

辽宁省森林碳汇及其经济价值的变化分析与潜力预测

张丽薇, 吕明洋, 马晓晨, 张栩嘉

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年10月23日; 录用日期: 2024年12月27日; 发布日期: 2025年1月6日

摘要

森林生态系统在全球范围内扮演着关键角色, 作为主要的碳库, 其生物体和土壤中积聚了庞大的碳量。本研究利用1998年至2018年间辽宁省的森林资源清查数据, 结合生物量转换因子连续函数法与市场价值法, 全面分析了辽宁省森林的碳储量、碳汇能力以及它们所带来的经济价值。并利用GM(1, 1)灰色预测模型预测辽宁省森林碳汇发展潜力, 进而得到碳达峰目标年的预估值。结果表明: 本文基于1998~2018年辽宁省森林数据, 分析了森林碳储量、碳汇现状及其经济价值, 并预测了碳达峰年2023年的预估值。研究结果表明, 幼龄林和中龄林的碳储量占据了最大的比例, 而成熟林的碳汇量在2009年至2013年间达到了最高点1.91 Tg C/a。各优势种碳储量整体增加, 但碳汇量变化无明显规律。天然林碳汇量下降, 人工林上升。灌木林的碳储量有所增长, 而经济林的碳储量则出现了减少。预计2023年乔木林面积 $5.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 碳储量267.06 Tg C, 碳汇量8.35 Tg C/a, 碳汇经济价值 $8.67 \times 10^7 \text{ 元/a}$ 。

关键词

辽宁省, 碳储量, 碳汇量, 森林碳汇, 森林碳汇经济价值

Analysis and Potential Prediction of Forest Carbon Sequestration and Its Economic Value in Liaoning Province

Liwei Zhang, Mingyang Lyu, Xiaochen Ma, Xujia Zhang

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Oct. 23rd, 2024; accepted: Dec. 27th, 2024; published: Jan. 6th, 2025

Abstract

The forest ecosystem plays a key role on a global scale, acting as major carbon reservoirs, with huge

文章引用: 张丽薇, 吕明洋, 马晓晨, 张栩嘉. 辽宁省森林碳汇及其经济价值的变化分析与潜力预测[J]. 自然科学, 2025, 13(1): 31-41. DOI: 10.12677/ojns.2025.131004

amounts of carbon accumulating in its biomass and soils. This article analyzes the forest carbon storage and carbon sequestration status and economic value of Liaoning Province from 1998 to 2018, based on forest inventory data, using the biomass conversion factor continuous function method and market value method. It also predicts the development potential of forest carbon sequestration in Liaoning Province using the GM (1, 1) grey prediction model, leading to an estimated value for the carbon peak year. The results show that the carbon storage of young and middle-aged forests accounts for the largest proportion, with mature forests reaching a peak carbon sequestration of 1.91 Tg C/a during 2009~2013. The carbon storage of various dominant species has generally increased, but the carbon sequestration has no clear pattern. The carbon sequestration of natural forests is declining, while that of plantation forests is increasing. The carbon storage of shrub forests has increased annually, while that of economic forests has decreased. It is estimated that by the carbon peak year of 2023, the area of arbor forests in Liaoning Province will reach $5.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$, with a carbon storage of 267.06 Tg C, a carbon sequestration of 8.35 Tg C/a, and an economic value of $8.67 \times 10^7 \text{ yuan/a}$.

Keywords

Liaoning Province, Carbon Stocks, Carbon Sinks, Forest Carbon Sink, Economic Value of Forest Carbon Sin

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

近年来,温室气体排放增加导致全球气温上升,引发海平面上升、冰川退缩等问题。自1990年代《京都议定书》签署后,碳汇问题开始受到关注。习近平总书记在第七十五届联合国大会上宣布,“有关二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。至此“双碳”目标已经成为中国经济社会发展的重大战略目标。森林作为陆地上最大的碳库,具有较高的碳积累速度,碳吸收潜力巨大,通过林业措施增加森林碳吸收是达成“碳中和”的重要路径之一,最经济、最直接、最便捷的“碳中和”方式[1],在吸收二氧化碳和减缓全球气候变暖方面也起着重要作用。与减少化石燃料使用相比,森林碳汇的减排成本更低。精确计算森林的碳储存量和其经济价值对于制定有效的应对气候变化策略至关重要[2]。研究森林碳汇有助于认识其价值,发挥其经济效益,对保护生态、实现碳中和目标和改善气候条件、减缓全球变暖具有重要意义[3]。

在森林碳汇的研究中,科学家们运用了多种计算技术,包括生物量法和蓄积量法等。由于国家森林清查数据具有权威性、详尽性和高精度度,生物量转换因子连续函数法因此被广泛采用,成为一种简便且可信的手段,用于评估特定区域的森林碳储量[4]。目前,关于森林碳汇的研究成果丰富,但针对辽宁省的研究较少且部分较旧。多数研究集中在森林植被碳储量和碳汇评估,对森林碳汇经济价值及其预测的研究较少。

辽宁省,新中国重工业基地,被誉为“共和国长子”,其装备制造业、冶金、石化等重化工产业在经济发展中长期重要[5]。新中国成立以来,辽宁省重工业发展过度,导致能耗和能源消费量大。在“双碳目标”下,辽宁省面临严峻的碳减排任务。该省生态系统多样,森林、湿地、草地资源丰富,这些生态资源的碳汇是减排的关键手段。探索森林生态系统的碳汇能力对于推进减排策略至关重要。本研究采用生物量转换因子连续函数法,对1999年至2018年间辽宁省森林的碳储量、碳汇量及其经济价值的变化进

