



黑龙江省主要乔木林类型碳储量及碳汇能力

韩泽华 李国春 刘丹丹 王维芳

Carbon storage and carbon sink capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province of northeastern China

Han Zehua, Li Guochun, Liu Dandan, Wang Weifang

引用本文:

韩泽华, 李国春, 刘丹丹, 王维芳. 黑龙江省主要乔木林类型碳储量及碳汇能力[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11):10–23. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230343

Han Zehua, Li Guochun, Liu Dandan, Wang Weifang. Carbon storage and carbon sink capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(11):10–23. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230343

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230343>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于NbS的北京市乔木林固碳能力分析

Carbon sequestration capacity of Beijing arbor forest based on NbS

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13–22. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200145>

天然次生林碳储量生长模型与固碳能力驱动力研究

Growth model of carbon storage and driving force of carbon sequestration capacity of natural secondary forests

北京林业大学学报, 2023, 45(1): 1–10. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210265>

北京市森林碳汇能力评价

Evaluation of forest carbon sequestration capacity in Beijing

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 108–119. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220436>

碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究

Forest carbon sequestration potential in China under the background of carbon emission peak and carbon neutralization

北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38–47. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210143>

阔叶红松林乔木地上碳储量和碳增量对采伐强度的响应

Responses of tree aboveground carbon storage and carbon increment to logging intensity in a broadleaved Korean pine forest

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 23–32. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220403>

1949—2018年中国森林资源碳储量变化研究

Changes in forest resource carbon storage in China between 1949 and 2018

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1–14. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200237>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230343

黑龙江省主要乔木林类型碳储量及碳汇能力

韩泽华¹ 李国春² 刘丹丹³ 王维芳¹

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省自然资源权益调查监测院, 黑龙江 哈尔滨 150070;

3. 攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要:【目的】黑龙江省是中国的林业大省,在碳达峰、碳中和战略中占有重要地位,估算全省主要乔木林类型的碳储量和碳汇能力,旨在为黑龙江省未来的森林经营提供理论支持。【方法】基于黑龙江省主要乔木林类型的固定样地数据,计算样地碳密度,并运用空间代替时间法构建各类乔木林的林龄-碳密度的生长曲线,结合黑龙江省森林面积数据估算基准年和目标年各类乔木林各龄组的碳密度和碳储量。对各类样地按 10 年间隔进行分级,计算每级碳密度最高值与平均值之差,得到该级现实固碳潜力,利用样地数量加权计算得到该乔木林类型的总现实固碳潜力,并对计算结果进行分析。【结果】(1)黑龙江省乔木林碳储量总量为 878.73 Tg,其中中龄林和近熟林的碳储量占比最大,分别为 37.85% 和 24.21%,乔木林总平均碳密度为 52.599 t/hm²,总现实固碳潜力为 27.719 t/hm²。(2)主要乔木林类型中,起始年份 2015 年时阔叶混交天然林总碳储量的占比最大,其次是蒙古栎天然林,分别占 44.65% 和 17.02%;2060 年碳储量最大的两个类型没有变化,但碳储量占比有所下降。2015 年总平均碳密度最大的两类乔木林依次是蒙古栎天然林和阔叶混交天然林,总平均碳密度为 82.545 和 60.699 t/hm²。2060 年总平均碳密度最大的两类是蒙古栎天然林和山杨天然林,总平均碳密度分别为 103.659 和 92.255 t/hm²。(3)各类乔木林中,山杨天然林、针叶混交人工林和樟子松人工林碳密度增长速度较高,到 2060 年时较起始年份的碳密度增长值分别为 36.805、40.505、40.809 t/hm²。(4)各类乔木林的总现实固碳潜力中,阔叶混交天然林的总现实固碳潜力最高,为 31.536 t/hm²,人工林中针阔混交人工林总现实固碳潜力最高,为 27.674 t/hm²,各龄组中中龄林的总现实固碳潜力最高,为 29.179 t/hm²。【结论】本研究估算了黑龙江省主要乔木林 2015 年各类型各龄组的碳密度、碳储量和现实固碳潜力以及未来 2060 年时的碳密度、碳储量。对于碳储量和现实固碳潜力高、同时未来碳密度增长量较低的乔木林类型如阔叶混交天然林、针阔混交人工林等,应加强对林分的抚育以促进其碳密度增长。未来的新造林规划应在满足适地适树等条件的前提下,更多地选取未来碳密度增长量较高的人工林类型,如樟子松人工林、针叶混交人工林等,天然林的更新规划应以山杨天然林等未来碳密度增长量较高的天然林类型为重点。该结论对未来黑龙江省森林碳汇经营具有一定的理论指导意义。

关键词: 森林经营; 碳储量; 碳密度; 黑龙江; 固碳潜力

中图分类号: S757 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)11-0010-14

引文格式: 韩泽华, 李国春, 刘丹丹, 等. 黑龙江省主要乔木林类型碳储量及碳汇能力 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11): 10-23. Han Zehua, Li Guochun, Liu Dandan, et al. Carbon storage and carbon sink capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11): 10-23.

Carbon storage and carbon sink capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province of northeastern China

Han Zehua¹ Li Guochun² Liu Dandan³ Wang Weifang¹

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Heilongjiang Provincial Natural Resources Rights and Interests Investigation and
Monitoring Institute, Harbin 150070, Heilongjiang, China;

3. Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

收稿日期: 2023-11-28 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271867)。

第一作者: 韩泽华。主要研究方向: 森林经理。Email: 1596147239@qq.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学林学院。

