



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 T F, WU S R, ZHANG C, 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.

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

郭同方, 吴水荣*, 张超, 苏秦

(中国林业科学研究院 林业科技信息研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】重点国有林区是中国实现碳中和目标的压舱石, 研究其森林碳储量增汇动态尤为重要。【方法】基于2002年和2020年2个时点的森林资源二类调查与档案年度更新数据和相关文献资料, 采用森林生物量扩展因子法, 估算龙江森工及其所辖23个林业局和7个直属林场的森林碳储量与碳密度动态变化, 利用生物量-林龄模型和最大碳密度估测固碳潜力, 分析重点国有林区增汇策略。【结果】2002—2020年, (1)龙江森工碳储量提升, 森林植被碳储量由189.23 TgC增加到333.43 TgC, 增长了71.22%; (2)龙江森工森林植被以乔木林为主要固碳类型, 且乔木林碳储量占比增大, 由91.97%提升到99.77%, 其中沾河林业局碳储量最高、绥阳林业局碳储量增量最大、丰林林场碳密度最高、穆稜林业局碳密度增长量最多; (3)龙江森工以混交林为主要固碳森林类型, 且占比上涨, 碳储量占比最大的为阔叶混交林, 纯林中以蒙古栎林和落叶松林为主; (4)绝大部分森林类型的碳储量为净增加, 各森林类型的碳密度呈现显著增加趋势, 2020年不同树种的碳密度介于36.94~70.61 MgC/hm², 蒙古栎林为碳密度最大森林类型, 落叶松林为碳密度增量最大森林类型; (5)从各林龄组来看, 中龄林碳储量占比最大, 碳密度和林龄呈正向增长; (6)通过预测分析, 龙江森工碳储量到2030年可达到396.33 TgC, 2060年可达到519.16 TgC; 乔木林碳密度从2020年的59.64 MgC/hm², 分别增长到2030年的73.11 MgC/hm²和2060年的95.76 MgC/hm², 增量呈现减弱的趋势。【结论】为进一步提高森林固碳增汇作用, 应加强森林生态系统保护修复与可持续经营, 由于造林扩碳潜力有限, 重点在于开展森林质量精准提升经营提质增汇, 并探索通过碳资源化利用将森林生态系统碳汇向木质林产品碳库转移的双汇协同提升途径。

关键词: 重点国有林区; 龙江森工; 碳储量; 碳汇

中图分类号: S757 **文献标志码:** A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)03-0582-15



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

GUO Tongfang, WU Shuirong*, ZHANG Chao, SU Qin

收稿日期: 2023-10-09 **修回日期:** 2024-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0105100)

Project supported by the National Key R&D Plan of China

作者简介: 郭同方, 博士生, orcid.org/0009-0007-5718-4583, tongfangguo@caf.ac.cn; *通信作者: 吴水荣, 研究员, 博士生导师, 主要从事森林资源与环境经济、森林多目标经营管理与气候变化林业政策研究, orcid.org/0000-0001-8188-9646, wushuirong@caf.ac.cn.

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(Forestry Science and Technology Information Research Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Key state-owned forest regions are the ballast for China to achieve its carbon neutrality goal, to study the dynamic changes of carbon sinks enhancement and enhancement strategies of key state-owned forest regions. [Method] Using the forest biomass expansion factor method, the forest carbon stock and carbon density of the Longjiang Forest Group and its 23 forestry bureaus and 7 directly affiliated forest farms were estimated based on forest management inventory data and archives and relevant literature at two points in 2002 and 2020, and the potential of carbon sequestration was estimated by the biomass-age model and maximum carbon density, so as to the dynamics of forest carbon sinks and its improvement strategy were analyzed. [Result] From 2002 to 2020, (1) Carbon stocks enhancement in key state-owned forest regions, the carbon stock of forest vegetation in Longjiang Forest Group increased from 189.23 TgC to 333.43 TgC, an increase of 71.22%; (2) Carbon sequestration in forest vegetation is mainly in the type of tree forests, and the proportion of carbon stock in tree forests has increased, the proportion of carbon stock in arborvitae forests increased from 91.97% to 99.77% of Longjiang Forest Group, Zhanhe Forestry Bureau had the highest carbon stock, Suiyang Forestry Bureau had the largest increase in carbon stock, Fenglin Forestry Bureau had the highest carbon density, and Muling Forestry Bureau had the largest increase in carbon density; (3) Longjiang Forest Group is dominated by mixed forests, and the largest proportion of carbon stocks is broadleaf mixed forests, and the largest proportion of tree species in pure forests are Quercus and Larix forests; (4) The vast majority of tree species have a net increase in carbon stocks, and the carbon density of each species shows a significant increasing trend, and the carbon densities of different species in 2020 range from 36.94 to 70.61 MgC/hm², Quercus forests were the highest carbon-density forest type, and Larix forests were the highest carbon-density incremental forest type; (5) From the viewpoint of each forest age group, the middle-aged forests have the largest proportion of carbon stocks, carbon density and forest age are positively proportional to each other; (6) Through the prediction analysis, the carbon stocks of Longjiang Forest Group will reach 396.33 TgC in 2030 and 519.16 TgC in 2060; the carbon density of tree forests will increase from 59.64 MgC/hm² in 2020 to 73.11 MgC/hm² in 2030 and 95.76 MgC/hm² in 2060, respectively, and the incremental increase will show a weakening trend. [Conclusion] To further increase forest carbon sequestration, forest ecosystem protection, restoration, and sustainable management should be strengthened, due to the limited potential of afforestation to expand carbon, the focus should be on carrying out precise forest quality enhancement management to improve quality and sink enhancement, and exploring synergistic enhancement pathways for transferring carbon sinks of forest ecosystems to carbon pools of woody forest products through the utilization of carbon resources.

Keywords: Key state-owned forest region; Longjiang Forest Group; Carbon stocks; Carbon sinks

【研究意义】政府间气候变化专门委员会发布的第6次评估报告表明人类正面临显著的气候变化风险。国际社会将森林在维持全球碳平衡和减缓气候变化方面的重要作用视为一项基于自然的解决方案,认为森林是陆地生态系统最大的碳库^[1-2]。森林每年的固碳量约占整个陆地生物固碳量的2/3^[3-4],森林生态系统具有显著的碳汇作用^[5-9]。在2000—2016年期间,我国森林新增碳汇能力相当于发达国家的5倍,森林植被总碳储量累计达到91.8亿MgC^[10],到2060年,中国森林植被年固碳能力将达到或超过7.59亿MgC,年吸收二氧化碳能力将达到27.84亿MgC^[11]。重点国有林区作为我国森林面积最大,开发利用最早,各项林业政策落实最快的林区,占据着我国森林资源存量的主体,生态地位非常重要,是中国实现碳中和目标的压舱石。我国重点国有林区由6大森工(林业)集团组成,分布于我国黑龙江省、吉林省、内蒙古自治区,林区经营面积3 274.12万hm²,占国土总面积的3.41%;森林面积2 727.48万hm²,占全国森林面积的

