

张岩松, 夏冕, 周旺明, 等. 辽宁落叶松人工林现有经营模式的碳汇现状和增汇潜力. 应用生态学报, 2025, 36(3): 771-779  
Zhang YS, Xia M, Zhou WM, et al. Status and potential of carbon sequestration of larch plantations in Liaoning Province, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(3): 771-779

## 辽宁落叶松人工林现有经营模式的 碳汇现状和增汇潜力

张岩松<sup>1,2</sup> 夏冕<sup>1,2</sup> 周旺明<sup>3</sup> 周莉<sup>1,2</sup> 吴志超<sup>1,2</sup> 丁磊<sup>4</sup> 勇环英<sup>5</sup> 于大炮<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; <sup>2</sup>吉林长白山西坡森林生态系统国家定位观测站, 吉林白山 134506; <sup>3</sup>安庆师范大学生命科学学院, 安徽安庆 246011; <sup>4</sup>辽宁省森林经营研究所, 辽宁丹东 118002; <sup>5</sup>国有清原满族自治县大边沟林场, 辽宁抚顺 113309)

**摘要** 本研究利用辽宁省二类调查小班数据分析了辽宁省东部山区不同经营模式下落叶松人工林的乔木碳汇现状,并基于固定样地的树木年轮数据预测了不同经营模式乔木的碳汇动态,以期为未来落叶松碳汇提升提供技术支撑。结果表明:辽宁省落叶松人工林和红松人工林的乔木最大碳密度分别为 70.24 和 63.33 t·hm<sup>-2</sup>,现有林乔木的固碳潜力为 11.66 Tg;在经营周期内,落叶松人工林(40年)和红松人工林(80年)的固碳速率分别为 1.62 和 0.66 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。落叶松人工林的碳成熟林龄为 22年,以此为轮伐期可提高碳汇 43.8%。落叶松冠下栽植红松的复层林模式,以落叶松人工林 30龄时冠下栽植红松,45~50龄时去除上层落叶松为最佳;该模式比落叶松连作模式的乔木累积固碳量减少了 36.4%,但林分碳密度增加了 18.1%。对于落叶松-红松-水曲柳复层林,在红松 60龄时冠下栽植水曲柳,130龄时择伐红松经营最佳;该模式乔木的累积固碳量比落叶松连作模式高 2.6%,比红松连作模式高 28.1%,平均碳密度比红松连作高 12.6%。复层林模式可减少土壤碳损失,持续维持乔木和土壤碳汇,落叶松人工林逐步诱导成红松阔叶混交林最有利于增加林分碳密度和增汇。

**关键词** 落叶松;红松;复层林;碳汇动态;经营模式

**Status and potential of carbon sequestration of larch plantations in Liaoning Province, China.** ZHANG Yansong<sup>1,2</sup>, XIA Mian<sup>1,2</sup>, ZHOU Wangming<sup>3</sup>, ZHOU Li<sup>1,2</sup>, WU Zhichao<sup>1,2</sup>, DING Lei<sup>4</sup>, YONG Huanying<sup>5</sup>, YU Dapao<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup>CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Silviculture, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>Changbaishan Xipo National Field Observation and Research Station for Forest Ecosystem, Baishan 134506, Jilin, China; <sup>3</sup>School of Life Sciences, Anqing Normal University, Anqing 246011, Anhui, China; <sup>4</sup>Liaoning Institute of Forest Management, Dandong 118002, Liaoning, China; <sup>5</sup>Dabiangu State Owned Forestry Farm, Fushun 113309, Liaoning, China).

**Abstract** We analyzed the carbon sink status of different management modes of larch plantations in Liaoning Province using data from a second-class survey, and predicted the dynamics of carbon sink under different management modes by using tree ring data from sample plots. The main aim was to provide technical support for improving carbon sequestration capacity of larch plantations. The results showed that the maximum carbon densities of larch and Korean pine plantations were 70.24 and 63.33 t·hm<sup>-2</sup>, respectively. The carbon sequestration potential of current plantations was 11.66 Tg. With the cycle of forest management, carbon sequestration rates of larch (40 years) and Korean pine (80 years) plantations were 1.62 and 0.66 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, respectively. The carbon maturity age of larch plantations was 22 years, and stopping the rotation at this age could increase carbon sequestration by 43.8%. Under the larch-Korean pine multi-storied forest model, it was best to plant Korean pine seedlings in 30-year-old larch plantations, and to remove larch trees between 45- and 50-year-old larch plantations. Compared to the larch continuous cropping model, it reduced accumulated stand carbon sink by 36.4% and increased stand carbon density by 18.1%. Under the larch-Korean pine-*Fraxinus mandshurica* multi-storied forest model, it was best to plant *F. mandshurica* seedlings in 60-year-old Korean pine plantations, and to selecting cut Korean pine trees in 130-year-old. It increased accumulated stand carbon sink by 2.6% than larch continuous cropping and by 28.1% than Korean

本文由“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD2200405-4)和国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232876)资助。

2024-11-07 收稿, 2025-01-15 接受。

\* 通信作者 E-mail: yudp2003@iae.ac.cn

pine continuous cropping, and increased stand mean carbon density by 12.6% than Korean pine continuous cropping. The multi-storied forest model could reduce soil carbon loss and maintain arbor and soil carbon sinks. Inducing larch plantations into Korean pine-broadleaf mixed forests would facilitate stand carbon density and carbon sink.