责任作者: 王维芳, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林可持续经营及森林碳汇计量。Email: weifangwang@nefu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Abstract: [Objective] Heilongjiang Province in northeastern China is a major forestry province of China, which plays an important role in strategy of carbon peaking and carbon neutrality. The estimation of carbon storage and carbon sequestration capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province can provide theoretical support for future forest management of Heilongjiang Province. [Method] Carbon density was calculated based on the fixed sample plot data of major arbor forest types in Heilongjiang Province, and forest age-carbon density growth curves of various arbor forests were constructed by spatial-temporal method. Based on forest area data of Heilongjiang Province, the carbon density and carbon storage of each age group of various arbor forests in Heilongjiang Province were estimated in base year and target year. The sample plots were classified according to the 10-year interval, and the current carbon sequestration potential of each class was obtained by calculating the difference between the highest value and the average value of carbon density of each class. The average total current carbon sequestration potential of each arbor forest type was calculated by weighting of the number of sample plots, and the calculation results were analyzed. [Result] (1) The total carbon storage of arbor forest in Heilongjiang Province was 878.73 Tg, in which the proportion of carbon storage of middle-aged forest and near-mature forest was the largest, accounting for 37.85% and 24.21%, respectively. The total average carbon density was 52.599 t/ha, and total current carbon sequestration potential was 27.719 t/ha. (2) Among the major arbor forest types, broadleaved mixed nature forest accounted for the largest proportion of total carbon storage in 2015, followed by *Quercus mongolica* natural forest, accounting for 44.65% and 17.02%, respectively. In 2060, the two types with the largest carbon storage did not change, but the proportion of carbon storage declined. In 2015, the two arbor forests with the highest total average carbon density was *Quercus mongolica* natural forest and broadleaved mixed natural forest, with carbon density of 82.545 and 60.699 t/ha. The two forests with the highest total average carbon density in 2060 were *Quercus mongolica* natural forest and *Populus davidiana* natural forest, with carbon density of 103.659 and 92.255 t/ha, respectively. (3) Among all kinds of arbor forests, *Populus davidiana* natural forest, coniferous mixed plantation, and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation had higher carbon density growth, and compared with the initial year, carbon density growth value of 2060 was 36.805, 40.505 and 40.809 t/ha, respectively. (4) The total current carbon sequestration potential of all kinds of arbor forest was the highest in broadleaved mixed natural forest (31.536 t/ha), and the highest was mixed coniferous and broadleaved plantation (27.674 t/ha). In all age groups, the total current carbon sequestration potential of middle-aged forest was the highest of 29.179 t/ha. [Conclusion] This study estimates the carbon density, carbon storage and current carbon sequestration potential of various age groups of major types of arbor forest in Heilongjiang Province from 2015 to 2060. For those arbor forests with high carbon storage and real carbon sequestration potential, but low carbon density growth in the future, such as broadleaved mixed natural forest and mixed coniferous and broadleaved plantation, it is necessary to strengthen the forest tending to promote the carbon density growth. The future new afforestation planning should be based on the conditions of suitable land and trees, and selecting more plantation types with higher carbon density growth in the future, such as *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and coniferous mixed plantation, etc. The renewal of natural forests should also focus on natural forest types with higher carbon density growth in the future, such as *Populus davidiana* natural forest. The conclusion can provide theoretical guidance for forest carbon sink management in Heilongjiang Province in the future.

Key words: forest management; carbon storage; carbon density; Heilongjiang Province; carbon sequestration potential

自工业革命以来, 全球环境受到了严重的破坏。有国际组织总结了当今十大环境问题, 其中全球变暖位居首位^[1]。目前主流观点认为, 大气中二氧化碳浓度增加导致了全球变暖^[2]。为了遏制全球变

暖, 世界各国签订了包括《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》《哥本哈根协议》《巴黎协定》在内的多项公约, 这些公约根据多种因素对世界各国应承担的减排责任和采取的减排措施提出了建议^[3-6]。

中国为了应对气候变化,在2020年提出了碳达峰、碳中和“双碳”战略目标,确立了减排增汇的战略规划^[7]。陆地碳库包括森林、土壤、湿地等,在全球碳循环中发挥着重要作用,也是全球碳库中人类最容易干涉的部分。森林占陆地面积比例约30%,森林植被生物量约占全球植被生物量的80%^[8],每年固碳量约占陆地生态系统总固碳量的65%左右^[9],是陆地碳库中碳汇能力最强的部分。森林在减缓大气温室效应过程中发挥了重要作用,是应对气候变化影响的关键。

碳汇是从大气中清除CO₂的过程或机制,森林碳汇能力是指森林从大气中吸收、固定碳的能力。森林碳储量和固碳潜力研究是森林碳汇能力研究的基础,对相关理论研究有着重要意义。森林碳储量估算是森林碳储量研究的基础^[10],当前研究中对森林碳储量的估算方法主要有样地清查法、微气象学法、遥感估算法和模型模拟法^[11],这4种方法分别基于样地清查数据、微气象监测数据、遥感数据和数学、生理过程等模型模拟结果对碳储量进行估算,4种方法各有其优势和不足之处。样地清查法经典可靠,对技术要求较低,但也有工作量大等缺点;微气象学法估算精度较高,但技术成本高,计算尺度较小^[12];遥感估测法适合大尺度计算^[13],但存在一定偏差,在计算时需要与实地数据结合进行校正;模型模拟法^[14]同样适用于大尺度估计,但精度依赖于模型的准确性。在研究中,需要结合数据量、覆盖范围等特点,选择合适的方法提升碳储量的估算精度,从而提升整体研究的精度。森林固碳潜力是森林碳汇增长能力的体现,对于森林碳汇工作规划有着重要意义。目前学术界对固碳潜力有多种定义。于贵瑞等^[15]将生态系统在特定条件下可能达到的固碳能力和基准情况下的固碳能力的差值定义为固碳潜力;Keith等^[16]将森林生态系统在一般环境条件自然干扰下所能达到的最大碳储量与现实碳储量(包括人为干扰)之间的差别定义为固碳潜力;李斌等^[17]将固碳潜力分为现实固碳潜力和未来固碳潜力两部分,现实固碳潜力为各龄组中以样地最大碳密度为标准估算的碳储量与现有碳储量的差值,未来固碳潜力指以同龄组单位面积最高年净固碳量为标准,估算现有林分达到成熟林时固碳量的变化量。前人基于对不同情景的设想提出多种固碳潜力定义,后继工作者可根据研究条件选取合适的方法以提升研究的准确性。通过对森林碳储量和固碳潜力的估算和分析,从而对森林碳汇能力进行研究分析。

黑龙江省拥有全国最大的国有林区^[18],其森林经营工作在未来“双碳”战略中占据重要地位。本文

以黑龙江省主要乔木林类型为研究对象,建立林龄-碳密度生长曲线模型,预测未来乔木林的碳密度和碳储量,并估算乔木林的现实固碳潜力,从未来碳密度、碳储量和现实固碳潜力的角度分析乔木林碳汇能力。基于研究结果,为未来“双碳”战略规划中黑龙江现有林分的抚育及新造林树种的选择提供理论参考。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

黑龙江省位于中国东北部(121°11′~135°05′E, 43°25′~53°33′N),省内地貌复杂,地形崎岖,主要由山地、台地、平原和水面构成。黑龙江省森林资源丰富,是中国林业大省。黑龙江省林地面积总计2 617万hm²,居全国第4位;森林面积2 150万hm²,居全国第3位;森林覆被率达47.3%,居全国第9位。林业资源主要分布于大小兴安岭、长白山脉和完达山,省内东部、北部都有大量森林分布。

1.2 研究数据

基于黑龙江省内固定样地数据进行碳储量的计算和研究,并结合第九次全国森林资源清查黑龙江省森林面积数据估算全省乔木林碳储量。第九次全国森林资源清查黑龙江省于2015年完成,故而本研究起始年份为2015年^[19]。本研究收集了黑龙江省内5 582块固定样地数据,其中幼龄林样地1 676块、中龄林2 342块、近熟林986块、成熟林490块、过熟林88块。样地主要分布于省内中部和东南部,调查时间集中在2010、2012和2013年。样地调查因子包括样地所处区域、坐标、地理特征、土壤特征、植被类型、平均年龄、平均胸径、平均树高、郁闭度等,每木检尺数据包括各立木树种、胸径、树高等。根据优势树种对样地进行分类,仅选取样地数量超过40块的乔木林类型作为研究对象,共11种类型,分别为落叶松(*Larix* spp.)人工林、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林、蒙古栎(*Quercus mongolica*)天然林、椴树(*Tilia tuan*)天然林、桦木(*Betula* spp.)天然林、山杨(*Populus davidiana*)天然林、杨类(*Populus* spp.)人工林、针阔混交人工林、针叶混交人工林、珍贵阔叶混交天然林和阔叶混交天然林。其中落叶松人工林样地513块,樟子松人工林204块,蒙古栎天然林1 185块、椴树天然林99块、桦木天然林359块、山杨天然林76块、杨类人工林64块、针阔混交人工林293块、针叶混交人工林90块、珍贵阔叶混交天然林49块、阔叶混交天然林2 650块。样地数据基本信息见表1,不同乔木林类型各龄组的样地数量、面积等信息见表2。