行了深入分析，从而全面揭示了辽宁省森林的碳储量、碳汇现状、动态变化及其经济价值。并利用 GM (1, 1)灰色预测模型预测辽宁省森林碳汇发展潜力，研究成果有望为辽宁省发挥森林碳汇实力、潜力研究提供重要科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

辽宁省坐落在中国东北的南部区域，拥有温带季风气候特征，年平均气温介于 7 至 11 摄氏度之间，年均降水量大约为 680 毫米。该地区地形特征表现为北部较高而南部较低，山地和丘陵主要分布在东西两侧，中部则是一片广阔的平原。辽宁省的森林资源相当丰富，但分布并不均衡，主要可以划分为辽东山区、辽中南平原沿海地区以及辽西北这三个主要的林业生态区域[6]，辽宁省东部山区的森林覆盖率相对较高，而全省的森林覆盖率达到到了 42%，林业用地面积约为 634.4 万公顷，其中大约一半是人工林。

2.2. 数据来源

根据森林法中的森林定义，森林包括了乔木林、竹林和国家特别规定的灌木林，通常作为森林碳储和碳汇的计量范畴[7]，本文研究基于辽宁省 1999~2018 年四期国家森林清查数据，由国家林业局每五年进行的普查活动提供，具有权威性和准确性。本文研究以及辽宁省的实际情况，研究对象包括乔木林、灌木林、疏林和经济林(见表 1)。

Table 1. Area and stock of different forest vegetation types in Liaoning Province from 1999 to 2018

表 1. 1999~2018 年辽宁省森林不同植被类型的面积和蓄积量

时期 Period	乔木林 Arbor forest		灌木林 Shrub forest	疏林 Sparse forest	经济林 Economic forest
	面积 Area/104 hm ²	蓄积量 Volume/104 m ³	面积 Area/104 hm ²	面积 Area/104 hm ²	面积 Area/104 hm ²
	Area/104 hm ²	Volume/104 m ³	Area/104 hm ²	Area/104 hm ²	Area/104 hm ²
1999~2003	322.57	17476.57	22.75	5.69	141.53
2004~2008	361.34	20226.85	58.74	5.65	122.24
2009~2013	389.62	25046.29	74.88	4.10	127.59
2014~2018	425.56	29749.18	181.68	3.78	104.55

2.3. 研究方法

2.3.1. 碳储量的计算方法

乔木林使用生物量转换因子连续函数法[4]来估算不同优势树种的生物量[8]。对于灌木林、疏林和经济林，首先计算其平均生物量密度，其次将其与面积[8]相乘来得到生物量，最后将生物量乘以相应的含碳系数[9]来估算碳储量。公式为：

$$B = V \times BEF \times X \tag{1}$$

$$BEF = a + \frac{b}{V} \tag{2}$$

$$B_i = Ba_i \times X_i \tag{3}$$

$$C = B \times CF \tag{4}$$

其中， B 为生物量， V 为优势树种单位面积的蓄积量， BEF 为生物量转换因子， X 为面积， a 、 b 为转换参数。 a 、 b 的取值一般采用 Fang 等[4]的研究结果，但该取值存在取样较少和林龄偏小的不足[10]，因此

具有一定的不确定性。本文采用 Zhang 等[11]基于多个实测数据改进的转换参数(见表 2)。i = 1, 2, 3 分别表示灌木林、疏林和经济林, Ba_i 表示第 i 类植被的平均生物量密度, 灌木林、疏林和经济林分别取值 13.14 Mg C/hm²、13.14 Mg C/hm² 和 23.7 Mg C/hm² [8]。C 为碳储量, CF_i 为含碳系数[9], 灌木林、疏林和经济林的含碳系数取 0.50 [12]。

Table 2. Conversion parameters and carbon content coefficient of biomass and stock of various tree species [3]
表 2. 各树种生物量与蓄积量的转换参数和含碳系数[3]

树种类型 Tree species	参数 Parameters		R2	CF
	a	b		
冷杉 Abies	0.3933	56.65	0.8015	0.4999
云杉 Picea	0.3933	56.65	0.8015	0.5208
落叶松 Larix	0.6079	17.062	0.8948	0.5211
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	0.4691	24.659	0.8511	0.5113
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	0.5162	18.293	0.8357	0.5223
赤松 <i>Pinus densiflora</i>	0.5162	18.293	0.8357	0.5141
栎类 Quercus	0.7848	16.715	0.9542	0.5004
桦木属 Betula	0.8101	11.682	0.8815	0.4914
水胡黄 <i>Fraxinus mandshurica</i> 、 <i>Juglans mandshurica</i> 、 <i>Phellodendrom amurense</i>	1.0394	2.3728	0.7516	0.4827
硬阔类 a、软阔类 b Hardwoods、softwoods	0.8918	28.441	0.8103	0.4834
椴树 Tilia	0.7564	8.3103	0.9800	0.4392
杨树 Populus	0.6251	11.462	0.8537	0.4956
针叶混交林 Mixed coniferous	0.7442	26.806	0.7026	0.5101
阔叶混交林 Mixed broad leaf forest	0.7393	43.21	0.7314	0.4900
针阔混交林 Mixed coniferous and broad leaf forest	0.4385	52.905	0.7179	0.4978