**Keywords** larch; Korean pine; multi-storied stand; carbon sink dynamic; management pattern

森林固碳增汇是基于自然解决方案实现“双碳”战略目标的重要途径。有研究表明,中国森林碳汇主要来自人工林的贡献<sup>[1]</sup>,因此加强对人工林碳汇动态及机制的研究,准确评估人工林的碳吸存量和吸存潜力,对促进“双碳”战略目标实现有一定的现实意义。

森林乔木碳汇的计算根据数据来源可分为 4 种:清查法<sup>[2-4]</sup>、遥感法<sup>[5-6]</sup>、通量法<sup>[7-10]</sup>和模型法<sup>[5,11-13]</sup>;根据计算方法可分为两大类:一是差值法<sup>[2,14-18]</sup>,林地碳储量两期或多期的差值;另一种是累积生长量法,即以林地现有林木(活立木)生长量来计算碳汇,包括利用遥感数据(如 NDVI)、树木年轮数据、样地监测数据等计算林木的累积固碳量<sup>[8,10,19-20]</sup>。这两种森林碳汇计算方法的区别在于,前者强调的是林地上现存碳储量的增量,并假定被移除林木直接或短时间内转变为 CO<sub>2</sub> 排放到大气;而后者反映的是林分实际碳固持的能力,相当于将采伐等移除林木的碳储量计算到碳汇中。这 2 种方法对森林增汇潜力的理解也存在差异。在森林面积不变的前提下,基于差值法的增汇潜力实际上反映的是不同林龄乔木最大碳密度与现实碳密度的差异,这也是当前大多数研究所采用的方案;而基于累积生长量法的增汇潜力,反映的是不同林龄乔木最大生产力与现实生产力的差异,这也是用材林经营所追求的目标。对同龄人工林来说,乔木碳密度最大往往意味着林分密度达到自然稀疏的临界值,但此时生产力并不一定最大;而生产力达到最大意味着林地累积固碳量达到最大,但此时林分密度往往远低于临界值。因此,人工林增汇潜力和实现的经营方案根据不同的计算方法有所不同。

辽宁省落叶松(*Larix* spp.)人工林面积和蓄积分别占辽宁省人工林面积的 25.7% 和蓄积的 39.3%,主要分布于辽宁东部山区。以往多采用“造林-皆伐-再造林-再皆伐”的连作模式,土壤退化严重,森林生产力低,且皆伐地造林后的 5~10 年内林分才能完全郁闭,土壤碳损失高。为解决这个问题,过去 20 多年里开展了落叶松和阔叶树混交造林试验,以及在中龄或近熟落叶松冠下栽植红松(*Pinus koraiensis*),并在红松达到 20 龄时伐除上层落叶松

形成红松人工林的复层林模式。近年来,由于落叶松木材产品的市场遇冷和红松籽价格上涨,大量的落叶松人工林被皆伐后营造红松人工林,形成了落叶松-红松轮作模式。根据辽宁省森林资源调查数据,在 2010—2021 年间落叶松幼龄林面积减少了 14.1%,而红松幼龄林面积增加了 32.7%。落叶松和阔叶树混交林多数效果不佳,复层林虽然缩短了皆伐再造林的成林时间,形成了林地植被连续覆盖,提高了生态系统碳密度<sup>[21-22]</sup>,但复层林和轮作模式最终形成的红松人工林存在与落叶松人工纯林同样的问题,且生产力比落叶松人工林低。鉴于落叶松人工林在辽宁森林碳汇中的重要地位,亟需弄清林型转变的碳汇动态及后续的增汇措施。