表 1 样地基本信息
Tab. 1 Basic information of sample plots

乔木林类型 Arbor forest type	项目 Item	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	株密度/(株·hm ⁻²) Plant density/(tree·ha ⁻¹)	年龄/a Age/year
落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	最大值 Max. value	31.9	25.0	4 050	55
	最小值 Min. value	5.3	1.0	183	6
	平均值 Mean value	14.2	11.5	1 130	26
	标准差 SD	6.0	4.1	660	11
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	最大值 Max. value	33.1	19.5	3 617	55
	最小值 Min. value	5.3	3.1	233	6
	平均值 Mean value	18.3	11.1	1 130	32
	标准差 SD	5.1	2.7	607	9
蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	最大值 Max. value	49.5	19.9	4 633	106
	最小值 Min. value	5.1	1.4	167	5
	平均值 Mean value	12.6	10.0	1 629	39
	标准差 SD	5.2	3.0	809	16
椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	最大值 Max. value	30.2	17.7	3 233	75
	最小值 Min. value	7.0	5.2	217	9
	平均值 Mean value	14.8	12.0	1 386	40
	标准差 SD	4.0	2.4	590	11
桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	最大值 Max. value	40.6	21.0	3 117	74
	最小值 Min. value	5.7	3.9	200	8
	平均值 Mean value	12.6	11.4	938	32
	标准差 SD	4.7	2.9	542	13
山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	最大值 Max. value	36.4	23.2	3 883	58
	最小值 Min. value	5.7	4.0	200	8
	平均值 Mean value	15.3	12.9	1 453	27
	标准差 SD	7.5	3.9	748	11
杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	最大值 Max. value	23.1	18.7	1 483	45
	最小值 Min. value	5.9	3.5	183	5
	平均值 Mean value	11.4	9.0	711	12
	标准差 SD	4.6	3.6	362	10
针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	最大值 Max. value	40.4	18.8	4 283	110
	最小值 Min. value	5.7	5.0	200	9
	平均值 Mean value	15.8	11.9	1 523	35
	标准差 SD	6.3	3.0	700	16
针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	最大值 Max. value	43.9	22.0	3 717	105
	最小值 Min. value	6.2	4.6	233	9
	平均值 Mean value	17.9	12.1	1 303	37
	标准差 SD	5.9	3.3	610	15
珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	最大值 Max. value	34.8	18.4	1 783	90
	最小值 Min. value	6.9	8.4	217	15
	平均值 Mean value	17.0	13.2	973	47
	标准差 SD	6.3	2.5	374	21
阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	最大值 Max. value	65.6	30.0	4 467	95
	最小值 Min. value	5.2	2.0	167	3
	平均值 Mean value	15.6	11.8	1 328	39
	标准差 SD	6.6	3.1	633	15

1.3 研究方法

1.3.1 乔木林碳储量计算方法

本研究选择样地清查法中的生物量经验模型法

计算生物量, 基于生物量经验估计模型(公式 1)和含碳率计算各立木生物量和碳储量, 立木碳储量相加并除以样地面积得到样地碳密度。模型各系数取

表 2 各龄组基本信息

Tab. 2 Basic information of each age group

乔木林类型 Arbor forest type	龄组 Age group	样地数量 Sample plot number	龄组划分标准/a Age group division criteria/year	龄组面积/(10 ⁴ hm ²) Age group area/(10 ⁴ ha)
落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	幼龄林 Young forest	184	1 ~ 20	17.58
	中龄林 Middle aged forest	137	21 ~ 30	123.08
	近熟林 Near-mature forest	149	31 ~ 40	34.20
	成熟林 Mature forest	43	41 ~ 60	26.24
	过熟林 Overmature forest	0	> 60	19.84
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	幼龄林 Young forest	19	1 ~ 20	1.92
	中龄林 Middle aged forest	61	21 ~ 30	5.12
	近熟林 Near-mature forest	100	31 ~ 40	2.56
	成熟林 Mature forest	24	41 ~ 60	1.28
	过熟林 Overmature forest	0	> 60	0.64
蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	幼龄林 Young forest	401	1 ~ 40	24.88
	中龄林 Middle aged forest	547	41 ~ 60	44.08
	近熟林 Near-mature forest	132	61 ~ 80	34.79
	成熟林 Mature forest	98	81 ~ 120	55.74
	过熟林 Overmature forest	7	> 120	21.67
椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	幼龄林 Young forest	55	1 ~ 40	2.55
	中龄林 Middle aged forest	41	41 ~ 60	12.15
	近熟林 Near-mature forest	3	61 ~ 80	4.14
	成熟林 Mature forest	0	81 ~ 120	0.96
	过熟林 Overmature forest	0	> 120	0.32
桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	幼龄林 Young forest	198	1 ~ 30	88.51
	中龄林 Middle aged forest	146	31 ~ 50	86.31
	近熟林 Near-mature forest	12	51-60	68.69
	成熟林 Mature forest	3	61 ~ 80	51.76
	过熟林 Overmature forest	0	> 80	6.07
山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	幼龄林 Young forest	25	1 ~ 20	11.50
	中龄林 Middle aged forest	30	21 ~ 30	12.16
	近熟林 Near-mature forest	14	31 ~ 40	5.75
	成熟林 Mature forest	7	41 ~ 60	14.08
	过熟林 Overmature forest	0	> 60	1.28
杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	幼龄林 Young forest	46	1 ~ 10	1.91
	中龄林 Middle aged forest	5	11 ~ 15	2.56
	近熟林 Near-mature forest	3	16 ~ 20	2.53
	成熟林 Mature forest	3	21-30	1.60
	过熟林 Overmature forest	7	> 30	5.09
针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	幼龄林 Young forest	75	1 ~ 40	26.56
	中龄林 Middle aged forest	117	41 ~ 60	88.93
	近熟林 Near-mature forest	75	61 ~ 80	45.09
	成熟林 Mature forest	23	81 ~ 120	18.22
	过熟林 Overmature forest	3	> 120	4.79
针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	幼龄林 Young forest	16	1 ~ 20	4.48
	中龄林 Middle aged forest	24	21 ~ 30	22.08
	近熟林 Near-mature forest	35	31 ~ 40	1.60
	成熟林 Mature forest	13	41 ~ 60	0.32
	过熟林 Overmature forest	2	> 60	0.32
珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	幼龄林 Young forest	21	1 ~ 40	6.40
	中龄林 Middle aged forest	19	41 ~ 60	8.64
	近熟林 Near-mature forest	1	61 ~ 80	1.92
	成熟林 Mature forest	8	81 ~ 120	1.28
	过熟林 Overmature forest	0	> 120	0
阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	幼龄林 Young forest	636	1 ~ 40	119.24
	中龄林 Middle aged forest	1 215	41 ~ 60	302.14
	近熟林 Near-mature forest	462	61 ~ 80	139.31
	成熟林 Mature forest	268	81 ~ 120	61.17
	过熟林 Overmature forest	69	> 120	24.58