注: a 硬阔类包括榆树、枫香和其他硬阔类; b 软阔类包括柳树和其他软阔类。

2.3.2. 碳汇量和碳汇经济价值的计算

森林碳汇量是指一定时期内森林碳储量和前一时期森林碳储量的差值与两者之间时间长度的比值 [13], 公式为:

$$CS = \frac{C_T - C_{T-1}}{T - (T-1)} \tag{5}$$

其中, CS 表示碳汇量, C_T 表示 T 时间的碳储量, C_{T-1} 表示 T-1 时间的碳储量。

本文采用市场价值法[14]计算森林碳汇价值量, 森林碳汇经济价值是森林碳汇量与其单位价格的乘积。公式为:

$$VA = CS \times P \tag{6}$$

VA 表示森林碳汇经济价值, P 表示森林碳汇单位价格。本文森林碳汇单位价格参考北京环境交易所 2019 年林业碳汇交易平均单价 10.93 元/吨[3]。

2.3.3. 森林碳汇量的预测方法

本文利用 GM (1, 1) 灰色预测模型来预估碳达峰年 2030 年辽宁省的森林面积和碳储量, 进而预测 2030 年辽宁省森林的碳汇量和碳汇经济价值。

3. 结果

3.1. 乔木林的碳储量和碳汇量

3.1.1. 不同龄组碳储量和碳汇量

森林碳储量和碳汇量与林龄密切相关。根据图 1 分析可知, 辽宁省各龄组林面积与林龄成反比, 幼龄林面积最大, 2014~2018 年达 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。幼龄林和中龄林碳储量占 55% 以上, 但占比下降。除 2004~2008 年中龄林碳储量显著下降外, 其他龄组碳储量整体上升。不同龄组碳密度变化不大, 2004~2008 年近熟林碳密度略降, 从 59.48 降至 49.25 Mg C/hm^2 , 表明此时期近熟林结构和质量可能下降。除中龄林之外其余的各龄组林在 1999~2018 年间的碳汇量都大于零, 其峰值在 2009~2013 间的成熟林, 平均值为 1.91 Tg C/a 。不同龄组林碳汇量变化各异, 2009~2013 年中龄林和成熟林碳汇量上升, 后中龄林平缓、成熟林下降。幼龄林的碳汇量持续增长, 最高达到 1.43 Tg C/a , 这表明辽宁省可能正在增加新的树木种植。中龄林显示出较强的抗干扰能力, 其碳汇量也在不断上升。如果中龄林和幼龄林能够持续生长, 那么它们未来的碳汇潜力将是巨大的。近熟林碳汇量下降至 0.16 Tg C/a , 碳密度也下降, 表明近熟林可能遭破坏林分质量下降。

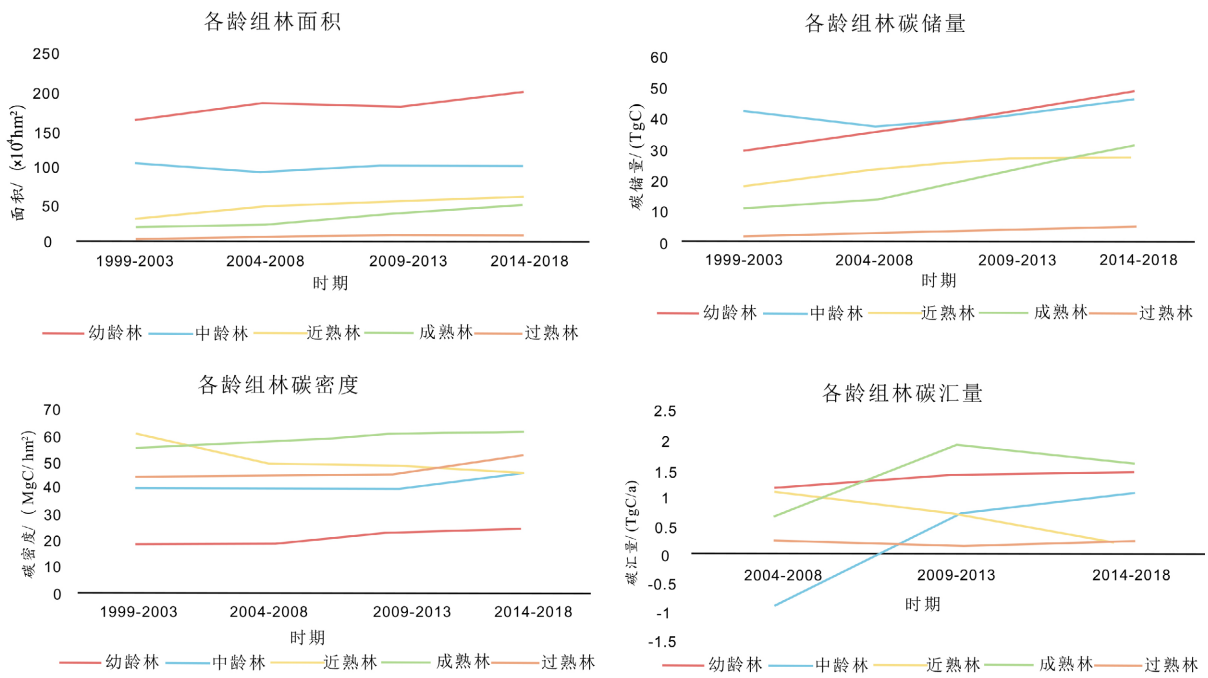


Figure 1. Dynamics of carbon area, carbon storage, density and carbon sink in various age groups of forest in Liaoning Province from 1999 to 2018