12.64%;森林蓄积30.07亿 m^3 ,占全国森林蓄积的17.55%^[12]。保护和管理好重点国有林区现有森林资源,提高森林质量,对于维护重点国有林区生态地位、发挥碳汇功能、减缓气候变化有重要意义^[13]。中国龙江森林工业集团有限公司(以下简称龙江森工)是总经营面积第三大的重点国有林区,也是黑龙江省最大的重点国有林区,约占黑龙江全省国土面积的14%。目前龙江森工以占全国2.53%的森林面积,提供了占全国3.74%的森林蓄积量,森林覆盖率是全国的3.69倍,单位面积森林蓄积量是全国的1.23倍^[14]。龙江森工以天然林资源保护工程等重点林业工程为抓手,持续推动营林建设科学规范发展,森林资源总体上呈现数量持续增加、质量稳步提升、生态功能不断增强的良好发展态势。【前人研究进展】近年来,国内外对森林碳储量及其变化的研究主题主要集中在估算碳储量和预测碳汇潜力上。在碳储量估算问题上已经发展出基于样地清查估算^[15-16]、基于生长收获的经验模型估算^[17]、基于遥感雷达估测^[18]、植物生理生态过程模拟^[19]、通量估测等方法^[20]。对于使用过往数据来说,国内森林资源连续清查监测体系较为成熟系统,利用其建立的生物量与蓄积量的转换模型,由于权威详细简便等优势被广泛利用^[21-22]。当前以碳汇潜力预测为主的研究相对较少,预测方法通常参考相关部门印发的未来规划和政策文件假设目标造林面积和目标单位面积蓄积,预设关键时点的森林覆盖率、森林面积和蓄积,或采用模拟法利用模型评估^[23-24]。在研究对象的选择上,学者们多聚焦于全球、国家、省市的森林,然而不同地区的森林资源禀赋存在较大差异,并且小尺度区域从下而上的方法能提高估算精度^[25-27],因此准确估算重点国有林区的森林植被碳储量和固碳潜力对于提升碳汇能力助力双碳目标至关重要。目前已有学者从改革措施^[28]、政策制度^[29]等角度研究重点国有林区林业碳汇优势,推测其在理论层面具备较大的固碳潜力。

【本研究切入点】以重点国有林区为森林生态系统单元切入的研究少,且天保工程后木材停伐减产、森林资源管护培育加强,以龙江森工为代表的重点国有林区森林资源以天然次生林为主^[30],且中幼龄林占比大,具有较大固碳潜力^[31-32],然而鲜有针对该区域森林基于最新数据动态量化碳储量的研究。鉴于此,本研究基于龙江森工2002年和2020年森林资源数据,运用森林生物量扩展因子法,对重点国有林区森林碳储量及其动态变化与潜力进行分析。【拟解决的关键问题】本研究探索以龙江森工为代表的重点国有林区内不同类型、不同优势树种和不同龄组森林植被碳储量和碳密度的动态变化,并分析森林植被固碳增汇潜力,提出森林增汇策略,为应对气候变化、助力碳中和目标实现提供技术支撑。

1 研究区概况

龙江森工位于北纬 $43^{\circ}30'$ 至 $49^{\circ}01'$ 、东经 $127^{\circ}01'$ 至 $134^{\circ}05'$,经营总面积658.57万 hm^2 ,下辖23个林业局和7个直属森林经营单位,总经营面积占黑龙江省国土面积的14.5%,占重点国有林区面积的20%,森林蓄积量7.16亿 m^3 ,森林覆盖率84.68%,是黑龙江省森林覆盖率43.78%的1.93倍^[33]。全林区平均海拔高418.7 m,平均坡度 10.1° ,属于低山丘陵缓坡地形,利于森林经营管理。龙江森工是重要的东北亚陆地森林生态系统的主体,随着天然林资源保护工程等重点林业生态工程的实施以及林业绿色发展战略转型,森林资源持续上升,形成了巨大的碳库。主要树种为蒙古栎(*Quercus mongolica*)、落叶松(*Larix gmelini*)、红松(*Pinus koraiensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、椴树(*Tilia tuan*)、山杨(*Populus davidiana*)等。从林龄结构来看,龙江森工以中龄林为主体,其次是近熟林和幼龄林,成熟林与过熟林占比较小。

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 森林植被碳储量估算

森林生物量扩展因子法是目前利用森林植被生物量估算碳储量最常用的方法之一^[34-36],本研究所涉及的森林生物量仅指乔木林、疏林、灌木林和四旁散生木中活立木的地上地下生物量,不包含林下植被层、凋落物层及枯死木的生物量。

乔木林生物量碳储量以不同龄组的蓄积(树干材积)为计算基础,利用生物量扩展因子系数计算树

木生物量从树干材积转换到地上部分,再利用地上地下之比参数将扩展到地上和地下部分之和,然后通过木材密度(干重系数)计算生物量干重,最后通过不同树种对应的含碳率将生物量转化为碳储量。相关参数选择见表 1,其表达式如下:

$$\sum C_{ij} = A_{ij} \cdot V_{ij} \cdot \delta \cdot (1 + R_{ij}) \cdot D \cdot C_{Fij}$$

(1)

式(1)中:

- C_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的乔木林碳储量(MgC, 10⁶ MgC=1 TgC);
- A_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的面积(hm²);
- V_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的森林单位面积蓄积量(m³/hm²);
- δ —第*i*类树种第*j*种龄组的生物量扩展因子(无量纲);
- R_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的地下生物量和地上生物量之比(无量纲);
- D —木材密度(t.d.m/m³);
- C_{Fij} —第*i*类树种第*j*种龄组的含碳率(MgC/td.m.)。

表 1 树种(组)生物量模型参数及含碳率

Tab.1 Biomass model parameters and carbon content coefficients of tree species(groups)

优势树种 Species(group)	δ					R					D	C_F
	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林		
	Yong forest	Middle forest	Premature forest	Mature forest	Overmature forest	Yong forest	Middle forest	Premature forest	Mature forest	Overmature forest		
阔叶混 <i>Mixed broadleaved forest</i>	1.514	1.514	1.514	1.514	1.514	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262	0.482	0.490
针阔混 <i>Mixed conifer and broadleaved forest</i>	1.656	1.656	1.656	1.656	1.656	0.248	0.248	0.248	0.248	0.248	0.486	0.498
针叶混 <i>Mixed coniferous forest</i>	1.587	1.587	1.587	1.587	1.587	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.405	0.510
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	1.380	1.327	1.360	1.474	1.587	0.260	0.275	0.410	0.281	0.153	0.676	0.500
落叶松 <i>Larix gmelini</i>	1.416	1.416	1.416	1.416	1.416	0.212	0.212	0.212	0.212	0.212	0.490	0.521
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	1.558	1.267	1.267	1.413	1.340	0.223	0.211	0.217	0.214	0.215	0.396	0.511
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	1.526	1.395	1.395	1.252	1.109	0.229	0.279	0.235	0.190	0.212	0.541	0.491
椴树 <i>Tilia tuan</i>	1.407	1.407	1.407	1.407	1.407	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.420	0.439
山杨 <i>Populus davidiana</i>	1.446	1.446	1.446	1.446	1.446	0.227	0.227	0.227	0.227	0.227	0.378	0.496

根据森林资源二类调查资料的分类,选取最主要的9种优势树种(组)进行分析。各树种(组)生物量模型参数及含碳率参照森林生态系统碳储量计量指南 LY/T 2988—2018^[37]、《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》“土地利用变化与林业温室气体清单”^[38]、《中国温室气体清单研究》^[39]。

Based on the categorization of the information from the forest management inventory data ,the most dominant nine forest types were selected for analysis.The biomass model parameters and carbon content of each tree species (group)were referred to Guide-line on carbon stocks accounting in forest ecosystem:LY/T 2988—2018^[37],the People’s Republic of China Second National Communicationon Climate Change^[38],the People’s Republic of China National Greenhouse Gas inventory^[39].