林分密度调控是人工林固碳增汇的主要技术措施,已有研究采用差值法计算辽宁省落叶松人工林和红松人工林的碳密度和碳汇现状<sup>[23-25]</sup>,分析了其随林龄的变化特征,探究了获得最大碳汇时的最佳林分密度及采伐周期<sup>[26-27]</sup>;明确了落叶松-红松复层林模式的林分生长、土壤有机碳等的变化特征,证明了复层林模式有利于森林增汇<sup>[21]</sup>。同时,为提高红松人工林的碳汇能力,自 2010 年起开展了红松人工林冠下栽植水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)并促进乡土珍贵阔叶树更新,诱导红松阔叶复层混交林的技术试验,但时间段短,碳汇效果还不明确。本研究利用森林资源清查的小班数据,通过构建人工林碳汇模型,采用两种碳汇计算方法模拟不同经营模式的碳汇现状、动态及增汇潜力,评估不同经营模式的长期碳汇效果,构建转型过程中落叶松人工林长周期持续固碳增汇的经营模式,为弄清辽宁省落叶松人工林碳汇现状,筛选出转变为红松人工林后的经营技术提供数据支撑,服务于辽宁省“双碳”目标。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

辽宁省森林区划为 7 个植被大区,本研究的人工林分布在其中的 4 个大区:辽东山地温带湿润的沙松(*Abies holophylla*)、红松阔叶混交林及其次生林区、辽东半岛暖温带湿润的赤松(*Pinus densiflora*)栎林和栎树矮林区、辽东山地西麓暖温带湿润的油松

栎林及其次生灌丛区。主要人工林类型为落叶松人工林、红松人工林和油松人工林。落叶松主要为长白落叶松 (*Larix olgensis*)、日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 和少量的华北落叶松 (*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)。天然林主要树种有红松、水曲柳、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、色木槭 (*Acer mono*) 和胡桃楸 (*Juglans mandshurica*) 等。

辽宁省落叶松人工林的经营技术模式包括落叶松连作模式、落叶松-红松轮作模式和落叶松-红松复层林模式,后 2 种模式中落叶松人工林最终转变为红松人工林,因此为分析转变后的碳汇效果,本研究将红松人工林轮作模式作为对照,将红松人工林冠下补植水曲柳,并诱导阔叶树更新形成的复层林模式作为落叶松人工林转变为红松人工林后的接续经营模式,称作落叶松-红松-水曲柳复层林模式,开展经营过程中的碳汇动态研究。不同经营模式的林分密度和冠下补植密度见表 1。

试验样地位于辽宁省森林经营研究所实验林场 (40°52'19" N, 123°54'33"E)。开展了落叶松、红松人工林的密度调控和复层林技术试验,其中,红松-水曲柳复层林技术试验时间较短(14 年),其余技术试验都在 20 年以上。样地属于辽东山地温带湿润的沙松、红松阔叶混交林及其次生林区。年均温为 6.1 °C,年降水量为 926.3 mm。

### 1.2 数据来源

本研究数据来源于 2020 年辽宁省森林资源规划设计调查(二类调查)的小班数据。落叶松人工林(下称落叶松林)共涉及 248408 个小班,总面积 563748.0 hm<sup>2</sup>;红松人工林(下称红松林)共涉及 23328 个小班,总面积 61713.7 hm<sup>2</sup>。落叶松林共包括长白落叶松林、日本落叶松林、华北落叶松林和未分类的落叶松林(调查中未区分种),其中,华北落叶松林仅 4001 个小班,未分类的落叶松林 15929 个小班,共 84099.2 hm<sup>2</sup>未纳入本研究。考虑到小班面积小的数据不确定性大,本研究仅分析了小班面积大于 1 hm<sup>2</sup>的数据(落叶松林共 139691 个小班,红松林 14074 个小班);同时,对于没有蓄积的未成林小班(林龄<6 年)、林分密度少于 100 株·hm<sup>-2</sup>或大于 6000 株·hm<sup>-2</sup>的小班,数据存在明显异常的小班(相同林龄对应的公顷蓄积量、树高、胸径、密度等比平均值大 3 倍标准差以上)进行数据剔除,最终选择长白落叶松 42473 个小班、日本落叶松 49534 个小班、红松 9987 个小班数据应用于本研究。水曲柳人

工林只有 72 个小班,其他阔叶树没有纯林小班,因此本研究采用对数方程进行简单拟合以计算水曲柳或其他阔叶树生物量随林龄的变化,公式如下:

$$M = 39.639 \ln a - 70.169$$

式中: $M$  为水曲柳/阔叶树林分生物量(kg); $a$  为林龄,拟合方程决定系数为  $R^2 = 0.47$ 。

采用树木年轮学方法在落叶松林和红松林试验样地内钻取树芯,通过径向生长来计算技术试验的碳汇效果。每个类型选择至少 3 个样地,钻取标准木,数量不少于 20 个。剔除异常树芯,最终在 1970 年营造的落叶松人工林以及 1939 和 1941 年营造的红松人工林内共获取 3 个样地的落叶松树芯 40 个、6 个样地红松树芯 84 个。年轮数据经过定年后,按照树木年龄计算平均生长量。