图 1. 辽宁省乔木林 1999~2018 年度各年龄组碳面积、碳储量、密度、碳汇动态

3.1.2. 各优势树种的碳储量和碳汇量

根据图 2 分析可知, 1999~2018 期间辽宁省乔木林中占地面积最大的是阔叶混交林, 占辽宁省乔木林面积的 23.1%~26.4%。落叶松、红松、油松、栎类、硬阔类、杨树、软阔类、针叶混交林、阔叶混交林的碳储量在 1999~2018 年整体处于增加状态, 阔叶混交林的碳储量涨幅最大, 在 2014~2018 年达到了最大值

63.14 Tg C，大部分优势树种的碳密度随时间的推移呈增加趋势，其中黑松的碳密度最大，涨幅也最大，其他部分优势种碳储量也有增加，但上涨不大。阔叶混交林碳汇量最大，2004~2008 年、2009~2013 年、2014~2018 年分别为 0.78、3.35、0.96 Tg C/a。落叶松、红松、栎类、杨树、针叶混交林、阔叶混交林、软阔类碳汇量均大于 0，其余优势种有负值。硬阔类在 2009~2013 年碳汇量最低，为-0.74 Tg C/a。

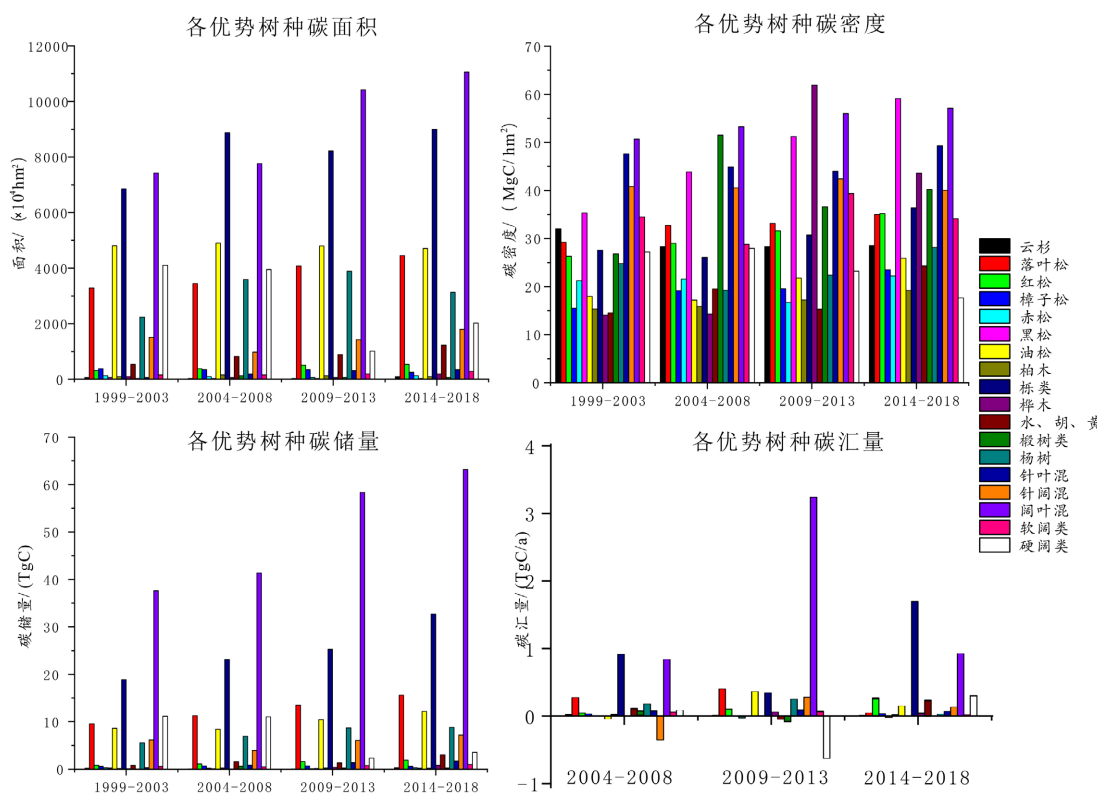


Figure 2. Changes in area, carbon storage, carbon density and carbon sink of dominant tree species in Liaoning Province during 1999~2018
图 2. 1999~2018 年辽宁省乔木林各优势树种的面积、碳储量、碳密度和碳汇量的变化

3.1.3. 不同起源的碳储量和碳汇量

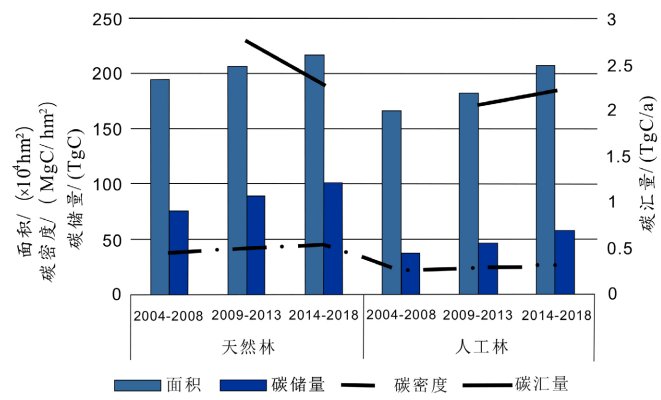


Figure 3. Changes in area, carbon storage, carbon density and carbon sink of natural and planted forests in Liaoning Province from 2004 to 2018
图 3. 2004~2018 年辽宁省天然林和人工林的面积、碳储量、碳密度和碳汇量的变化