本研究对灌木林碳储量计算的方法和参数默认值参考碳汇造林方法学^[40],采用如下计算公式:

$$C_g = A \cdot R_{BD} \cdot B_{AFOREST} \cdot (1 + R) \cdot CF \quad (2)$$

式(2)中:

C_g —灌木的碳储量(MgC);

A —灌木的面积(hm^2);

R_{BD} —单位面积灌木地上生物量与森林地上生物量的比值(无量纲),默认值0.10;

$B_{AFOREST}$ —单位面积森林地上生物量(td.m/hm^2);

R —灌木的地下生物量/地上生物量之比(无量纲),默认值0.40;

CF —灌木的含碳率(MgC/td.m.),默认值为0.47。

本研究对疏林、四旁散生木碳储量采用如下计算公式:

$$C_S = V \cdot C_{VFOREST} \quad (3)$$

$$C_{VFOREST} = \sum C_{ij} / \sum A_{ij} \quad (4)$$

式(3)、(4)中:

C_S —疏林、四旁散生木的碳储量(MgC);

V —疏林、四旁散生木的蓄积(m^3);

$C_{VFOREST}$ —单位蓄积乔木林碳储量(MgC/m^3);

C_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的乔木林碳储量(MgC);

A_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的乔木林面积(hm^2)。

2.1.2 乔木林碳密度估算方法

森林碳密度是包括乔木林、灌木林、疏林、四旁散生木在内的所有森林植被的碳储量和所有森林植被的面积商,但由于龙江森工的乔木林占绝对优势,且乔木林碳密度可以从林龄、树种角度进行估算,所以本文只考虑乔木林碳密度,其估算方法:

$$\rho_{ij} = \frac{C_{ij}}{A_{ij}} \quad (5)$$

式(5)中:

ρ_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的乔木林碳密度(MgC/hm^2);

C_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的乔木林碳储量(MgC);

A_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的乔木林面积(hm^2)。

2.1.3 乔木林碳储量潜力评估方法

因当前乔木林碳储量已占总碳储量的99.77%,故此文森林植被固碳潜力估算仅指乔木林植被。生物量与林龄的回归模型模拟了森林生长情况,已经被广泛应用于固碳潜力评估^[41-42],笔者利用中国森林资源清查资料拟合得出的主要森林类型生物量密度与林龄的Logistic生长方程进行预测^[43]。以森林资源清查中各林龄组的平均生物量密度为依据,此方法包含了当前森林经营活动对碳库的影响,但并未考虑未来森林经营强度和经营水平提升的情况。计算公式如下:

$$\rho'_{ij} = \frac{w}{1 + ke^{-at}} \quad (6)$$

$$C'_{ij} = A_{ij} \cdot CF_{ij} \cdot \rho'_{ij} \quad (7)$$

式(6)、(7)中:

ρ'_{ij} —预测的林分生物量密度(td.m/hm^2);

t —林龄;

w, k 和 a —常数(表2);

C'_{ij} —预测第*i*类树种第*j*种龄组的乔木林碳储量(MgC);

A_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的面积(hm^2);

CF_{ij} —第*i*类树种第*j*种龄组的含碳率(MgC/td.m.)(表1)。

表 2 生物量密度与林龄的 Logistic 曲线拟合参数
Tab.2 Parameters of the Logistic model of biomass density and forest age

优势树种 Species(group)	<i>w</i>	<i>k</i>	<i>a</i>
阔叶混 Mixed broadleaved forest	237.57	7.251 5	0.167 7
针阔混 Mixed conifer and broadleaved forest	290.96	11.502 0	0.056 0
针叶混 Mixed coniferous forest	158.94	31.929 3	0.101 7
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	197.09	12.641 4	0.042 2
落叶松 <i>Larix gmelini</i>	130.2	3.796 4	0.069 6
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	218.56	7.466 0	0.036 0
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	163.34	9.971 5	0.051 6
椴树 <i>Tilia tuan</i>	266.71	3.595 2	0.058 6
山杨 <i>Populus davidiana</i>	70.76	2.652 8	0.143 4

w、*k*、*a* 为 Logistic 生长方程参数,数据来源为基于生物量密度与林龄关系的预测 2000—2050 年森林碳库的研究结果^[43]。
w, *k*, and *a* are Logistic growth equation parameters, and the data source is the results of the study on predicting forest carbon pools from 2000 to 2050 based on forest biomass-age relationship.

2.2 数据来源

本研究数据来源于龙江森工的森林资源二类调查和档案年度更新数据(2002 年、2020 年),以及从中国知网、国家林草局政府网等网络资源获取整理的相关文献资料。研究中森林生物量扩展因子法的相关系数如扩展因子、地上地下生物量之比、木材密度、含碳率等参数借用森林生态系统碳储量计量指南 LY/T 2988—2018^[37]、《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》“土地利用变化与林业温室气体清单”^[38]、《中国温室气体清单研究》^[39]等文献资料。

3 结果与分析

3.1 龙江森工森林植被碳储量和碳密度动态变化和分布格局

经过近 20 年的营造林生态建设活动,全面采取减灾、停伐、管护、抚育和造林等各项措施,有效地保护和恢复森林生态系统,龙江森工森林植被总碳储量从 2002 年的 189.23 TgC 增加到 2020 年的 333.43 TgC,年均增长量 7.59 TgC,年均增长率 3.03%。森林植被碳储量中乔木林资源的贡献率从 2002 年的 91.97% 增加到 2020 年的 99.77%,是固碳增汇的主要贡献来源。乔木林碳储量和碳密度显著增长,碳储量从 174.03 TgC 增加到 332.64 TgC,碳密度从 32.64 MgC/hm² 增加到 59.64 MgC/hm²(图 1)。各单位的乔木林碳储量皆有增长,近二十年更新造林和林分改造使林地郁闭度和蓄积增加,原有的疏林、灌木林和四旁散生木林地变为乔木林地,所以疏林、灌木林和四旁散生木的碳储量皆表现为下降,其中减少量最多的森林资源为四旁散生木。2002 年,龙江森工四旁散生木的碳储量 14.21 TgC,灌木为 0.03 TgC,疏林为 0.95 TgC,2020 年,四旁散生木的碳储量变为 0.75 TgC,灌木为 0.01 TgC,疏林为 0.02 TgC。

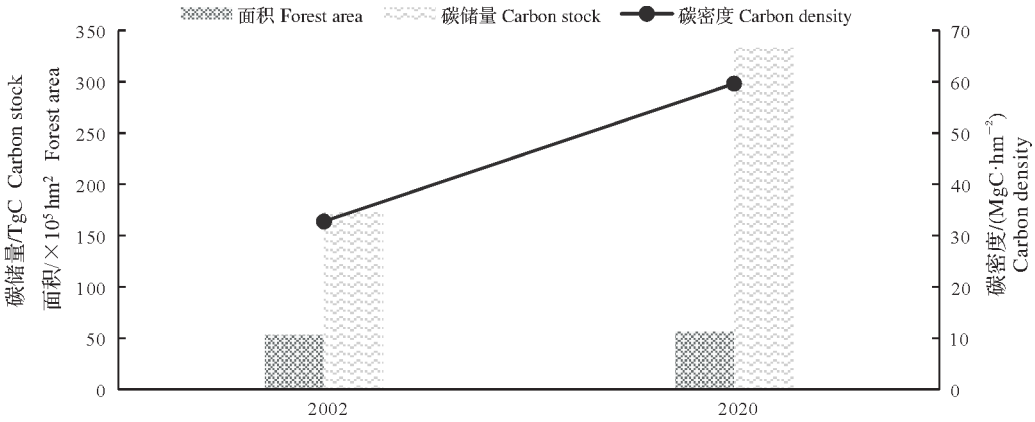


图 1 龙江森工不同时期乔木林面积、碳储量和乔木林碳密度变化

Fig.1 Changes of tree forest area, carbon stocks and carbon density from 2002 to 2020 in Longjiang Forest Group

龙江森工所辖林业局和直属林场共计 30 个单位主要分布于黑龙江省的南部和中部,2002 年和 2020 年森林植被碳储量如图 2 所示。2002 年龙江森工所辖林业局和直属林场的森林植被碳储量在 0.005 5~22.17 TgC 范围内,经过近 20 年的造林绿化,各单位的碳储量明显增加,平均增长率 72.78%,发挥着重要的碳汇作用,2020 年森林植被碳储量在 0.007 2~34.35 TgC。碳储量较高单位的是沾河林业局、绥阳林业局、东京城林业局、柴河林业局、东方红林业局、鹤北林业局等,2002 年的碳储量分别为 22.17, 15.00, 14.90, 13.13, 12.84, 12.64 TgC, 前 6 个单位的碳储量之和占龙江森工总碳储量的近一半,这些单位森林植被面积大,碳储量总量较高。碳储量增量最多的是绥阳林业局、东京城林业局、沾河林业局、东方红林业局和穆棱林业局,近 20 年分别增加 15.20, 13.19, 12.17, 11.33, 9.05 TgC, 乔木林蓄积量的大幅度增长为碳储量增加的主要原因。