值见参考文献 [20–28], 各乔木林类型含碳率取值见参考文献 [20–21, 27]。

$$B = c_0 D^{k_0} \quad (1)$$

式中: c_0 和 k_0 是与森林类型相关的模型系数, D 为立木胸径, B 为立木生物量。

一些乔木类型未查阅到整体生物量公式, 以树木部分生物量公式相加得到立木整体生物量, 其中落叶松人工林中的少量天然林立木和杨类人工林以地上、地下两部分相加得到整体生物量。

$$B = c_1 D^{k_1} + c_2 D^{k_2} \quad (2)$$

式中: c_1 、 k_1 为地上部分的模型系数, c_2 、 k_2 为地下部分的模型系数, 系数与树种相关。

樟子松人工林中的少量樟子松天然林立木以根、茎、叶、干 4 部分相加得到整体生物量。

$$B = c_3 D^{k_3} + c_4 D^{k_4} + c_5 D^{k_5} + c_6 D^{k_6} \quad (3)$$

式中: c_3 、 k_3 为根部分的模型系数, c_4 、 k_4 为茎部分的模型系数, c_5 、 k_5 为叶部分的模型系数, c_6 、 k_6 为干部分的模型系数, 系数与树种相关。

1.3.2 乔木林生长曲线的构建和检验方法

根据样地碳密度和林龄数据, 采用空间代替时间法构建各乔木林类型林龄–碳密度生长曲线模型, 估算碳密度和碳储量。曲线模型构建完成后, 根据龄组划分表确定龄组平均年龄, 代入生长曲线计算该龄组的平均碳密度, 并以对应龄组的面积乘以对应平均碳密度得到起始年份 2015 年乔木林碳储量数据。

本研究利用 SPSS22.0 软件进行曲线模型拟合, 并用 Origin2019 软件绘制曲线图。结合前人研究结论, 选取 Logistic、Gompertz 和 Bertalanffy 3 种 S 形生长曲线类型。

Logistic:

$$Y = \frac{A}{1 + (BAk^t)} \quad (4)$$

Gompertz:

$$Y = Ae^{-Be^{(-kt)}} \quad (5)$$

Bertalanffy:

$$Y = A(1 - Be^{-kt})^3 \quad (6)$$

式中: Y 为碳密度估计值, A 、 B 和 k 为通过拟合得到的与树种类型相关的曲线系数, t 为年龄。

将样本按照 3:1 的比例划分为拟合样本和检验样本, 以拟合样本进行曲线拟合, 检验样本进行曲线检验。采用 R^2 值评估模型的拟合效果, 并用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(rRMSE)评价模型的预测效果。在 3 种曲线中,

首先选取 R^2 较高的类型, 若 R^2 相同, 则选取 MAE、RMSE、rRMSE 这 3 项指标较低的曲线类型。

通过 Kolmogorov-Smirnov 检验(简称 D 检验)和 Shaprio-Wilk 检验(简称 W 检验)对模型进行残差正态性检验, 一般认为 D 值和 W 值都大于 0.05 时说明数据符合正态分布。

1.3.3 乔木林未来碳储量及现实固碳潜力计算

利用模型估算得到起始年份黑龙江省各乔木林类型各龄组的碳密度和碳储量, 将目标年和起始年年份差值加在各龄组平均年龄上, 并重新代入曲线模型, 估算目标年各龄组的平均碳密度, 乘以对应乔木林类型龄组的面积得到目标年碳储量。考虑到进入成熟林阶段后, 乔木林碳密度增速随年龄增长会大幅减缓, 并且成熟林将会被主伐, 因此当某个龄组平均年龄达到成熟林的平均年龄时, 不再估算其碳密度增长情况。以 15 年为 1 个间隔, 估算 2015—2060 年黑龙江省各乔木林类型的碳密度和碳储量。通过计算未来与现在的碳密度、碳储量的差值, 分析现有林分在不考虑其他因素时碳密度随自然生长的变化量, 将这部分视为森林在自然生长中增长的碳汇量。

本研究基于李斌等^[17]提出的现实碳吸存潜力的概念, 估算并分析现实固碳潜力, 该方法以理想情景和现实情景下碳密度的差值作为现实固碳潜力。本研究将样地按 10 年间隔分级, 用每级中碳密度最高的 3 个样地碳密度平均值代表理想情景下的碳密度, 减去该级碳密度平均值得到该级样地的现实固碳潜力。将属于同一龄组的各级样地按样地数量进行加权计算, 得到该龄组的现实固碳潜力。

根据未来碳密度、碳储量和现实固碳潜力计算结果, 分析人为经营和自然生长对黑龙江省乔木林碳汇能力及影响, 从而对碳汇经营策略提出优化建议。

2 结果与分析

2.1 乔木林碳密度生长曲线的拟合和检验

利用拟合样本和检验样本, 构建林龄–碳密度生长曲线。模型拟合结果及检验指标见表 3, 拟合曲线见图 1。根据 R^2 、MAE、RMSE、rRMSE 的计算结果, 樟子松人工林、椴树天然林、桦木天然林和针叶混交人工林采用 Logistic 方程形式, 杨类人工林和珍贵阔叶混交天然林选择 Gompertz 方程形式, 落叶松人工林、蒙古栎天然林、山杨天然林、针阔混交人工林和阔叶混交天然林选择 Bertalanffy 方程形式。表 3 显示: 多数乔木林曲线的 R^2 值都在 0.6 以上, 表明模型的拟合效果较好, 樟子松人工林和针阔混交人工林 R^2 值在 0.4 ~ 0.6 之间, 阔叶混交天然林、桦木天然林和椴树天然林的 R^2 值在 0.4 以下。各类生

表 3 各乔木林类型生长曲线参数及检验指标

Tab. 3 Parameters and test indexes of growth curves for each arbor forest type

乔木林类型 Arbor forest type	曲线类型 Type of curve	R^2	MAE	RMSE	rRMSE	A	B	k
落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	Bertalanffy	0.642	10.42	12.86	0.359	101.30	0.788	0.037
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	Logistic	0.490	11.42	13.44	0.293	112.87	0.156	0.926
蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	Bertalanffy	0.626	12.30	15.10	0.304	133.12	0.644	0.022
椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	Logistic	0.287	11.17	13.85	0.273	81.82	0.075	0.949
桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	Logistic	0.395	10.46	12.46	0.429	66.55	0.178	0.939
山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	Bertalanffy	0.685	14.21	17.80	0.354	132.91	0.833	0.039
杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	Gompertz	0.785	6.33	7.12	0.420	63.80	2.995	0.060
针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	Bertalanffy	0.520	11.71	14.47	0.326	111.55	0.555	0.022
针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	Logistic	0.626	16.08	19.60	0.397	132.17	0.088	0.949
珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	Gompertz	0.793	10.91	12.20	0.270	103.58	2.787	0.024
阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	Bertalanffy	0.380	12.93	15.72	0.341	111.50	0.509	0.019

注: A 、 B 和 k 为通过拟合得到的与树种类型相关的曲线系数。Note: A , B and k mean the curve coefficients related to tree species obtained by fitting.