乔木林按不同的起源划分为天然林和人工林[15]。近些年随着国家逐渐重视环境保护,辽宁省拥有大面积的人工林,辽宁省的人工林与天然林的面积一直相差无几(见图 3)。在 2004~2018 年间,人工林和天然林面积逐年增长,涨幅不大,天然林增 $2.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 人工林增 $4.14 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。碳密度和碳储量逐年增加,天然林碳储量多于人工林。1999~2018 年,天然林碳储量平均多 40.7 Tg C, 但碳汇量下降,从 2.76 Tg C/a 降至 2.29 Tg C/a, 而人工林从 2.08 Tg C/a 增至 2.23 Tg C/a。辽宁省的天然林和人工林的碳汇量保持相对稳定,没有显著的变化。

3.2. 灌木林、疏林和经济林的碳储量和碳汇量

从 1999~2018 年的数据上来看,经济林的面积占比香蕉疏林和灌木林更大,但增长并不明显,疏林面积一直保持稳定,而灌木林的面积则逐年增长,在 2014~2018 年增长最大,增长率为 27.4% (见图 4)。经济林碳储量下降,从 16.77 Tg C 降至 12.39 Tg C; 疏林碳储量小降; 灌木林碳储量随面积增加而增加,从 1.49 Tg C 增至 11.93 Tg C, 增长近十倍。疏林碳汇量始终为负,经济林仅在 2009~2013 年为正,表明辽宁省对经济林和疏林管理不足,未能有效利用其碳汇潜力。灌木林碳汇量始终为正且呈上升趋势。

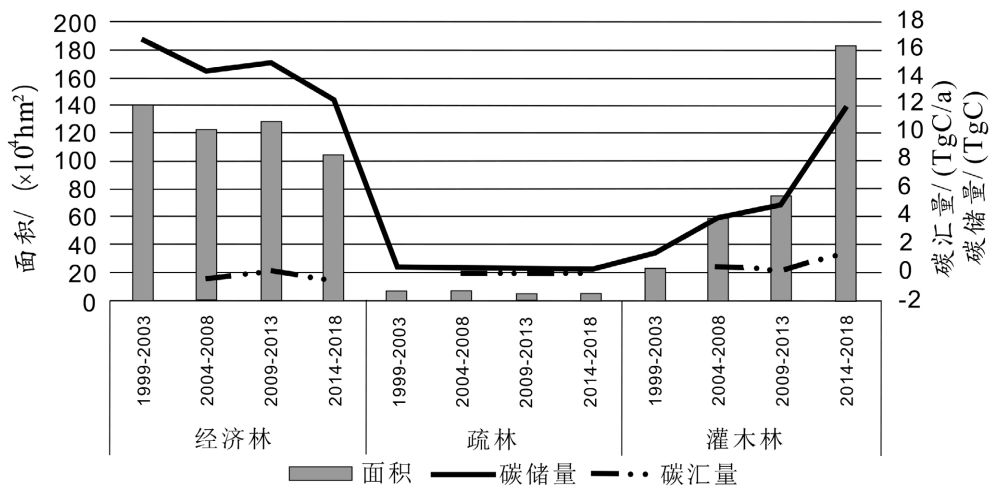


Figure 4. Changes in area, carbon storage and carbon sink of shrubland, sparse forest and economic forest in Liaoning Province from 1999 to 2018

图 4. 1999~2018 年辽宁省灌木林、疏林和经济林的面积、碳储量和碳汇量变化

3.3. 森林的碳汇经济价值

在清查研究期间,辽宁省各年林结构的乔木林的碳汇经济值呈现波动上升趋势(见图 5)。2014~2018 年幼龄林、中龄林、成熟林的经济值均大于 2004~2008 年,中龄林经济价值由负转正。幼龄林和成熟林的平均碳汇经济价值较高,分别为 1.44×10^7 元/a 和 1.51×10^7 元/a。落叶松等多数树种经济价值波动上涨,其他树种呈下降趋势(见图 6)。以 2009~2013 年为例,落叶混交林的碳汇经济值为 3.71×10^7 元/a。天然林碳汇经济价值下降,人工林小幅度上升(见图 7)。在 2014~2018 年,天然林和人工林的经济价值接近,分别为 22.5×10^7 元/a 和 2.43×10^7 元/a。2004~2018 年,经济林和疏林的碳汇经济值持续下降,经济林在 2009~2013 年为正,其他年份为负,疏林始终为负。灌木林的碳汇经济值大幅增长,2014~2018 年达 1.19×10^7 元/a (见图 8)。研究数据表明,辽宁省森林碳汇的经济价值部分出现了下降趋势,这就警示着我们要注意森林的生态环境是否健康以及现有的管理方式是否合理。