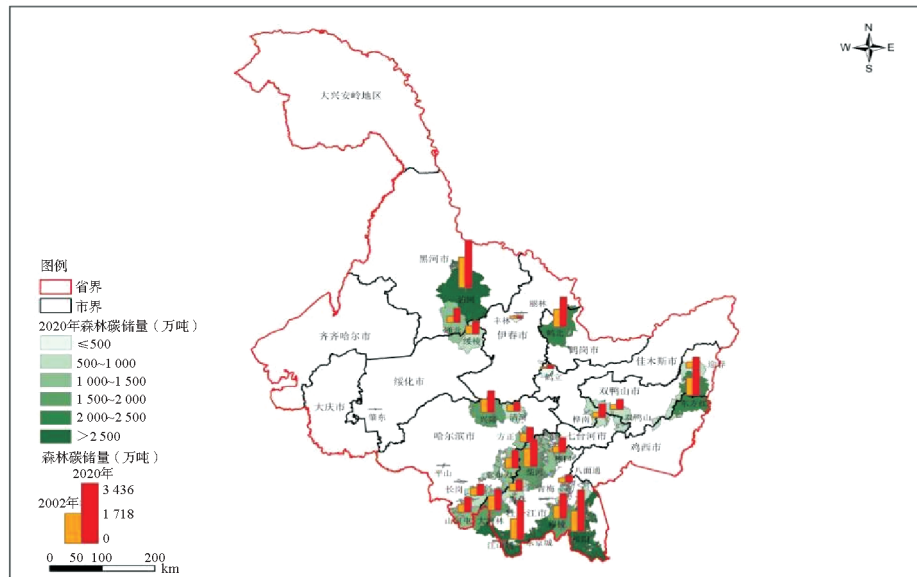


图 2 龙江森工森林植被碳储量分布格局及变化趋势

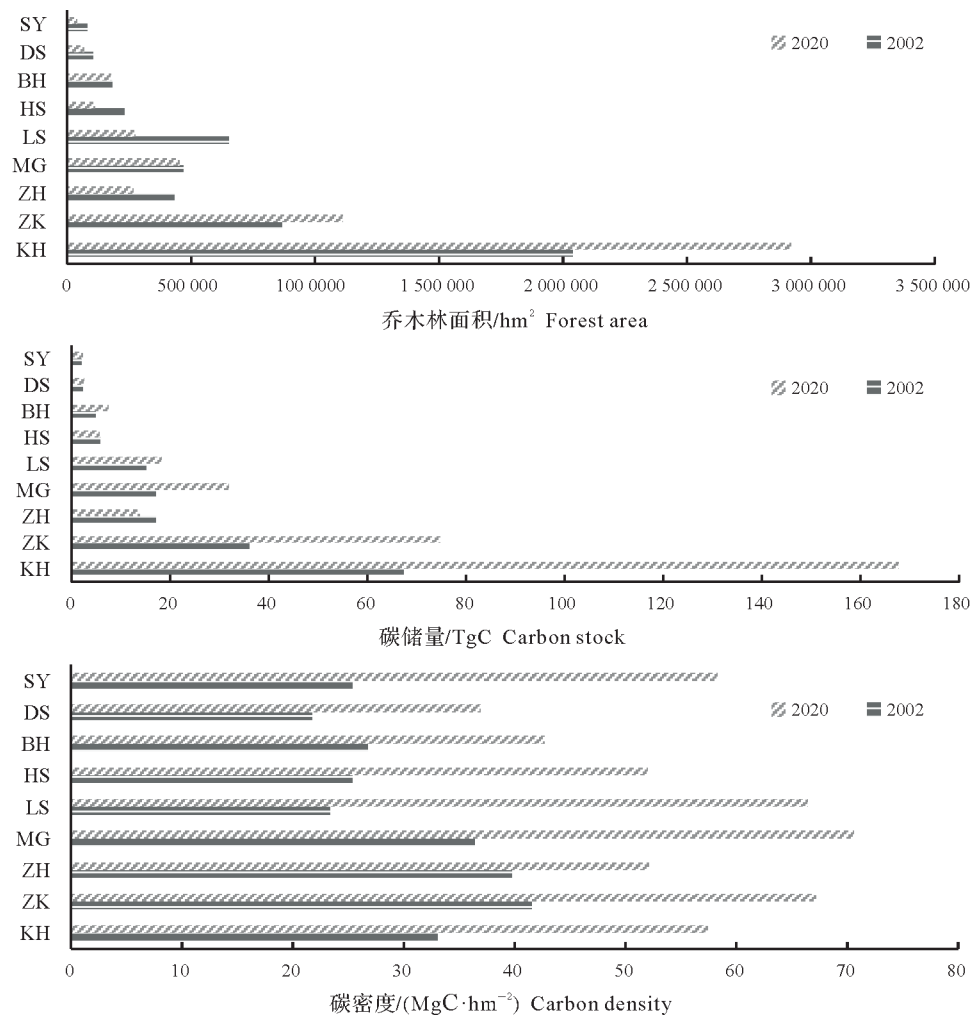
Fig.2 Distribution patterns and trends of forest carbon stocks in Longjiang Forest Group

龙江森工乔木林碳密度空间分布格局和碳储量略有差异,2002 年各直属单位乔木林碳密度在 20.67~94.88 MgC/hm² 范围内,较高的单位是丰林林场、江山娇实验林场、丽林实验林场、柴河林业局、青梅实验林场等,丰林林场的碳密度(94.88 MgC/hm²)为最高,缘于丰林林场森林资源以天然红松林为主,留存小兴安岭面积最大、生态系统最完整的原始红松林,其单位面积蓄积量高,且林龄大,以成熟林和过熟林为主,单位面积生物量高。2020 年龙江森工乔木林碳密度在 42.91~107.23 TgC,最高的 5 个单位分别为丰林林场、江山娇实验林场、穆棱林业局、东京城林业局、东方红林业局等,丰林林场的碳密度仍为最高。近 20 年来,碳密度增长量最多为穆棱林业局,增加约 40 MgC/hm²,由于 2002 年其森林资源以中幼龄林的混交林和天然蒙古栎为主,随着树木生长龄级变为以中龄林和近熟林为主,且单位面积蓄积量增长显著,以中龄林为例,其单位面积蓄积量从 95.11 m³/hm² 增加到 158.56 m³/hm²。

3.2 主要森林类型碳储量和碳密度动态变化

龙江森工不同森林类型碳储量差异较大(图 3),图中 9 种主要森林类型的碳储量占龙江森工的 97% 以上。近 20 年来除针叶混交林和红松林外,绝大部分森林类型的碳储量都表现为净增加,其中阔叶混交林、针阔混交林和蒙古栎林碳储量增量最大,分别从 67.33, 36.02, 17.05 TgC 增长到 167.72, 74.70, 31.96 TgC, 占总碳储量的比重也不断增加,分别从 2002 年的 35.58%、19.04% 和 9.01% 增长到 2020 年的 50.30%、22.40% 和 9.58%。碳储量与森林面积变动趋势相关,龙江森工为了推进次生阔叶林修复提质,全面恢复地带性红松阔叶混交林,使用的造林更新和林分改造等措施使得森林类型发生了改变,也有可能因为地带性植被次生阔叶林代替,以红松等树种为主的阔叶混交林和针阔混交林面积占比逐步提高;同时松材线虫病防治使得针叶混交林、落叶松林和红松纯林等针叶树种为主的森林面积下降。

各树种的碳密度均呈现显著增加趋势,碳密度增加最大的森林类型为落叶松林,其次为蒙古栎林和山杨林,碳密度增加最小的森林类型为针叶混交林、椴树林和白桦林等。2020 年不同树种的碳密度介于 36.94~70.61 MgC/hm²,碳密度较大的树种为蒙古栎(70.62 MgC/hm²),其次为针阔混交林(67.19 MgC/hm²)和落叶松林(66.44 MgC/hm²),碳密度较小的森林类型为椴树林(36.94 MgC/hm²)和白桦林(42.70 MgC/hm²)。



SY 山杨林;DS 椴树林;BH 白桦林;HS 红松林;LS 落叶松林;MG 蒙古栎林;ZH 针叶混交林;ZK 针阔混交林;KH 阔叶混交林。
SY *Poplar* forest;DS *Tilia* forest;BH *Betula* forest;HS *Pinus koraiensis* forest;LS *Larix* forest;MG *Quercus* forest;
ZH Mixed coniferous forest;ZK Mixed coniferous-broad forest;KH Mixed broad-leaved forest.