### 1.3 数据处理

本研究中,计算的林分碳汇或碳密度,没有特别说明都只包含乔木。人工林碳汇分别采用差值法和累积生长量法估算。差值法主要利用二类调查数据中小班的林龄和蓄积量等信息,计算不同林龄的碳密度,相邻林龄的碳密度差值即为该林龄的碳汇。累积生长量法,主要利用固定监测样地的树木年轮数据得到单木不同林龄的碳汇量,基于经营密度表(表 1)计算林分不同林龄的年均碳汇量(年固碳量)和累积碳汇量(累积固碳量)。

#### 1.3.1 现有经营模式的林分碳密度

1) 小班乔木碳密度:基于方精云等<sup>[28]</sup>提出的红松、落叶松林分蓄积量-生物量方程,利用二类调查小班中的公顷蓄积量,计算小班的公顷生物量,即生物量密度。红松生物量密度为  $B = 0.5185V + 18.22$ ,落叶松生物量密度为  $B = 0.9671V + 5.7598$ 。其中, $B$  为生物量密度( $t \cdot hm^{-2}$ ); $V$  为公顷蓄积量( $m^3 \cdot hm^{-2}$ )。生物量与碳的转化系数按 0.5 计算。

2) 现有林碳密度拟合:利用 Logistic 曲线拟合林龄-生物量密度的关系,估算不同林龄林分乔木生物量碳密度,公式如下:

$$B(a) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K - B_0}{B_0}\right) \times e^{-ra}}$$

式中: $B(a)$  为乔木生物量碳密度( $t \cdot hm^{-2}$ ); $K$  为乔木生物量碳密度的最大值(饱和值); $B_0$  为初始乔木生物量碳密度; $r$  为生长系数; $a$  为林龄。考虑到林龄对应的小班数量差异巨大,可能使模拟结果产生偏差,因此本研究引入权重加权最小二乘回归法(weighted least squares regression, WLS)消除样本

表 1 落叶松和红松人工林主要经营模式及林分密度<sup>[29]</sup>Table 1 Main management modes and stand density for larch plantation and Korean pine plantation<sup>[29]</sup>

模式类型 Mode type	技术描述 Technology	轮伐期 Rotation	林分密度调控 Stand density regulation/(trees · hm <sup>-2</sup> )
落叶松连作 Larch continuous cropping (L-L)	落叶松人工林皆伐,再造落叶松人工林	40 年	初植密度:2500;11 年:1200;21 年:750;31 年:420;41 年:皆伐
红松连作 Korean pine continuous cropping (P-P)	红松人工林皆伐,再造红松人工林	80 年	初植密度:2500;16 年:1000;31 年:750;>41 年:300;81 年:皆伐
落叶松-红松轮作 Larch-Korean pine rotation (L-P)	落叶松人工林皆伐,营造红松人工林	120 年	初植落叶松:2500;11 年:1200;21 年:750;31 年:420;41 年:落叶松皆伐,栽植红松,初植密度 2500 株;56 年:1000;71 年:750;>81 年:300;121 年:皆伐
落叶松-红松复层林 Larch-Korean pine multi-storied plantation (L×P)	落叶松人工林(30 龄)冠下栽植红松,渐伐,形成红松人工林	110 年	初植落叶松:2500;11 年:1200;21 年:750;31 年:380,林下补植红松 1500;46 年:红松保留 1000;51 年:伐除全部落叶松;61 年:红松 750 株;>71 年:300;111 年:皆伐
落叶松-红松-水曲柳复层林 Larch-Korean pine-Fraxinus mandshurica multi-storied plantation (L×P×F)	落叶松人工林(30 龄)冠下栽植红松,渐伐,形成红松人工林;红松人工林(60 龄)冠下补植水曲柳,诱导阔叶树,形成红松水曲柳复层混交林	择伐	初植落叶松:2500;11 年:1200;21 年:750;31 年:380,林下补植红松 1500;46 年:红松保留 1000;51 年:伐除全部落叶松;61 年:红松 750;>71 年:红松 300;91 年:林下补植水曲柳 1500;101 年:保留林下水曲柳和其珍贵阔叶树 750;111 年:保留水曲柳 300;>121 年:保留冠层树木 300 株,按连续林择法作业

量差异的影响。权重表示数据点在二维空间中的分布密度,密度越大,权重越高,拟合时对这些点的影响也越大。

3) 不同经营模式的碳汇测算:连作和轮作模式的碳汇,根据 Logistic 曲线拟合的林龄-乔木碳密度按照人工纯林模式计算;复层林模式中的单层林阶段按纯林模式计算,复层林阶段的上层林分密度按纯林的 90% 计算,冠下造林或补植的乔木,因造林密度仅为裸地造林的 60% (1500/2500),因此复层林阶段下层乔木碳密度按照纯林的 60% 计算。