长曲线 rRMSE 值均在 0.5 以下, 说明预测精度较高。

图 1 显示: 各生长曲线中碳密度均随年龄增长明显增加, 且在低年龄时碳密度增速随年龄而增长, 接近临界值时增速逐渐趋近于零, 呈 S 形增长趋势。其中 R^2 较高、拟合效果较好的曲线中, 碳密度随年龄增长的 S 形增长趋势较为明显; 而在拟合效果略差的曲线中, S 形增长趋势不明显。对于拟合效果稍差的曲线, 樟子松人工林在临近临界值时的增速下降趋势不明显, 椴树天然林、桦木天然林和阔叶混交天然林在低年龄时的碳密度增速增长趋势和之后的增速下降趋势都不明显。

对模型进行了残差正态性检验(表 4), 除桦木天然林外, 其他乔木林的 D 值和 W 值均大于 0.05, 说明各生长曲线模型的标准化残差频率分布都符合正态分布, 数据较为合理。

2.2 2015 年各乔木林类型不同龄组碳密度和碳储量

根据生长曲线计算得到各乔木林类型各龄组起始年份 2015 年的平均碳密度。各龄组碳密度随幼龄林—过熟林的顺序稳定递增; 天然林的总平均碳密度为 57.248 t/hm^2 , 高于人工林。各类乔木林平均碳密度从低到高顺序为杨类人工林 < 针叶混交人工林 < 桦木天然林 < 针阔混交人工林 < 珍贵阔叶混交天然林 < 落叶松人工林 < 樟子松人工林 < 山杨天然林 < 椴树天然林 < 阔叶混交天然林 < 蒙古栎天然林。蒙古栎天然林的总平均碳密度最高(82.545 t/hm^2), 其

次是阔叶混交天然林(60.699 t/hm^2); 而人工林中总平均碳密度最高的是樟子松人工林(43.041 t/hm^2), 为, 杨类人工林的总平均碳密度最低, 仅为 28.099 t/hm^2 (表 5)。

基于表 5 中碳密度数据和黑龙江省森林面积数据计算总碳储量, 用各龄组平均碳密度乘以对应龄组面积, 得到各类乔木林的碳储量(表 6)。根据第九次森林资源清查资料森林面积数据, 符合本研究的主要森林类型的总森林面积为 $1\,670.61 \text{ 万 hm}^2$ 。各龄组中面积最大的是中龄林, 占比 42.33%, 其次是近熟林和幼龄林, 分别占比 20.39% 和 18.29%。各乔木林类型中面积最大的是阔叶混交天然林, 占比 38.69%, 其次是桦木天然林, 占比 18.04%, 面积最小的是樟子松人工林, 仅占比 0.069%。2015 年黑龙江省主要乔木林类型碳储量总和为 878.73 Tg , 各龄组碳储量从低到高的顺序为幼龄林 < 过熟林 < 成熟林 < 近熟林 < 中龄林; 碳密度从低到高的顺序为幼龄林 < 中龄林 < 近熟林 < 成熟林 < 过熟林。各乔木林类型碳储量从低到高的顺序为杨类人工林 < 樟子松人工林 < 珍贵阔叶混交天然林 < 针叶混交人工林 < 椴树天然林 < 山杨天然林 < 针阔混交人工林 < 落叶松人工林 < 桦木天然林 < 蒙古栎天然林 < 阔叶混交天然林。总碳储量最高的乔木林类型是阔叶混交天然林, 占比 44.65%, 其次是蒙古栎天然林, 占比 17.02%。此外落叶松人工林、针阔混交人工林和桦木天然林

