestation carbon sink (CCER-14-001-V01) [EB/OL] (2023-10-24) [2025-01-07]. https://www.hunan.gov.cn/zqt/zcsd/202310/31721537/files/6588_bbeadc3243_b68_b9_a2579_e72_cacfd.pdf.
- [18] 董利虎.黑龙江省主要树种相容性生物量模型研究[D].黑龙江哈尔滨:东北林业大学,2012. Dong Lihu. Study on the compatible models of tree biomass for main species in Heilongjiang Province [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2012.
- [19] 贺鹏,张会儒,雷相东,等.基于地统计学的森林地上生物量估计[J].*林业科学*,2013,49(5):101-109. He Peng, Zhang Huiru, Lei Xiangdong, et al. Estimation of forest above-ground biomass based on geostatistics [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013,49(5):101-109.
- [20] 国家林业局.森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算:LY/T 1237—1999[S].北京:国家林业局,1999. National Forestry and Grassland Administration. Determination of organic matter in forest soil and calculation of carbon nitrogen ratio: LY/T 1237—1999 [S]. Beijing: State Forestry Administration, 1999.
- [21] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J].*植物生态学报*,2000,24(5):518-522. Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000,24(5):518-522.
- [22] 李佳聪,朱春雨,郭波,等.太行山典型流域森林生态系统碳储量分布特征[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2024,32(8):1302-1310. Li Jiacong, Zhu Chunyu, Guo Bo, et al. Distribution characteristics of carbon storage in forest ecosystems in

- typical watersheds of Taihang Mountains basin [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(8): 1302-1310.
- [23] 路秋玲, 郑阿宝, 阮宏华. 瓦屋山林场森林碳密度与碳储量研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(5):115-119.
Lu Qiuling, Zheng Abao, Ruan Honghua. The carbon density and carbon storage of forests in Wawushan Forest Farm [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2010, 34(5):115-119.
- [24] 国家林业和草原局. 2021 中国林草资源及生态状况 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2022.
National Forestry and Grassland Administration. Forest and grass resources and ecological status in China in 2021 [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2022.
- [25] 赵凤君, 舒立福, 姚树人. 森林火灾碳排放估算方法与研究进展[J]. 森林防火, 2012(1):25-29.
Zhao Fengjun, Shu Lifu, Yao Shuren. Estimation methods and research progress of carbon emissions from forest fires [J]. Forest Fire Prevention, 2012(1):25-29.
- [26] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉. 1991—2000 年中国森林火灾直接释放碳量估算[J]. 火灾科学, 2003, 12(1):6-10.
Tian Xiaorui, Shu Lifu, Wang Mingyu. Direct carbon emissions from Chinese forest fires, 1991—2000 [J]. Fire Safety Science, 2003, 12(1):6-10.
- [27] Quirion B R, Domke G M, Walters B F, et al. Insect and disease disturbances correlate with reduced carbon sequestration in forests of the contiguous United States [J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2021, 4: 716582.
- [28] Kurz W A, Dymond C C, Stinson G, et al. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change [J]. Nature, 2008, 452(7190):987-990.
- [29] Zhou Jiao, Du Jingjing, Bonifácio L, et al. Vulnerability of global pine forestry's carbon sink to an invasive pathogen-vector system [J]. Global Change Biology, 2024, 30(12):e17614.
- [30] 中华人民共和国科学技术部. 全球生态环境遥感监测 2023 年度报告: 全球土地覆盖变化对碳损失和碳吸收的影响 [EB/OL] (2024-01-10) [2025-01-08]. https://noda.ac.cn/geoarc/2023/A/A3/A3_1/index.html. Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Global ecosystem and environment observation analysis research cooperation (Geoarc) 2023 annual report: Carbon loss and carbon sequestration due to global land cover change [EB/OL] (2024-01-10) [2025-01-08]. https://noda.ac.cn/geoarc/2023/A/A3/A3_1/index.html.
- [31] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):28-38.
Zhao Mingsong, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1):28-38.

(上接第 143 页)

- [25] 亢晨波, 郭汉清, 张焱, 等. 复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(5):71-80.
Kang Chenbo, Guo Hanqing, Zhang Yao, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of different land use types in reclaimed areas [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(5):71-80.
- [26] 张佳怡, 王轶浩, 余龙飞, 等. 酸沉降减弱背景下重庆城郊马尾松林结构特征及土壤性质变化特征[J]. 生态学报, 2024, 44(23):10745-10756.
Zhang Jiayi, Wang Yihao, Yu Longfei, et al. Structural characteristics and soil properties changes of *Pinus massoniana* forest in the suburbs of Chongqing under the background of weakened acid deposition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23):10745-10756.
- [27] 周云, 白英辰, 姚兰, 等. 鄂西南 5 种典型林分枯落物与土壤的持水性能[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 77-86.
Zhou Yun, Bai Yingchen, Yao Lan, et al. Litter and soil water-holding capacity of five typical forest stands in southwest Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2):77-86.
- [28] Vinatier F, Rudi G, Coulouma G, et al. Dynamics of quasi-steady ponded infiltration under contrasting plant cover and management strategies [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 237:105985.
- [29] 黄尚书, 钟义军, 何绍浪, 等. 耕作深度对红壤坡耕地季节性干旱早期土壤水分变化特征的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(1):39-45.
Huang Shangshu, Zhong Yijun, He Shaolang, et al. Effects of tillage depth on characteristics of soil moisture in red soil sloping farmland under seasonal drought [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1):39-45.
- [30] Xu Yangguang, Luo Li, Guo Wenzhao, et al. Vegetation roots-induced changes of loess infiltration: Greatly promoting lateral flow [J]. Catena, 2025, 250:108803.