图 3 龙江森工主要森林类型的面积、碳储量和碳密度变化

Fig.3 Changes of forest area,carbon stocks and carbon density of main forest types in Longjiang Forest Group

3.3 不同龄组碳储量和碳密度动态变化

森林碳储量和碳密度与林龄之间有密切的联系,乔木林的碳动态在很大程度上取决于林龄的变化。如图 4 所示,龙江森工的乔木林林龄偏小,以中龄林为主,2002 年和 2020 年,中龄林面积占乔木林总面积比例分别为 48.03% 和 63.04%,同期中龄林碳储量占乔木林碳储量比例分别为 52.54% 和 62.84%。2002 年幼龄林的面积和碳储量仅次于中龄林,但随着时间增加,面积和碳储量占比都呈现下降趋势,因为易造林地已基本造林,余下的可造林空间有限。2020 年近熟林占比相对于 2002 年有明显增长,面积和碳储量占比分布从 9.08% 和 15.23% 增加到 2020 年的 23.61% 和 20.33%,仅次于中龄林。

碳密度随着林龄的增加呈现明显上升趋势,幼、中龄林的碳密度显著低于近、成和过熟林的碳密度。与 2002 年相比,除过熟林外,2020 年的各林龄组林的碳密度高于 2002 年同林龄组林,中幼龄林的碳密度增加幅度大于近熟林和成熟林的增加幅度,过熟林 2020 年的碳密度小于 2002 年的碳密度,可能是由于林分密度过大导致林分质量下降,也有可能是不合理的经营措施或人为破坏和自然灾害等影响。

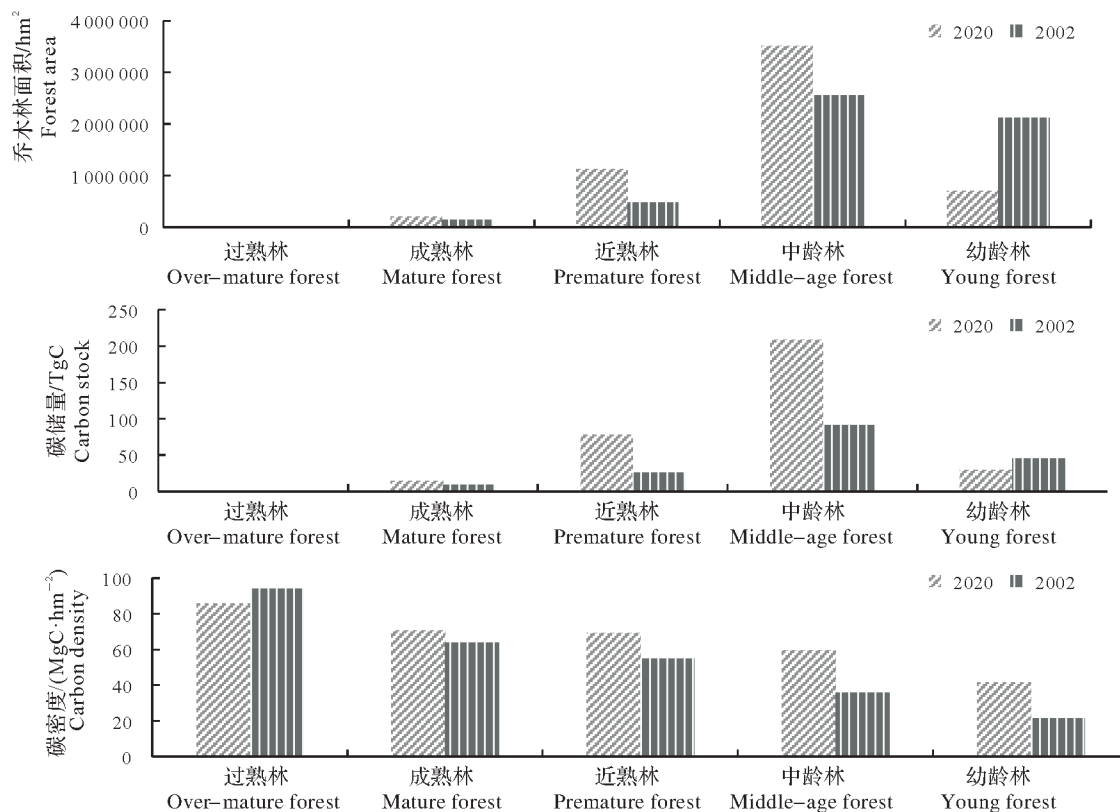


图4 龙江森工各龄组的乔木林的面积、碳储量和碳密度变化

Fig.4 Changes of forest area, carbon stocks and carbon density over age in Longjiang Forest Group

3.4 龙江森工乔木林植被碳储量预测

基于森林资源清查数据预测面积之和占比95%以上的9种森林类型未来几个时间节点碳库的变化情况,结果如图5所示。在没有成片砍伐森林或死亡的条件下,利用生物量密度随林龄变化模型按照以往的生长情况估算,现有森林的生物量碳库到2030年可以达到396.33 TgC,到2060年可以达到519.16 TgC,与2020年的相比分别增加了71.64 TgC和194.47 TgC,碳密度从2020年的58.64 MgC/hm²,分别增长到2030年的73.11 MgC/hm²和2060年的95.76 MgC/hm²。根据林龄增长,未来森林的碳库变化呈现新增幅度逐渐下降趋势,即碳汇能力逐渐降低,碳储量增长逐渐达平台期。

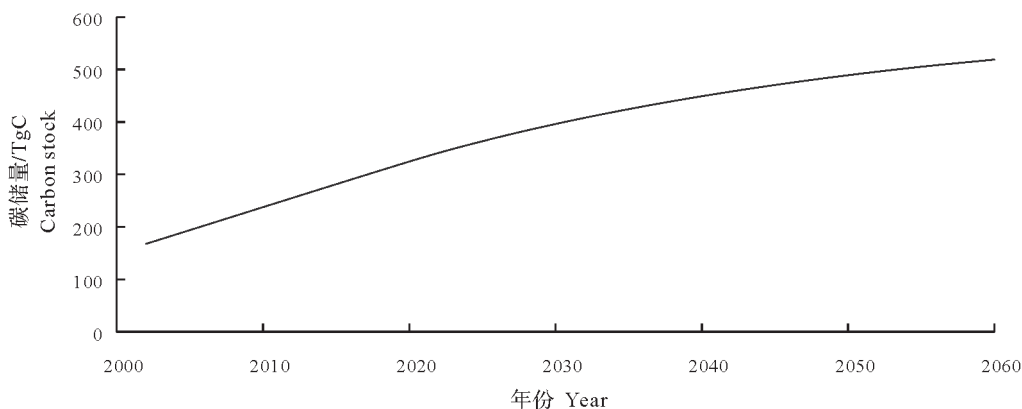
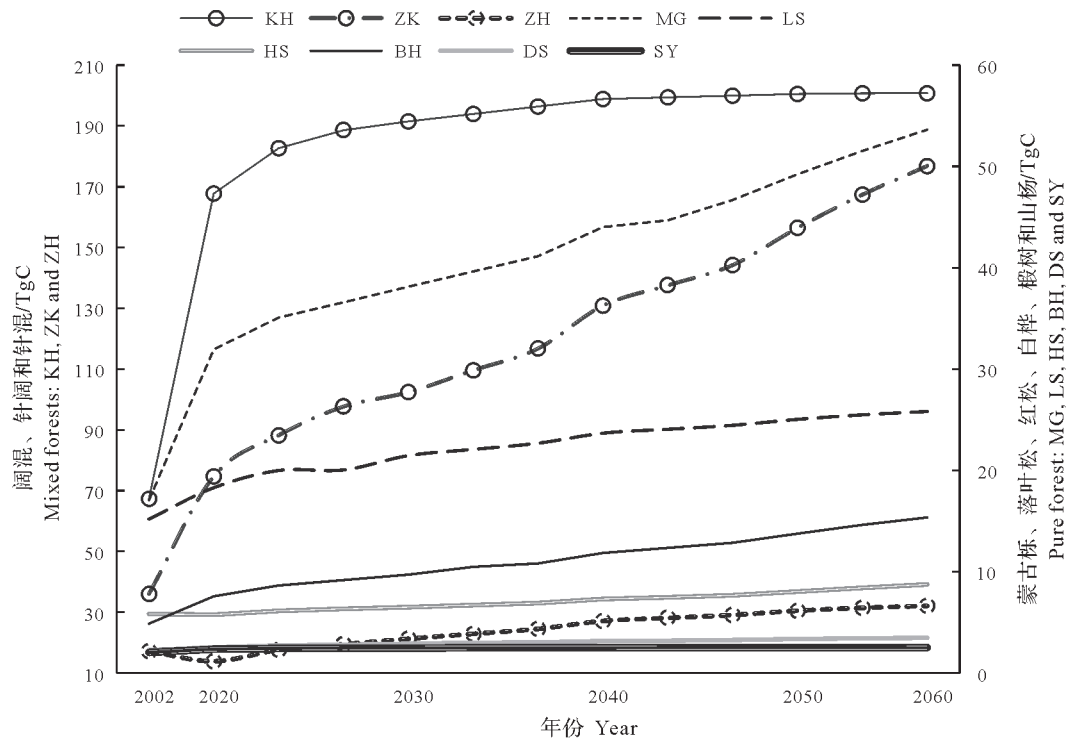