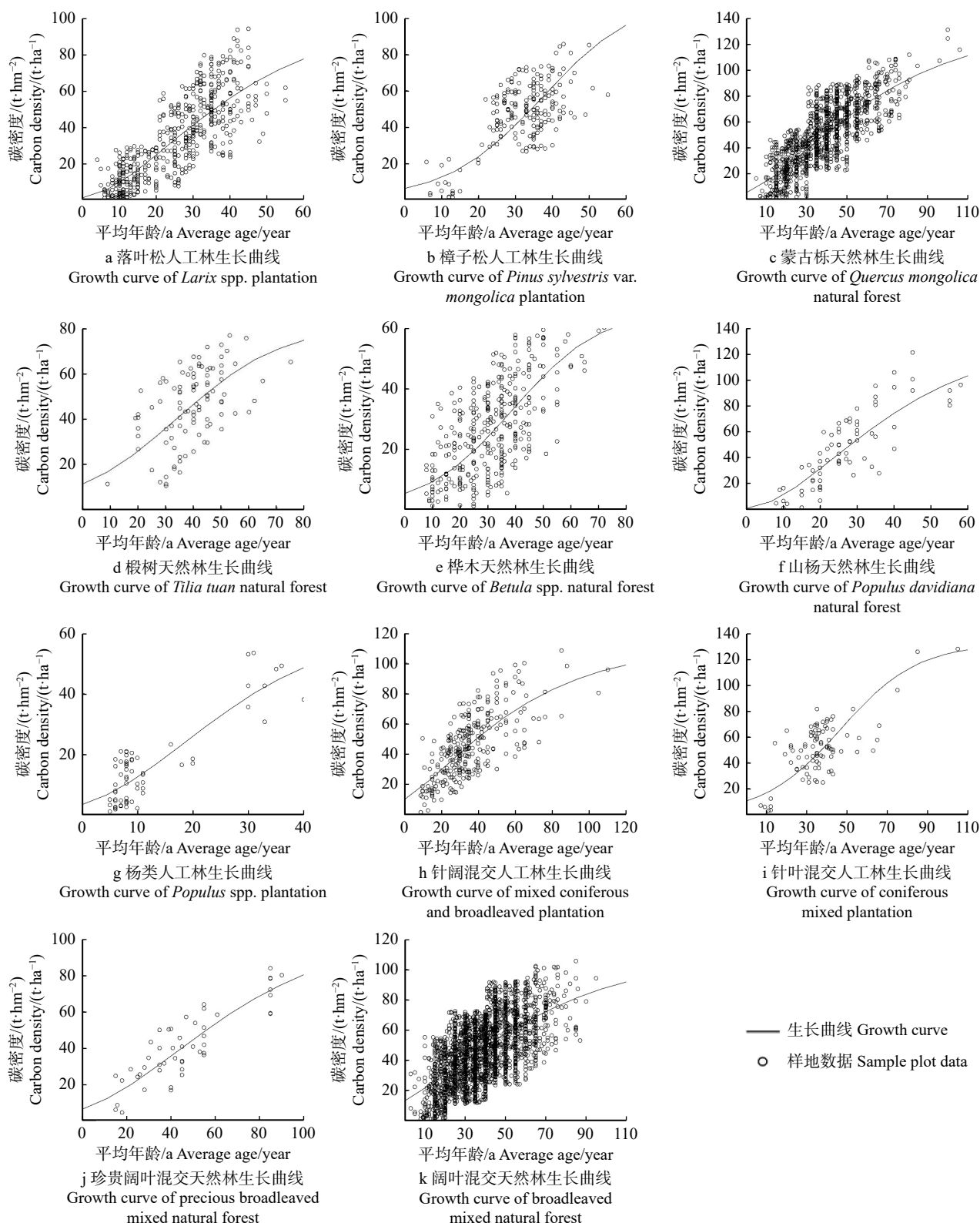


图 1 各乔木林类型碳密度-林龄拟合曲线

Fig. 1 Carbon density-forest age fitting curves of each arbor forest type

的碳储量也都较高。

2.3 不同乔木林类型未来碳密度和碳储量预测

2060 年时全省乔木林总平均碳密度由 2015 年的 52.599 t/hm² 增长到了 76.292 t/hm², 增长量为 23.693 t/hm², 其中天然林碳密度增长量为 22.972 t/hm², 人工林碳密度增长量为 25.600 t/hm², 略高于

天然林(表 7)。人工林在前期普遍增长较快, 但增长量增速下降更快, 天然林增长量不及人工林, 但增速下降更慢。人工林在短期内有增速优势, 而天然林有着长期维持碳密度增长的优势。2060 年碳密度最高的乔木林类型是蒙古栎天然林, 从 2015 年的 82.545 t/hm² 增长到了 2060 年的 103.659 t/hm²; 碳

表 4 各乔木林类型模型标准化残差正态性检验结果

Tab. 4 Results of normality test of standardized residual of each arborl forest type model

乔木林类型 Arbor forest type	D值 D value	W值 W value
落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	0.20	0.33
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	0.20	0.29
蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	0.20	0.37
椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	0.07	0.14
桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	0.08	0.02
山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	0.20	0.99
杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	0.20	0.70
针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	0.20	0.51
针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	0.20	0.63
珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	0.20	0.11
阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	0.06	0.07

表 5 2015 年各乔木林类型各龄组平均碳密度 t/hm²

Tab. 5 Average carbon density of each arbor forest type and each age group in 2015 t/ha

起源 Origin	森林类型 Forest type	幼龄林 Young forest	中龄林 Middle aged forest	近熟林 Near-mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Overmature forest	总平均碳密度 Total mean carbon density
人工林 Plantation	落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	10.230	33.752	49.590	68.650	81.527	42.767
	樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	12.746	32.440	52.514	82.825	101.275	43.041
	杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	7.408	16.165	23.073	33.356	42.711	28.099
	针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	19.535	35.587	46.281	60.895	73.111	39.382
	针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	17.136	32.544	46.974	72.338	95.971	32.096
	人工林平均值 Mean value of plantation	15.521	34.103	47.113	64.906	74.336	40.310
	蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	26.347	64.236	85.002	106.462	118.846	82.545
	椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	26.406	56.961	70.951	79.294	81.281	57.420
天然林 Natural forest	桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	12.176	34.557	48.928	58.371	63.110	35.924
	山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	11.863	44.017	65.873	91.745	109.594	55.450
	珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	18.847	45.192	61.999	80.683	91.721	40.208
	阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	31.376	58.193	72.612	88.169	97.878	60.699
	天然林平均值 Mean value of natural forest	22.913	53.739	67.656	85.518	102.571	57.248
	总体平均值 Total mean value	21.644	47.026	62.470	81.295	92.332	52.599

密度第二高的是山杨天然林，2060 年时碳密度为 92.255 t/hm²，具有较好的碳密度增长预期。2060 年碳密度最高的人工林类型是樟子松人工林，碳密度增长量在人工林中最高，2015—2060 增长量为 40.809 t/hm²；其次是针叶混交人工林林，碳密度增长量为 40.505 t/hm²；而天然林的碳密度增长量普遍较

低(表 7)。

2060 年总碳储量为 1 274.54 Tg，较 2015 年增长了 395.81 Tg。起始年和目标年的天然林总碳储量均明显高于人工林。各类乔木林中碳储量增长量最多的是阔叶混交天然林，从 2015 年的 392.39 Tg 增长到了 2060 年的 543.43 Tg，增长量为 151.04 Tg，

表 6 2015 年各乔木林类型各龄组碳储量

Tab. 6 Carbon storage of each tree forest type and each age group in 2015

Tg

起源 Origin	乔木林类型 Arbor forest type	幼龄林 Young forest	中龄林 Middle aged forest	近熟林 Near-mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Overmature forest	总碳储量 Total carbon storage
人工林 Plantation	落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	1.80	41.54	16.96	18.01	16.18	94.49
	樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	0.24	1.66	1.34	1.06	0.65	4.96
	杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	0.14	0.41	0.58	0.53	2.17	3.85
	针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	5.19	31.65	20.87	11.09	3.50	72.30
	针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	0.77	7.19	0.75	0.23	0.31	9.24
	人工林总值 Total plantation value	8.14	82.45	40.51	30.93	22.81	184.84
天然林 Natural forest	蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	6.56	28.32	29.57	59.34	25.75	149.54
	椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	0.67	6.92	2.94	0.76	0.26	11.55
	桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	10.78	29.83	33.61	30.21	3.83	108.25
	山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	1.36	5.35	3.79	12.92	1.40	24.82
	珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	1.21	3.90	1.19	1.03	0.00	7.33
	阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	37.41	175.83	101.16	53.93	24.06	392.39
	天然林总值 Total natural forest value	57.99	250.14	172.25	158.20	55.31	693.89
总计 Total		66.13	332.59	212.76	189.13	78.11	878.73

其次是桦木天然林, 增长量为 62.91 Tg。落叶松人工林、针阔混交人工林、蒙古栎天然林、桦木天然林和阔叶混交天然林的碳储量明显高于其他类乔木林, 2060 年时这 5 类森林的碳储量之和占总量的 91.72%。黑龙江省乔木林碳储量和增长量主要来自这 5 类森林, 但这 5 类乔木林的平均碳密度增长量并不突出, 碳储量增长量优势主要来自于现有的存量, 而碳密度增长量较高的乔木林类型如樟子松人工林、山杨天然林等现有面积都较低(表 7)。

2.4 各乔木林类型现实固碳潜力估算

乔木林现实固碳潜力平均值为 27.719 t/hm², 其中天然林现实固碳潜力明显高于人工林, 天然林平均值和人工林平均值的总现实固碳潜力差值为 6.099 t/hm²; 中龄林的现实固碳潜力总平均值最高, 达到了 29.179 t/hm², 其次则是幼龄林(27.032 t/hm²)和近熟林(27.800 t/hm²), 这 3 个龄组具有较好的碳密度增长前景(表 8)。人工林的现实固碳潜力有着较为明显的随龄组增加而增长的趋势, 而天然林中这种趋势并不明显。天然林中龄林的现实固碳潜力最高, 成熟林的现实固碳潜力较低。起始年份时各乔木林类型的平均固碳潜力从低到高的顺序为杨类人工林 < 珍贵阔叶混交天然林 < 椴树天然林 < 山杨