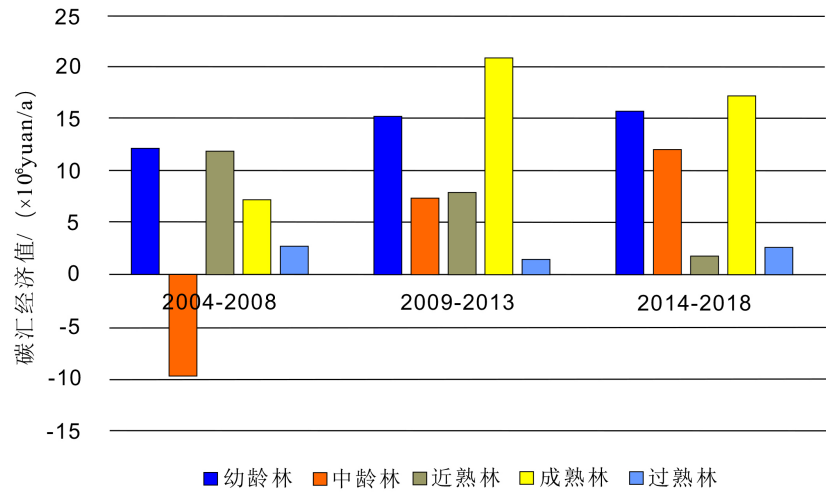


Figure 5. Economic value of carbon sink of each age group of forest in Liaoning Province from 2004 to 2018
图 5. 2004~2018 年辽宁省乔木林各龄组的碳汇经济价值

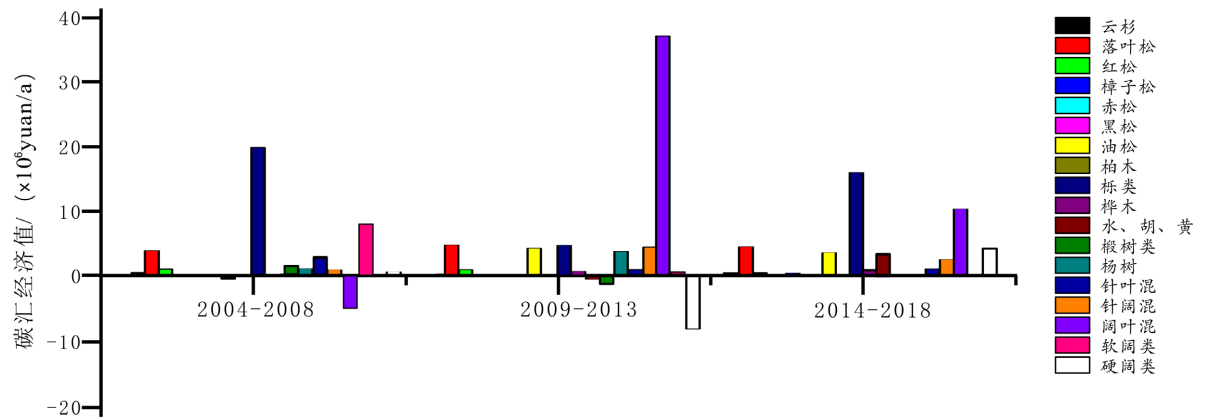


Figure 6. Carbon sink economic value of dominant tree species in Liaoning Province from 2004 to 2018
图 6. 2004~2018 年辽宁省乔木林各优势树种的碳汇经济价值

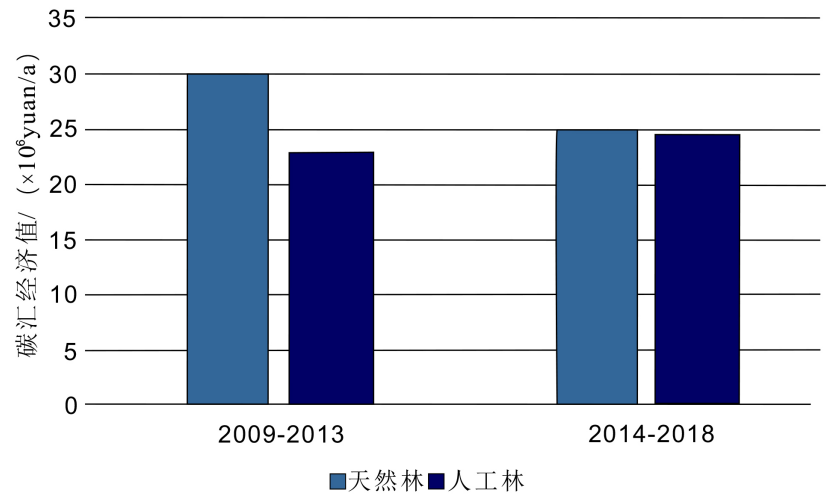


Figure 7. Economic value of carbon sink by origin of forest in Liaoning Province, 2009~2018
图 7. 2009~2018 年辽宁省乔木林各起源的碳汇经济价值

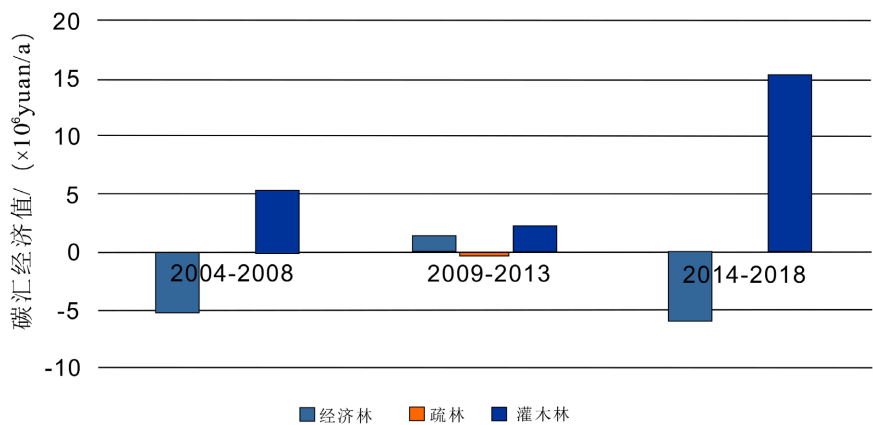


Figure 8. Economic value of carbon sink of shrubland, sparse forest and economic forest in Liaoning Province from 2004 to 2018