图5 龙江森工碳储量随时间变化情况

Fig.5 Changes of carbon stocks over time in Longjiang Forest Group

从主要森林类型的碳储量动态变化可以看出(图6),2020年后,林龄随着时间的增长而增加,总碳储量总体呈现增加趋势。其中阔叶混交林和针阔混交林是目前和未来龙江森工碳储量占比最多的林分,针阔混交林未来的增长幅度大于阔叶混交林,说明针阔混交林具有较大碳汇潜力;针叶混交林的生长速度较慢,预测结果碳储量波动范围比较小;纯林中蒙古栎林和白桦林不同龄级林分的碳密度之间差异较

大,且当前林龄级较小,因此呈现出相比于其他树种更大的增长趋势。但是绝大部分类型的林分已经从中龄林和近熟林长为成熟林,已经趋近其最大碳密度,因此若不采取增汇策略,则碳汇潜力空间有限,无法发挥出森林资源的最大优势。



SY山杨林;DS椴树林;BH白桦林;HS红松林;LS落叶松林;MG蒙古栎林;ZH针叶混交林;ZK针阔混交林;KH阔叶混交林。
SY *Poplar* forest;DS *Tilia* forest;BH *Betula* forest;HS *Pinus koraiensis* forest;LS *Larix* forest;MG *Quercus* forest;
ZH Mixed coniferous forest;ZK Mixed coniferous-broad forest;KH Mixed broad-leaved forest.

图6 龙江森工主要森林类型碳储量随时间变化情况

Fig.6 Changes of carbon stocks of main forest types over time in Longjiang Forest Group

4 森林植被固碳增汇提升策略分析

重点国有林区森林生态系统固碳增汇作为基于自然解决方案助力碳达峰碳中和目标实现的一个重要途径,目前研究认为通过保育现有森林资源、扩大新造林面积、提高森林质量和利用木质林产品固碳等方式^[44-46],可以多途径保碳、扩碳、增碳以及加强碳资源化利用,从而将生态系统碳汇转移到木质林产品中,推进森林生态系统碳储量与碳汇量协同提升。保碳主要是通过减少森林毁坏,保护生态系统,减少因毁林和森林退化造成的碳排放,防止或减少森林碳库损失。扩碳主要是通过加强造林绿化增加碳汇。增碳主要是通过加强再造林、退化林修复,加强森林抚育提高森林质量等方式,增强固碳能力^[47]。碳资源化利用主要指木质林产品的利用和生物质能源的发展。

4.1 保碳策略

近20年来,龙江森工森林生态系统得到了有效恢复,森林覆盖率、森林面积、森林蓄积和单位面积蓄积“四增长”,碳储量最高的前6个单位约占龙江森工总碳储量一半,是固碳增汇的核心,需加强日常管理和森林灾害防范以减少碳库损失。丰林林场等碳密度较高的单位拥有大片单位面积蓄积量高的天然红松混交林,且多处于碳密度最高的成熟林和过熟林阶段,这些单位可采取科学实施天然林保护修复制度,减少不合理的土地利用和破坏^[48]。穆棱林业局等碳储量增多明显的单位,通过转化四旁散生木、疏林和灌木为乔木林的方式实现单位面积蓄积量大幅增长,森林结构简单且中幼龄林多,因而抵御干扰的森林韧性不强,需要做好应急管理预案,增强森林抵御自然灾害的能力,保障已有碳储量不下降。

4.2 扩碳策略

从土地利用情况看,龙江森工近20年来积极造林,表现为2020年的乔木林面积相比于2002年大幅度扩大,增加约26.27万 hm^2 ,其占总面积之比从81.24%上升到84.69%,疏林地、灌木林地、未成林造林地、无立木造林地、宜林地和非林地面积均明显减少,当前龙江森工的无立木林地和宜林地面积之和仅占林地总面积的3.24%。龙江森工2020年的森林覆盖率为84.72%,高于全国重点林区的森林覆盖率平均水平80%,说明经过多年造林绿化,可新增造林的面积空间十分有限,剩余可绿化用地基本为困难立地,通过扩大森林面积增加森林碳汇的难度加大,造林成本高、成活率低^[49],因而通过扩碳增碳潜力有限,增汇工作重心可从增加森林面积逐渐转移到提升森林质量。

4.3 增碳策略

从乔木林林龄结构看,龙江森工以幼龄林、中龄林和近熟林为主,龄级低的林分具有较大的增碳潜力,因此亟需加强对幼龄林、中龄林和近熟林的管护力度和抚育水平,提升林分质量和林地生产力,从而提高其固碳增汇能力。从2020年和2002年的碳密度结果对比来看,过熟林处于碳流失状态,需要加强退化林地的修复工作,进行选择性的林木砍伐更新,及时修复林相残次的成熟林、过熟林,清理病腐和劣质林木,以提高森林更新速度,调整优化林龄结构,促进林区森林植被碳储量持续稳定增长。从优势树种来看,需要“适地适树、良种良法”,同时可加强高固碳能力树种的培育,如蒙古栎、落叶松等。当前龙江森工混交林比例上升,杨桦等天然次生林碳储量增加迅速,需要关注并扭转逆向演替趋势,将森林质量差的天然次生林恢复为地带性混交林,根据生长现状和疏密规律等合理调整林分密度、树种组成和通风透光条件^[50],及时采取森林间伐、修枝、补植等措施,适当延长轮伐期,持续提高森林质量和森林生态系统韧性。

4.4 碳资源化利用策略

森林通过光合作用将二氧化碳储存在木材中进行固定,森林经营后的小径级木材、枝桠材等资源可以充分利用发展生物质能源等^[51]。更重要的是通过大径材培育实现大径级木材采伐利用,并通过木质林产品延长碳的储存时间,有助于将森林生态系统碳汇向木质林产品碳库转移,这样既能为森林生态系统增汇提供空间,又不断增加木质林产品库的碳储量,促进双汇协同提升。