天然林 < 针叶混交人工林 < 樟子松人工林 < 桦木天然林 < 落叶松人工林 < 针阔混交人工林 < 蒙古栎天然林 < 阔叶混交天然林, 阔叶混交天然林的总现实固碳潜力最大(31.536 t/hm²), 其次是蒙古栎天然林(27.689 t/hm²)。人工林中针阔混交人工林的总现实固碳潜力最高(27.674 t/hm²); 杨类人工林是现实固碳潜力最小的森林类型, 总现实固碳潜力仅有 9.342 t/hm²(表 8)。

3 讨 论

3.1 各乔木林类型碳储量、碳密度未来增长量和现实固碳潜力

本研究根据黑龙江省内样地数据构建主要乔木林类型的生长曲线模型, 结合乔木林面积数据计算乔木林碳储量、碳密度及现实固碳潜力。碳密度、碳储量计算结果表明, 起始年份黑龙江省主要乔木林类型中, 阔叶混交天然林和蒙古栎天然林总碳储量和总平均碳密度最高, 这与那雪迎^[29]关于中国不同森林类型碳储量占比的研究结论一致; 人工林中总平均碳密度最高的是樟子松人工林, 这与孙辉祥等^[18]的研究结论相近。未来碳密度计算结果表明, 许多当前碳储量较大的乔木林类型未来碳密度增长

表 7 2015—2060 年主要乔木林类型总平均碳密度和总碳储量估算值

Tab. 7 Estimated total average carbon density and total carbon storage of major arbor forest types from 2015 to 2060						
起源 Origin	乔木林类型 Arbor forest type	指标 Index	2015	2030	2045	2060
人工林 Plantation	落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	42.767	60.348	68.852	69.806
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	94.49	133.33	152.12	154.23
	樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	43.041	66.783	80.599	83.850
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	4.96	7.69	9.29	9.66
	杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	28.099	35.889	36.834	36.834
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	3.85	4.91	5.04	5.04
	针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	39.382	52.947	59.838	61.213
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	72.30	97.20	109.86	112.38
	针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	32.096	53.242	69.929	72.601
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	9.24	15.33	20.14	20.91
	人工林总值 Total plantation value	总体平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	40.310	56.370	64.650	65.910
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	184.84	258.48	296.44	302.22
天然林 Natural forest	蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	82.545	91.431	98.962	103.659
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	149.54	165.64	179.28	187.79
	椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	57.420	67.319	73.909	77.486
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	11.55	13.54	14.87	15.59
	桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	35.924	45.758	52.986	56.799
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	108.25	137.89	159.67	171.16
	山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	55.450	75.594	88.093	92.255
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	24.82	33.84	39.44	41.30
	珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	40.208	51.861	62.779	71.551
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	7.33	9.46	11.45	13.05
	阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	总平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	60.699	70.336	78.521	84.065
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	392.39	454.68	507.59	543.43
	天然林总值 Total natural forest value	总体平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)	57.248	67.245	75.268	80.220
		总碳储量 Total carbon storage/Tg	693.89	815.05	912.30	972.32
总计 Total	总体平均碳密度/(t·hm ⁻²) Total mean carbon density/(t·ha ⁻¹)		52.599	64.260	72.354	76.292
	总碳储量 Total carbon storage/Tg		878.73	1 073.53	1 208.75	1 274.54

量较低，如阔叶混交天然林和蒙古栎天然林的未来碳密度增长量仅有 23.366 和 21.114 t/hm²，均低于全省平均碳密度增长量。而许多碳储量较低的乔木林类型未来碳密度增长量都较高，碳密度增长量最大的樟子松人工林和针叶混交人工林总碳储量大小仅排在所有乔木林类型中的第 8 名和第 10 名；天然林中碳密度增长量最高的是山杨天然林，为 36.805 t/hm²，这几类乔木林在未来都有着较高的碳汇增长

表 8 主要乔木林类型现实固碳潜力
Tab. 8 Current carbon sequestration potential of major arbor forest types

起源 Origin	乔木林类型 Arbor forest type	幼龄林 Young forest	中龄林 Middle aged forest	近熟林 Near-mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Overmature forest	总现实固碳潜力 Total current carbon sequestration potential
人工林 Plantation	落叶松人工林 <i>Larix</i> spp. plantation	15.356	26.965	27.612	29.848		23.257
	樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	10.409	18.275	22.096	24.163		20.068
	杨类人工林 <i>Populus</i> spp. plantation	10.578	1.839			6.578	9.342
	针阔混交人工林 Mixed coniferous and broadleaved plantation	19.947	29.589	30.199	28.229	23.064	27.674
	针叶混交人工林 Coniferous mixed plantation	28.284	10.633	21.987	19.915		19.996
	人工林平均值 Mean value of plantation	15.253	24.647	26.159	27.154	18.625	22.873
天然林 Natural forest	蒙古栎天然林 <i>Quercus mongolica</i> natural forest	28.624	26.611	25.190			27.689
	椴树天然林 <i>Tilia tuan</i> natural forest	20.191	17.437				19.002
	桦木天然林 <i>Betula</i> spp. natural forest	19.275	24.352	15.479	7.060		21.307
	山杨天然林 <i>Populus davidiana</i> natural forest	14.190	19.870	33.940	2.570		19.675
	珍贵阔叶混交天然林 Precious broadleaved mixed natural forest	9.394	11.036		8.385		9.876
	阔叶混交天然林 Broadleaved mixed natural forest	30.053	34.034	32.946	24.035		31.536
	天然林平均值 Mean value of natural forest	28.401	30.074	29.816	14.257		28.972
总体平均值 Total mean value		27.032	29.179	27.800	24.698	18.625	27.719

潜力。现实固碳潜力计算结果表明,许多当前碳储量较大的乔木林类型的现实固碳潜力也较高,如阔叶混交天然林和蒙古栎天然林,这两类乔木林的总现实固碳潜力分别为 31.536 和 27.689 t/hm²,是现实固碳潜力最高的乔木林类型。而未来碳密度增长量较高的乔木林现实固碳潜力往往较低,如樟子松人工林、针叶混交人工林和山杨天然林,这 3 类的总现实固碳潜力仅有 20.068、19.996 和 19.675 t/hm²。

许多当前碳储量较高的乔木林类型(如阔叶混交天然林、蒙古栎天然林等)具有未来碳密度增长量较低、总现实固碳潜力较高的特征,表明这类乔木林自然生长的碳汇能力较低,而通过经营增长的碳汇能力较高,这与郭同方等^[30]对龙江森工集团国有林区的研究结果类似。郭同方在研究中指出,当前黑龙江省乔木林以这类乔木林为主,造林增汇潜力有限,重点应放在经营现有林分,以实现增汇。因此,未来应将现实固碳潜力较高的乔木林类型作为森林经营工作重点对象,进行林分抚育,以提高黑龙江省乔木林的碳汇能力。山杨天然林、樟子松人工林等乔木林类型具有较高的未来碳密度增长量和较低的总现实固碳潜力,说明这些乔木林有着较强的随自然生长的碳汇能力,适合作为人工林新造林和天然林更新树种,同时林分状态相对较好,不需要重点进行林分抚育。未来的新造林工作中,应在满足适地适树等条件的基础上,优先选取这类乔木林进行造