### 1.3.2 不同经营模式的累积固碳量

1) 林分累积固碳量:利用树木年轮宽度计算年龄对应的树木胸径,采用陈传国等<sup>[29]</sup>的异速生长方程计算落叶松和红松单木生物量碳,然后根据表 1 对应的林分密度计算不同林龄时的林分累积固碳量。

2) 连年碳汇量:连年碳汇量为林分各年度的当年碳汇量,差值法采用下一年的林分碳密度减去当年的碳密度;累积生长量法是当年单木碳汇量乘以林分密度。

3) 年均碳汇量:指林分从生长至调查时的年平均碳汇量,差值法采用当年的碳密度除以林龄;累计生长量法是各年林分碳汇量的平均值。

4) 林分碳成熟年龄:指年均碳汇量达到最大时的林龄,也称数量成熟龄。

## 2 结果与分析

### 2.1 林分碳密度与林龄拟合

落叶松林( $R^2=0.68$ )和红松林( $R^2=0.47$ )的乔

木碳密度与林龄符合 Logistic 曲线(图 1)。根据拟合结果可知,落叶松林和红松林的最大碳密度( $K$ )分为 70.24 和 63.33  $t \cdot hm^{-2}$ ,生长系数分别为 0.17 和 0.07,说明落叶松林的最大碳密度和碳汇比红松林高。另外,落叶松林碳密度的变异幅度明显大于红松林(图 1)。

### 2.2 林分碳汇估算

由图 2 可以看出,落叶松林连年碳汇量在 16 年时达到最大,为 2.98  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ,碳成熟年龄为

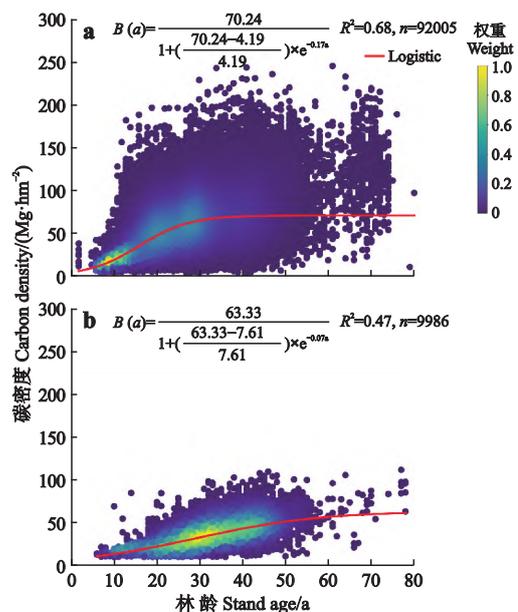


图 1 落叶松人工林和红松人工林碳密度与林龄的关系

Fig. 1 Relationship between carbon density and stand age of larch and Korean pine plantations.

a) 落叶松人工林 Larch plantation; b) 红松人工林 Korean pine plantation. 下同 The same below.

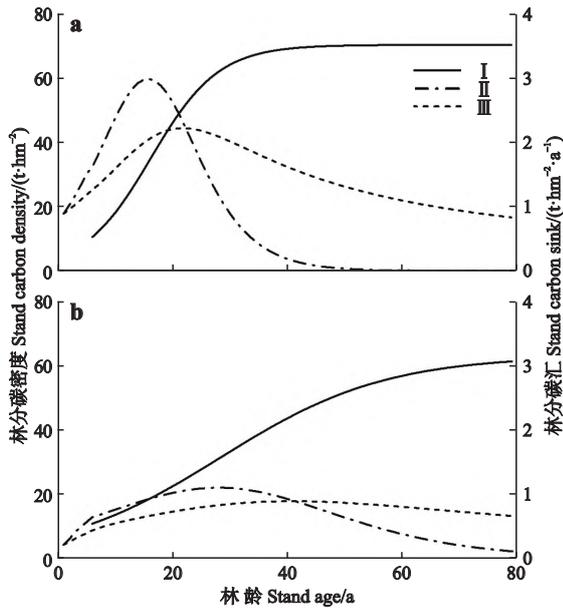


图2 不同林龄落叶松和红松人工林林分连年碳汇量、年均碳汇量和林分碳密度的变化

Fig.2 Changes in successive carbon sink, mean annual carbon sink and stand carbon density of larch and Korean pine plantation with different stand ages.

I: 林分碳密度 Stand carbon density; II: 连年碳汇量 Successive carbon sink; III: 年均碳汇量 Mean annual carbon sink.下同 The same below.