图 8. 2004~2018 年辽宁省灌木林、疏林和经济林的碳汇经济价值

3.4. 森林碳汇潜力分析

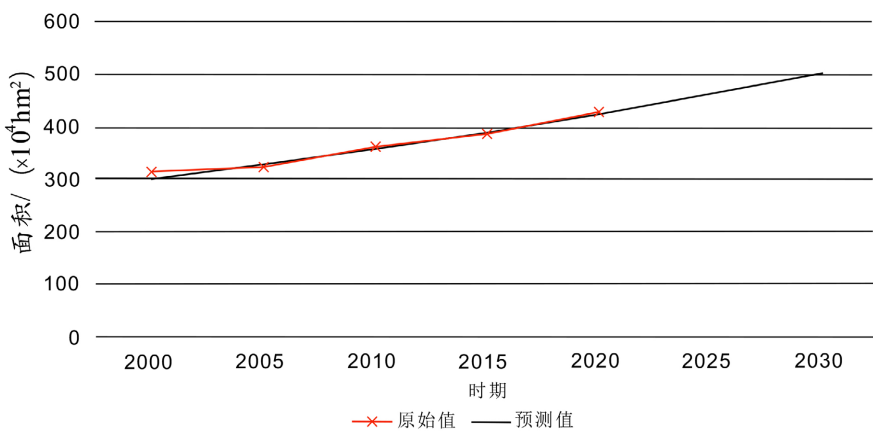


Figure 9. Actual and predicted values of forest area in Liaoning Province in 2030

图 9. 2030 年辽宁省乔木林面积的实际值与预测值

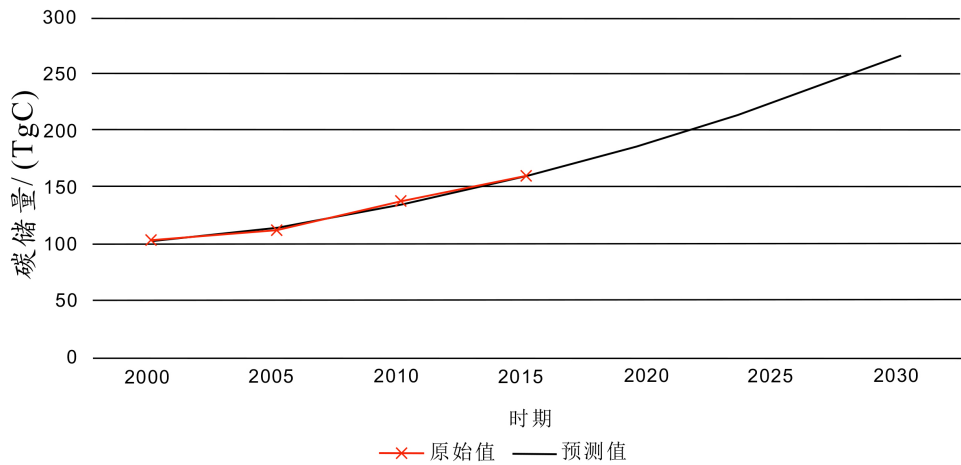


Figure 10. Actual and predicted carbon stocks of forest in Liaoning Province in 2030

图 10. 2030 年辽宁省乔木林碳储量的实际值与预测值

本研究运用 Excel 进行数据整理, 并采用 GM(1,1)灰色预测模型来预测辽宁省乔木林在 2030 年碳达峰年的面积和碳储量变化趋势。对预测结果进行分析检验, 在“碳达峰”年, 辽宁省乔木林面积预测结果的平均相对误差为 0.97%, 碳储量预测模型的平均相对误差为 0.06%, 两者误差结果均小于 1%, 各后验方差比值 C 为 0.1 和 0.05, 均小于 0.35, 说明预测模型结果较为精确, 达到一般标准, 预测结果可信。通过预测, 在不考虑自然因素、政策改变以及其他非人为因素, 按照当前预测结果, 辽宁省的乔木林发展前景很好, 乔木林的面积和碳储量也在逐年增加, 预计在 2030 年乔木林的面积可达到 $5.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (见图 9), 碳储量可达到 267.06 Tg C (见图 10), 此时碳汇量和碳汇经济价值预计为 8.35 Tg C/a 和 8.67×10^7 元/a。

4. 讨论

辽宁省作为中国重要的工业中心, 过去由于重工业的迅猛发展, 对自然环境造成了损害。十二五后, 东北森林生态系统开始恢复, 辽宁大规模种植新林, 乔木林碳储量增加。乔木林碳储量和碳汇量高于灌木林、疏林和经济林。需维持乔木林优势, 同时稳定灌木林碳储量, 优化经济林树种, 提升其功能。辽宁省的乔木林碳储量增长速率低于全国平均水平, 这主要是由于幼龄林和中龄林占据了较大的面积比例。因此, 应采取措施保护幼龄林, 并提高林分的整体质量, 以增强其固碳能力。天然林是碳储量主体, 但碳密度下降, 需调整林分结构以增强碳汇能力。人工林碳密度稳步增加, 应维持其质量。同时, 应提升乔木林经济价值, 改善经济林和疏林的经济价值, 避免负值。