5 讨论与结论

5.1 讨论

上述研究结果显示,龙江森工重点国有林区森林植被总碳储量为333.43 TgC,若与张煜星等利用森林清查资料计算得出的全国森林资源碳储量8362 TgC^[34]相比,龙江森工森林植被碳储量约占全国森林资源碳储量的4%。如果与2020年黑龙江省森林植被碳储量为868.1 TgC的研究结论比较^[27],龙江森工的森林植被碳储量占了黑龙江省的38.41%,这与清查监测体系下测算得到的龙江森工重点国有林区森林蓄积量占黑龙江全省的比重非常接近(31.96%)。本研究对龙江森工重点国有林区估算的平均碳密度稍高于其他学者对黑龙江省进行的估算^[27],这种差异与研究区单位面积蓄积量略高于黑龙江全省单位面积蓄积量的实际情况相符,这表明笔者的估算结果在一定程度上具有科学可靠性。随着森林植被的持续增长,估测研究区的森林植被总固碳潜力在2030年为396.33 TgC,在2060年为519.16 TgC,即在现有碳储量基础上分别保有18.86%和55.70%的增长空间,说明龙江森工潜力巨大。

总体上,估测结果还存在一定的不确定性。影响不确定性的结果主要有以下几点:首先,目前可供造林的空间范围和面积数量较少,认为通过扩碳策略增碳的潜力不大,因此未将新造林地块碳储量纳入考虑。其次,龙江森工大部分森林为天然次生林,仍在进行林分改造和受损退化修复,但本研究没有考虑树种变化、森林经营强度调整、地形气候和人为干扰等因素。第三,受限于数据来源和研究方法精准性的限制,本研究没有考虑土壤、林下植被层、凋落物层及枯死木的碳储量。第四,本研究的预测模型是基于全国清查数据进行建模,部分方法参数也是采用国家级数据的参考值,可能会导致一定偏差。

5.2 结论

近20年来,龙江森工碳储量大幅增加,各树种的碳密度呈现显著增加趋势,应通过实施天然林保护修复,增强森林抵御灾害能力来保障已有碳储量不下降。乔木林为主要固碳主体,经过多年造林转化后可造林地几乎没有剩余,继续大范围造林难度很大,通过增加森林面积进行扩碳潜力有限。加强森林抚育,通过提高森林质量来增碳,这是目前最有潜力的增汇途径。龙江森工天然次生林占比多,需要将森林质量差的天然次生林恢复为地带性混交林。中幼林和近熟林为主,碳密度随着林龄的增加呈现明显上升趋势,但随着时间推移,碳汇能力逐渐下降,即使潜力很大,但采取增汇策略仍尤为紧迫。且2020年过熟林碳密度低于2002年过熟林碳密度,需及时修复退化林。针阔混交林和落叶松林的碳汇能力较强,可加强高固碳能力树种的培育。重视大径材培育采伐利用,进而延长木制林产品碳的储存时间,实现森林生态系统和木质林产品碳库协同增长。

参考文献 References:

- [1] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学(生命科学), 2022;1-41.
YANG Y H, SHI Y, SUN W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Scientia Sinica(vitae)*, 2022; 1-41.
- [2] 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.
ZHAO N, ZHOU L, ZHUANG J, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China [J]. *Acta ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [3] KRAMER P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production[J]. *Bioscience*, 1981, 31(1): 29-33.
- [4] 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.
ZHANG Y R, LIU X T, GAO W Q, et al. Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest Protection Project region for the past 20 years [J]. *Acta ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5093-5105.
- [5] KAUPPI P E, MIELIKAINEN K, KUUSELA K. Biomass and carbon budget of european forests, 1971 to 1990[J], *Science*, 1992, 256(5053): 70-74.
- [6] SEDJO R A. Temperate forest ecosystems in the global carbon cycle[J]. *Ambio*, 1992, 21(4): 274-277.
- [7] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [8] KEELING C D, CHIN J F S, WHORF T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements[J]. *Nature*, 1996, 382(6587): 146-149.
- [9] 沈文清,马钦彦,刘允芬.森林生态系统碳收支状况研究进展[J].江西农业大学学报, 2006, 28(2): 312-317.
SHEN W Q, MA Q Y, LIU Y F. Advances in research on carbon budgets of forest ecosystem [J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2006, 28(2): 312-317.
- [10] 胡鞍钢.中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. *Journal of Beijing university of technology (social sciences edition)*, 2021, 21(3): 1-15.
- [11] 尹晶萍,张煜星,付尧,等.中国碳排放与森林植被碳吸收潜力研究[J].林业资源管理, 2021(3): 53-61.
YIN J P, ZHANG Y X, FU Y, et al. The research of carbon emission and carbon sequestration potential of forest vegetation in China [J]. *Forest resources management*, 2021(3): 53-61.
- [12] 国家林业和草原局政府网.关于重点国有林区改革[EB/OL]. (2021-03-04)[2023-05-10]. www.forestry.gov.cn/main/72/20180824/174017154648604.html.
State Forestry and Grassland Administration Government Website. On the reform of key state-owned forest areas [EB/OL]. (2021-03-04)[2023-05-10]. www.forestry.gov.cn/main/72/20180824/174017154648604.html.
- [13] 许恩银,王维枫,聂影,等.中国林业碳贡献区域分布及潜力预测[J].中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 36-45.

- XU E Y, WANG W F, NIE Y, et al. Regional distribution and potential forecast of China's forestry carbon contributions[J]. China population, resources and environment, 2020, 30(5): 36-45.
- [14] 中国龙江森林工业集团有限公司. 森工简介[EB/OL]. (2018-06-30)[2023-08-22]. <http://ljforest.com.cn/gysg/sggk/sgjj/>. China Longjiang Forest Industrial Group General Company. Profile[EB/OL]. (2018-06-30)[2023-08-22]. <http://ljforest.com.cn/gysg/sggk/sgjj/>.
- [15] 李奇, 朱建华, 冯源, 等. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 287-294.
- LI Q, ZHU J H, FENG Y, et al. Carbon storage and carbon sequestration potential of the forest in China[J]. Climate change research, 2018, 14(3): 287-294.
- [16] 张煜星, 王雪军. 全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(2): 199-214.
- ZHANG Y X, WANG X J. Study on forest volume-to-biomass modeling and carbon storage dynamics in China[J]. Science sinica(vitae), 2021, 51(2): 199-214.
- [17] SPRENGEL L, SPIECKER H, WU S R. Two subject specific modelling approaches to construct base-age invariant polymorphic site index curves with varying asymptotes[J]. Silva Fennica, 2022, 56(1): 10544.
- [18] WALLIS C I B, CROFTS A L, INAMDAR D. Remotely sensed carbon content: the role of tree composition and tree diversity[J]. Remote sensing of environment, 2023, 284: 113333.
- [19] 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.
- ZHAO M M, ZHAO N, LIU Y, et al. An overview of forest carbon measurement methods[J]. Acta ecologica Sinica, 2019, 39(11): 3797-3807.
- [20] ANDERSON D E, VERMA S B, ROSENBERG N J. Eddy correlation measurements of CO₂, latent heat, and sensible heat fluxes over a crop surface[J]. Boundary-layer meteorol, 1984, 29: 263-272.
- [21] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292: 2320-2322.
- [22] 张春华, 王莉媛, 宋茜薇, 等. 1973—2013年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4678-4686.
- ZHANG C H, WANG L Y, SONG Q W, et al. Biomass carbon stocks and dynamics of forests in Heilongjiang Province from 1973 to 2013[J]. China environmental science, 2018, 38(12): 4678-4686.
- [23] 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 H K. 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.
- [24] 黄萍, 黄颖利, 李小强, 等. 森林碳汇资源开发潜力定量评价与研究: 以黑龙江省为例[J]. 资源开发与市场, 2012, 28(9): 786-788.
- HUANG P, HUANG Y L, LI X Q, et al. Quantitative evaluation and research of resource development potential of forest carbon taking Heilongjiang Province for example[J]. Resource development & market, 2012, 28(9): 786-788.
- [25] 姚平, 陈先刚, 周永锋, 等. 西南地区退耕还林工程主要林分50年碳汇潜力[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 3025-3037.
- YAO P, CHEN X G, ZHOU Y F, et al. Carbon sequestration potential of the major stands under the grain for green program in southwest China in the next 50 years[J]. Acta ecologica Sinica, 2014, 34(11): 3025-3037.
- [26] 李爱琴, 王会荣, 王晶晶, 等. 安徽省森林植被碳储量、碳密度动态及固碳潜力[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(5): 953-962.
- LI A Q, WANG H R, WANG J J, et al. Dynamic characteristics of forest carbon storage, carbon density and carbon sequestration potential in Anhui Province[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(5): 953-962.
- [27] 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.
- REN J Q, XIA J Y. Prediction of forest carbon sink potential in Heilongjiang Province: the carbon density-age relationship-based approach[J]. Research of environmental sciences, 2017, 30(4): 552-558.
- [28] 徐晋涛, 姜雪梅, 季永杰. 重点国有林区改革与发展趋势的实证分析[J]. 林业经济, 2006(1): 10-15.
- XU J T, JIANG X M, JI Y J. Empirical study of reform and development in the key state-owned forest area[J]. Forestry economics, 2006(1): 10-15.
- [29] 冯丹娃, 刘向越, 曹玉昆. “双碳”目标下重点国有林区后发优势研究[J]. 学习与探索, 2022(4): 148-152.
- FENG D W, LIU X Y, CAO Y K. Study on the backward-looking advantage of key state-owned forest areas under the “car-