22年,此时年均碳汇量为  $2.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;落叶松林碳密度在35年时达到  $67.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,超过最大碳密度的95%,此时林分年均碳汇量为  $1.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;在50年时碳密度达到最大,此时林分年均碳汇量为  $1.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

红松林在28年时达最大,为  $1.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,碳成熟龄为41年,此时年均碳汇量为  $1.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;红松林碳密度在65年时达到  $58.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,超过最大碳密度的92%,此时年均碳汇量为  $0.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,在80年时达到  $61.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,接近最大,此时年均碳汇量为  $0.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

根据图2的结果可得到不同经营模式的林分碳密度和连年碳汇量。由图3可以看出,落叶松连作模式在经营周期内(40年)的年均碳汇量为  $1.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,红松连作模式在经营周期内(80年)的年均碳汇量为  $0.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,仅为落叶松连作模式的40.7%;落叶松-红松轮作模式在经营周期内(120年)的年均碳汇量为  $0.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,为落叶松连作模式的60.5%;落叶松-红松复层林模式在经营周期内(110年)的年均碳汇量为  $1.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,落叶松-红松-水曲柳复层林模式在经营周期内(160年)年均碳汇量为  $1.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,是落叶

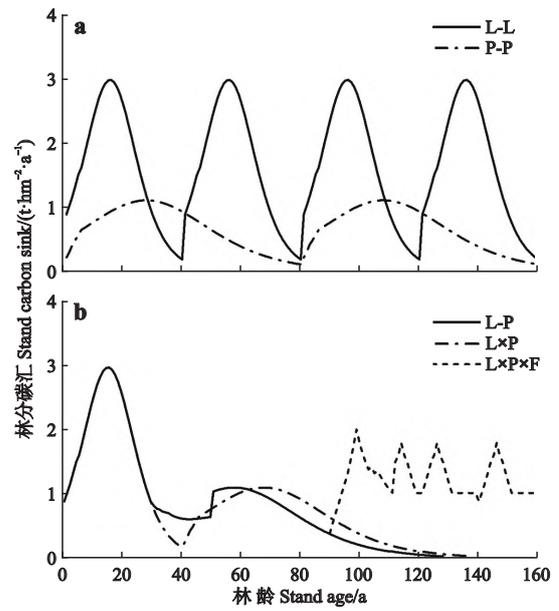


图3 不同林龄5种经营模式下林分碳汇变化

Fig.3 Changes in stand carbon sink for five forest management patterns with different stand ages.

L-L: 落叶松林连作 Larch continuous cropping; P-P: 红松林连作 Korean pine continuous cropping; L-P: 落叶松-红松轮作 Larch-Korean pine rotation; L×P: 落叶松-红松复层林 Larch-Korean pine multi-storied plantation; L×P×F: 落叶松-红松-水曲柳复层林 Larch-Korean pine-Fraxinus mandshurica multi-storied plantation.下同 The same below.

松连作模式的71.1%,该模式的前110年平均碳汇量为  $1.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,此后年均碳汇量稳定在  $1.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

由图4可以看出,在经营周期内,落叶松连作模

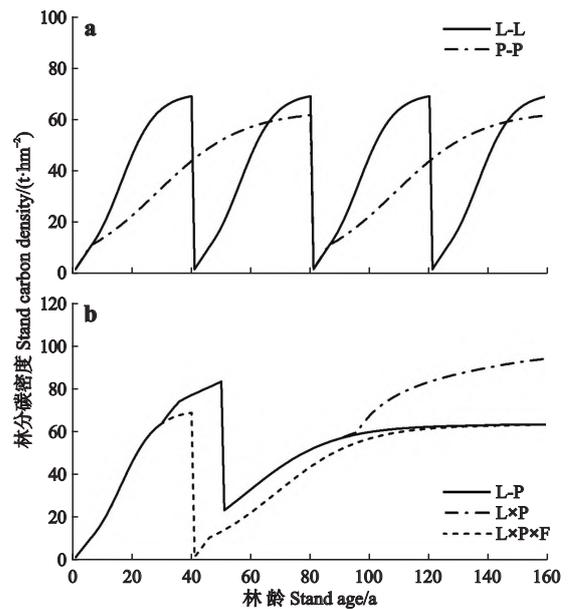


图4 不同林龄5种经营模式下林分碳密度变化

Fig.4 Changes in stand carbon density for five forest management patterns with different stand ages.

式的最大生物量碳密度和平均碳密度分别为 69.03 和 41.92  $t \cdot hm^{-2}$ ; 红松连作模式分别为 61.66 和 39.78  $t \cdot hm^{-2}$ , 比落叶松连作模式分别低 10.7% 和 5.1%; 落叶松-红松轮作模式为 69.03 和 40.49  $t \cdot hm^{-2}$ , 平均生物量碳密度比落叶松连作模式低 3.4%。

落叶松-红松复层林模式的最大生物量碳密度为 83.57  $t \cdot hm^{-2}$ , 此时上层落叶松和下层红松的林龄分别为 50 和 20 年, 平均生物量碳密度为 49.52  $t \cdot hm^{-2}$ , 比落叶松连作模式高 18.1%; 落叶松-红松-水曲柳复层林模式最大生物量碳密度为 94.32  $t \cdot hm^{-2}$ , 此时上层红松和下层水曲柳的林龄分别为 130 和 70 年, 平均生物量碳密度为 62.55  $t \cdot hm^{-2}$ , 比落叶松连作模式高 49.2%。