林,以提升新造林地的碳汇能力。

3.2 各龄组碳密度、碳储量未来增长量和现实固碳潜力

本研究基于生长曲线模型对乔木林各龄组碳密度、碳储量进行估算。根据计算结果,乔木林碳储量主要集中在中龄林、近熟林和成熟林中,这与考青云等^[31]的研究结果一致。各龄组碳密度从低到高的顺序则是幼龄林 < 中龄林 < 近熟林 < 成熟林 < 过熟林,这与考青云等^[31]得到的研究结论有所不同。考青云在研究中发现,成熟林的碳密度明显低于近熟林和过熟林,并认为幼龄林和成熟林与下一生长阶段的碳密度差值较大,所以有较高的增汇潜力。2060 年时中龄林与近熟林对应的林分的碳储量占比变化较小,而幼龄林所对应林分的碳储量占比显著增加,成熟林和过熟林所对应林分的碳储量占比明显降低。幼龄林增汇潜力明显,而成熟林并未表现出明显的碳汇潜力。现实固碳潜力估算结果表明,各龄组中现实固碳潜力最高的是中龄林,现实固碳潜力总体平均值超过了 29 t/hm²,幼龄林和近熟林的现实固碳潜力与中龄林差距不大,总平均值都在 27 t/hm² 以上,这 3 个龄组的现实固碳潜力都较高。而成熟林和过熟林的现实固碳潜力总体平均值则相对较低。这与岳军伟^[32]对甘肃省主要森林类型各龄组固碳潜力的研究结论一致。

本研究计算结果表明,中龄林和幼龄林同时具

- [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [14] 蔡云, 周炆涛. 森林生态系统固碳估算方法研究进展 [J]. *绿色科技*, 2020(18): 48–50.
- Cai Y, Zhou W T. Research progress of estimation methods for carbon sequestration in forest ecosystem[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2020(18): 48–50.
- [15] 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 771–787.
- Yu G R, Wang Q F, Liu Y C, et al. Conceptual framework of carbon sequestration rate and sink enhancement potential of regional terrestrial ecosystems and its scientific basis for quantitative certification[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 771–787.
- [16] Keith H, Mackey B, Berry S, et al. Estimating carbon carrying capacity in natural forest ecosystems across heterogeneous landscapes: addressing sources of error[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 2971–2989.
- [17] 李斌, 方晰, 项文化, 等. 湖南省杉木林植被碳储量、碳密度及碳吸存潜力 [J]. *林业科学*, 2013, 49(3): 25–32.
- Li B, Fang X, Xiang W H, et al. Carbon storage, carbon density and carbon sequestration potential of Chinese fir forest vegetation in Hunan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(3): 25–32.
- [18] 孙辉祥, 宋玥, 孙智勇. 黑龙江省森林碳储量的动态变化分析 [J]. *中国林业经济*, 2020(6): 55–58, 98.
- Sun H X, Song Y, Sun Z Y. Analysis on dynamic change of forest carbon storage in Heilongjiang Province[J]. *China Forestry Economy*, 2020(6): 55–58, 98.
- [19] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告 (2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report (2014–2018)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.
- [20] 董利虎. 黑龙江省主要树种相容性生物量模型研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- Dong L H. Study on compatible biomass model of main tree species in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [21] 李卓凡. 兴安落叶松林生物量与碳储量的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- Li Z F. Study on biomass and carbon storage of *Larix gmelinii* forest[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [22] 王飞, 郭玉东, 张秋良. 兴安落叶松林生物量模型的构建 [J]. *内蒙古农业大学学报 (自然科学版)*, 2015, 36(4): 44–47.
- Wang F, Guo Y D, Zhang Q L. Biomass model of *Larix gmelinii* forest[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2015, 36(4): 44–47.
- [23] 王志杰, 房子怡, 张菲, 等. 塞罕坝地区典型人工林生物碳贮量的比较 [J]. *林业与生态科学*, 2022, 37(2): 174–179.
- Wang Z J, Fang Z Y, Zhang F, et al. Comparison of biological carbon storage in a typical plantation in Saihanba area[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2022, 37(2): 174–179.
- [24] 曹恭祥, 王云霓, 季蒙, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松林净初级生产力对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5352–5359.
- Cao G X, Wang Y N, Ji M, et al. Response of the net primary productivity of *Pinus lauratum* forest to climate change in Hulunbuir Sandy Land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5352–5359.
- [25] 纪艳军, 王志杰, 张国厚. 祖山林区主要乔木树种生物量相容性模型研究 [J]. *河北林业科技*, 2022(2): 30–33.
- Ji Y J, Wang Z J, Zhang G H. Study on biomass compatibility model of main tree species in Zushan forest area[J]. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, 2022(2): 30–33.
- [26] 曾伟生, 陈新云, 杨学云. 我国人工杨树生物量建模和生产力分析 [J]. *林业科学*, 2019, 55(11): 1–8.
- Zeng W S, Chen X Y, Yang X Y. Biomass modeling and productivity analysis of artificial poplar in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(11): 1–8.
- [27] 翟明瑶, 周梅, 赵鹏武, 等. 通辽市杨树人工林含碳率及碳密度分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(6): 57–62.
- Zhai M Y, Zhou M, Zhao P W, et al. Analysis on carbon content and carbon density of poplar plantation in Tongliao City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(6): 57–62.
- [28] 刘云彩, 姜远标, 陈宏伟, 等. 西南桦人工林单株生物量的回归模型 [J]. *福建林业科技*, 2008(2): 42–46.
- Liu Y C, Jiang Y B, Chen H W, et al. Regression model of biomass per plant of *Betula alnoides* plantation in Southwest China[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2008(2): 42–46.
- [29] 那雪迎. 中国森林碳储量变化及固碳潜力的研究 [J]. *现代园艺*, 2024, 47(15): 59–63.
- Na X Y. Changes in forest carbon storage and carbon sequestration potential in China[J]. *Xiandai Horticulture*, 2024, 47(15): 59–63.
- [30] 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. Dynamic change of forest carbon stock and strategy of increasing sink in key state-owned forest areas: a case study of Longjiang forest industry[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(3): 582–596.
- [31] 考青云, 李家欣, 欧兴浪, 等. 黑龙江省森林植被碳储量时间变化及其影响因素的探究 [J]. *中国林业经济*, 2022(4): 73–79.
- Kao Q Y, Li J X, Ou X L, et al. Study on temporal variation of forest vegetation carbon storage and its influencing factors in Heilongjiang Province[J]. *China Forestry Economy*, 2022(4): 73–79.
- [32] 岳军伟. 甘肃主要森林类型固碳动态、潜力及影响机制 [D]. 咸阳: 中国科学院大学, 2018.
- Yue J W. Carbon sequestration dynamics, potential and influencing mechanism of main forest types in Gansu Province[D]. Xianyang: Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [33] Chazdon R L, Broadbent E N, Bongers F, et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics[J]. *Science Advances*, 2016, 2(5): 1–10.

(责任编辑 赵田芸
责任编委 张建国)