- bon peaking and carbon neutrality goals”[J].Study & exploration,2022(4):148-152.
- [30] 续珊珊,贾利.黑龙江省森工国有林区森林碳储量分析[J].林业经济问题,2010,30(1):47-51.
XU S S, JIA L. Current situation and potential of forest carbon storage in forest industrial state-owned region of Heilongjiang Province[J].Issues of forestry economics,2010,30(1):47-51.
- [31] 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.
CHEN K Y, WANG J J, HE Y J, et al. Estimations of forest carbon storage and carbon sequestration potential of key state-owned forest region in Daxing'anling, Heilongjiang Province[J].Ecology and environmental sciences,2022,31(9):1725-1734.
- [32] 陈科屹,林田苗,王建军,等.天保工程20年对黑龙江大兴安岭国有林区森林碳库的影响[J].生态环境学报,2023,32(6):1016-1025.
CHEN K Y, LIN T M, WANG J J, et al. Effects of natural forest conservation project on forest carbon pool of key state-owned forest region of Daxing'anling, Heilongjiang Province in the past 20 Years[J].Ecology and environmental sciences,2023,32(6):1016-1025.
- [33] 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
State Forestry and Grassland Administration. Forest and grassland resources and ecological status in China 2021 [M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2022.
- [34] 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.
ZHANG Y X, WANG X J, PU Y, et al. Changes in forest resource carbon storage in China between 1949 and 2018[J].Journal of Beijing forestry university,2021,43(5):1-14.
- [35] 徐新良,曹明奎,李克让.中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J].地理科学进展,2007(6):1-10.
XU X L, CAO M K, LI K R. Temporal- spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China[J].Progress in geography,2007(6):1-10.
- [36] 魏文俊,王兵,李少宁,等.江西省森林植被乔木层碳储量与碳密度研究[J].江西农业大学学报,2007,29(5):767-772.
WEI W J, WANG B, LI S N, et al. Carbon storage and density of tree stratum in forests in Jiangxi Province[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2007,29(5):767-772.
- [37] 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.
National Forestry and Grassland Administration. Guideline on carbon stocks accounting in forest ecosystem: LY/T 2988—2018[S]. Beijing: Standards Press of China,2018.
- [38] 国家发展和改革委员会应对气候变化司.中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M].北京:中国经济出版社,2013:110.
National Development and Reform Commission Climate Change Department. The People's Republic of China second national communication on climate change[M]. Beijing: Economic Press China,2013:110.
- [39] 国家气候变化对策协调小组办公室,国家发展和改革委员会能源研究所.中国温室气体清单研究[M].北京:中国环境科学出版社,2007.
National Climate Change Response Coordination Group Office, Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. The People's Republic of China national greenhouse gas inventory[M]. Beijing: China Environment Publishing Group,2007.
- [40] 国家发展和改革委员会.碳汇造林项目方法学:AR-CM-001-V01[S].北京:中国标准出版社,2013.
National Development and Reform Commission. Methodology for carbon sink afforestation projects: AR-CM-001-V01[S]. Beijing: Standards Press of China,2013.
- [41] 付晓,张煜星,王雪军.2060年前我国森林生物量碳库及碳汇潜力预测[J].林业科学,2022,58(2):32-41.
FU X, ZHANG Y X, WANG X J. Prediction of forest biomass carbon pool and carbon sink potential in China before 2060[J]. Scientia silvae Sinicae,2022,58(2):32-41.
- [42] 徐晋涛,易媛媛.“双碳”目标与基于自然的解决方案:森林碳汇的潜力和政策需求[J].农业经济问题,2022(9):11-23.
XU J T, YI Y Y. Nature-based solutions in meeting China's dual—carbon goal: the potential of forest and policy needs[J].Is-

- sues in agricultural economy, 2022(9):11-23.
- [43] 徐冰,郭兆迪,朴世龙,等.2000—2050年中国森林生物量碳库:基于生物量密度与林龄关系的预测[J].中国科学:生命科学,2010,40(7):587-594.
- XU B, GUO Z D, PIAO S L, et al. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: a prediction based on forest biomass-age relationships[J]. *Scientia Sinica (vitae)*, 2010, 40(7): 587-594.
- [44] 邹晓明,王国兵,葛之葳,等.林业碳汇提升的主要原理和途径[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(6):167-176.
- ZOU X M, WANG G B, GE Z W, et al. Mechanisms and methods for augmenting carbon sink in forestry[J]. *Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition)*, 2022, 46(6): 167-176.
- [45] 肖文发,朱建华,曾立雄,等.森林碳汇助力碳中和的几点认识[J].林业科学,2023,59(3):1-11.
- XIAO W F, ZHU J H, ZENG L X, et al. Several perspectives on forest carbon sink for promoting carbon neutrality[J]. *Scientia silvae Sinicae*, 2023, 59(3): 1-11.
- [46] 简尊吉,朱建华,王小艺,等.我国陆地生态系统碳汇的研究进展和提升挑战与路径[J].林业科学,2023,59(3):12-20.
- JIAN Z J, ZHU J H, WANG X Y, et al. Research progress and the enhancement challenges and pathways of carbon sinks in China's terrestrial ecosystems[J]. *Scientia silvae Sinicae*, 2023, 59(3): 12-20.
- [47] 国家林业和草原局政府网.天然林保护始终坚持以人民为中心[EB/OL].(2021-07-30)[2023-06-08].<http://www.forestry.gov.cn/c/www/trlgcj/93383.jhtml>.
- State Forestry and Grassland Administration government website. Natural forest protection is always people-centered [EB/OL]. (2021-07-30) [2023-06-08]. <http://www.forestry.gov.cn/c/www/trlgcj/93383.jhtml>.
- [48] 刘世荣,庞勇,张会儒,等.中国天然林资源保护工程综合评价指标体系与评估方法[J].生态学报,2021,41(13):5067-5079.
- LIU S R, PANG Y, ZHANG H R, et al. Evaluation indicator system and method designed for natural forest protection program of China[J]. *Acta ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5067-5079.
- [49] 刘世荣,缪宁,张远东,等.岷江上游退化森林的保护、修复与展望[J].陆地生态系统与保护学报,2022,2(5):95-101.
- LIU S R, MIAO N, ZHANG Y D, et al. Protection, restoration, and prospects of degraded forests in the upper reaches of the Minjiang River in China[J]. *Terrestrial ecosystem and conservation*, 2022, 2(5): 95-101.
- [50] 李婷婷,吴水荣,王林龙,等.国内外混交林研究进展[J].世界林业研究,2022,35(5):42-48.
- LI T T, WU S R, WANG L L, et al. Progress in national and international research on mixed Forest[J]. *World forestry research*, 2022, 35(5): 42-48.
- [51] 张超,孟贵,吴水荣,等.中美林业生物质能源资源、产业及政策体系比较[J].林业科技通讯,2022(6):11-16.
- ZHANG C, MENG G, WU S R, et al. Comparison of forestry biomass energy resources, industries and policy systems between China and the United States[J]. *Forest science and technology*, 2022(6): 11-16.