### 2.3 经营过程中落叶松和红松林的碳汇动态

单木生长和林分密度可以反映经营影响的落叶松林碳密度变化过程。由图 5 可以看出, 落叶松林连年碳汇量在 10 年时达到最大值 12.35  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ , 年均碳汇量在 24 年达到最大值 6.32  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ; 经营周期内年均碳汇量 4.86  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ; 而红松林连年碳汇量在第 15 年达到最大值 13.76  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ , 年均碳汇量在 28 年达到最大值 6.76  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ; 在经营周期内年均碳汇量为 4.39  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。

落叶松林在经营周期内经历 4 次抚育间伐, 以

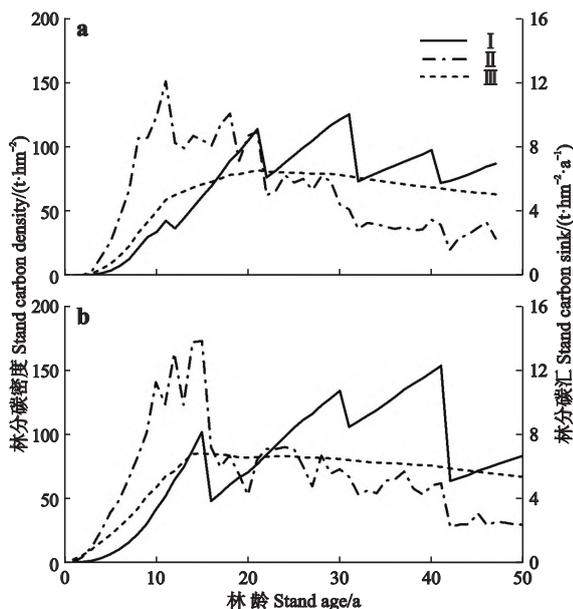


图 5 落叶松和红松人工林经营周期内林分连年碳汇量、年均碳汇量和林分碳密度的变化

Fig.5 Changes in successive carbon sink, mean annual carbon sink and stand carbon density of larch and Korean pine plantation during the forest management cycle.

碳计算的间伐强度分别为 32.9%、32.2%、42.1% 和 26.3%, 碳密度在 30 龄时最大, 为 120.84  $t \cdot hm^{-2}$ , 平均碳密度为 66.50  $t \cdot hm^{-2}$ ; 红松林在经营周期内经历 3 次抚育间伐, 以碳计算间伐强度分别为 52.9%、21.0% 和 58.7%, 碳密度在 80 龄时最大, 为 156.62  $t \cdot hm^{-2}$ , 但在 40 龄时曾达到 147.82  $t \cdot hm^{-2}$ , 平均碳密度为 91.60  $t \cdot hm^{-2}$ 。

由图 6 可以看出, 在经营周期内, 落叶松连作模式的年均碳汇量为 5.45  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ , 而红松连作模式、落叶松-红松轮作模式显著小于落叶松连作模式, 分别为 4.36 和 4.68  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ; 落叶松-红松复层林模式和落叶松-红松-水曲柳复层林模式则分别为 5.01 和 5.59  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。复层林模式的最大碳汇量为 16.69  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ , 出现在上层落叶松 45 年和下层红松 15 年时。

由图 7 可以看出, 落叶松连作模式和红松连作模式的最大碳密度分别为 120.84 和 156.62  $t \cdot hm^{-2}$ , 平均碳密度分别为 66.95 和 89.06  $t \cdot hm^{-2}$ 。落叶松-红松轮作模式、落叶松-红松复层林模式和落叶松-红松-水曲柳复层林模式的最大碳密度分别为 156.62、196.32 和 215.10  $t \cdot hm^{-2}$ , 平均碳密度为 85.23、98.83 和 100.26  $t \cdot hm^{-2}$ 。

如果以 120 年为统计周期, 落叶松、红松连作模式和落叶松-红松轮作模式的累积固碳量分别为 654.49、523.20 和 561.50  $t \cdot hm^{-2}$ 。落叶松-红松复层林模式和落叶松-红松-水曲柳复层林模式的累积