5. 结论

深入研究森林的碳储存量和碳吸收能力, 对于我国在预定时间内达成“双碳”目标至关重要, 同时对于促进绿色可持续发展和高品质发展也具有重大价值。此外, 评估森林碳汇的经济价值对于发展森林生态经济以及改善当前的交易状况同样具有重要意义[16]。研究森林碳汇经济价值有助于发展森林生态经济, 改善交易现状。本文基于 1999~2018 年辽宁省森林资源数据, 估算森林碳汇和碳储量, 并根据 2019 年林业碳汇交易单价评估其经济价值。现得出主要结论如下:

(1) 辽宁省森林碳储量从 1999~2003 年的 102.23 Tg C 增至 2014~2018 年的 160.12 Tg C, 预计碳达峰年将达 267.06 Tg C。人工林和天然林对碳汇贡献各占一半, 阔叶混交林是主要贡献者, 碳汇量最高, 达 0.96 Tg C/a。多数优势种碳密度随时间增长。

(2) 各龄组森林碳储量随时间增加, 幼龄林面积占比下降, 但其碳储量和碳汇量持续增长, 表明其林分质量未降。近熟林碳汇减少, 品质亟待提高。中龄林碳汇量在 2009~2013 年转正, 显示其质量提升。

(3) 辽宁省森林碳汇经济价值从 2004~2008 年的 2.30×10^7 元/a 增至 2014~2018 年的 4.69×10^7 元/a, 平均每年增加 2.01 亿元, 但单位面积碳汇量的经济增幅不大。灌木林是主要碳汇经济来源, 2014~2018 年其值达 1.53×10^7 元/a。

辽宁省应基于气候和生态条件进行森林规划和管理, 加强土壤碳积累研究, 针对不同森林类型制定研究方法, 提升中龄林和近熟林质量, 完善树种结构, 保护天然林, 增加优质森林面积以发挥碳汇潜力。同时, 政府需宣传森林碳汇和“双碳”目标, 提高公众低碳意识, 促进公众参与碳减排和林业碳汇增加行动[17]。为提升辽宁森林碳汇经济价值, 应发展森林碳汇市场, 建立交易平台, 丰富交易渠道和方法, 并学习其他省份经验, 实现森林生态产品价值化[18]。要挖掘辽宁省森林潜在价值, 发挥其碳汇能力, 引入人才研究碳汇交易和产业。同时, 考虑城市绿化对碳汇经济价值的影响, 以更精确计算并深化辽宁省碳汇经济。

在预测研究中, 本文未考虑自然、社会和人为因素, 辽宁省土地资源有限, 森林面积增长受限, 结

果存在不确定性。预测森林面积和碳储量的标准较宽松,可能存在误差,未来研究需进一步完善。

参考文献

- [1] 王文霞, 何桂梅, 徐林, 张超群. 浙江省林业碳汇推动实现“碳中和”的实践进展[J]. 林业科技通讯, 2024(2): 11-16.
- [2] 张春华, 居为民, 王登杰, 王希群, 王昕. 2004-2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [3] 徐思若, 成志影, 那雪迎, 张栩嘉, 马大龙, 张鹏. 黑龙江省森林碳汇及其经济价值的变化分析与潜力预测[J]. 生态学杂志, 2024(1): 197-205.
- [4] 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>
- [5] 张慧东, 云丽丽, 颜廷武. 辽宁省森林植被全口径碳汇碳中和能力研究[J]. 辽宁林业科技, 2023(6): 1-5.
- [6] 赵晓敏. 碳中和背景下辽宁林业面临的机遇与挑战[J]. 辽宁林业科技, 2022(4): 65-67.
- [7] 刘世荣, 王晖, 李海奎, 余振, 栾军伟. 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.
- [8] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [9] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [10] Pan, Y., Luo, T., Birdsey, R., Hom, J. and Melillo, J. (2004) New Estimates of Carbon Storage and Sequestration in China's Forests: Effects of Age Class and Method on Inventory-Based Carbon Estimation? *Climatic Change*, **67**, 211-236. <https://doi.org/10.1007/s10584-004-2799-5>
- [11] Zhang, C., Ju, W., Chen, J.M., Zan, M., Li, D., Zhou, Y., *et al.* (2013) China's Forest Biomass Carbon Sink Based on Seven Inventories from 1973 to 2008. *Climatic Change*, **118**, 933-948. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0666-3>
- [12] Fang, J., Guo, Z., Piao, S. and Chen, A. (2007) Terrestrial Vegetation Carbon Sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **50**, 1341-1350. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0049-1>
- [13] 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.
- [14] 张娟, 陈钦. 森林碳汇经济价值评估研究——以福建省为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 121-128.
- [15] 刘领, 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 赵威. 基于森林清查资料的河南省森林植被碳储量动态变化[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 864-873.
- [16] 黄凯旋. “双碳”背景下森林碳汇功能及展望[J]. 辽宁林业科技, 2024(1): 51-54+61.
- [17] 蒙平珠, 王文棣, 吴玉泽. “双碳”背景下甘肃省森林碳汇经济价值估算研究[J]. 生产力研究, 2023(6): 55-59.
- [18] 姜韬, 赵济川, 胡博, 尚晶, 王琦, 刘红民. 辽宁省森林碳汇市场潜力分析[J]. 辽宁林业科技, 2023(1): 53-56.