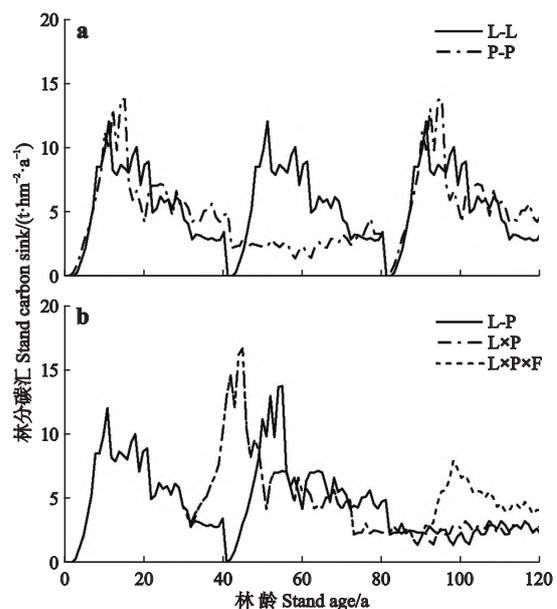


图 6 不同经营模式经营周期内林分碳汇变化

Fig.6 Changes in stand carbon sink for different forest management patterns during the forest management cycle.

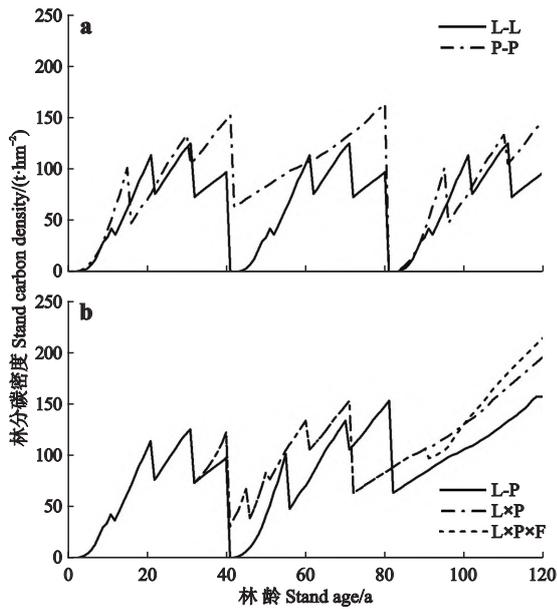


图7 不同经营模式经营周期内林分碳密度变化  
Fig.7 Changes in stand carbon density for different forest management patterns during the forest management cycle.

固碳量分别为 598.27 和 670.05  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

### 3 讨 论

#### 3.1 辽宁省落叶松林和红松林的固碳潜力

利用二类调查数据得出的林分碳汇,采用的是“空间代时间”的方法,实际上反映的是林地保留木碳密度随林龄的变化,本质上是差值法。本研究中,落叶松林和红松林能达到的最大碳密度和在经营周期内的年固碳量,与以往利用二类调查数据得出的结论相似<sup>[30]</sup>。现有落叶松林 35 龄和红松林 65 龄以后,林分碳密度增长缓慢,林地的碳汇量逐渐趋于饱和。也就是说,落叶松林的轮伐期不应超过 35 年,红松林不应超过 65 年,这一结果与董灵波等<sup>[27]</sup>对长白落叶松人工林最优轮伐期的结论一致。依据林分碳成熟年龄<sup>[26]</sup>,如果以获取最大碳汇为目标,落叶松林应该以 22 年为轮伐期,红松林应该以 41 年为轮伐期(图 2),年均碳汇量分别为 2.33 和 1.09  $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。因此,改变采伐周期后,落叶松林和红松林碳汇量可分别提高 43.8% 和 65.1%。

根据现有落叶松林和红松林的平均碳密度和模型预测的最大碳密度(图 1),计算出落叶松林和红松林的固碳潜力为 12.67 和 25.83  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ 。据此测算,无蓄积小班(落叶松为 41008.9  $\text{hm}^2$  和红松为 15136.8  $\text{hm}^2$ )的固碳潜力为 3.84 Tg C,有蓄积小班为 7.82 Tg C,二者合计 11.66 Tg C,是现有林分碳储量的 36.6%。当前落叶松和红松林的平均林龄为 21.3 和

27.1 年,这两种人工林达到最大碳储量的时间为 28.7 和 52.9 年,但快速固碳期为 13.7 和 37.9 年。

#### 3.2 经营模式的增碳潜力

提高森林固碳潜力的方法之一是增加林地的最大碳密度,即碳库容量<sup>[28]</sup>。本研究中,落叶松连作模式的年均碳汇量和最大碳密度都大于红松连作模式,落叶松林的最大碳密度大于红松林,因此落叶松转变为红松林后将会使最大碳密度降低 9.8%,减少了潜在的固碳量。落叶松-红松复层林模式、落叶松-红松-水曲柳复层林模式的最大碳密度分别为 83.57 和 94.32  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ ,比落叶松连作模式高 21.1% 和 36.6%,因此,诱导复层林模式有利于提高林地的增碳潜力。

在面积不变的情境下,不断提高林地碳密度是增加区域碳汇的主要途径。由于轮伐期的差异,不同经营模式林地平均碳密度有较大差异。落叶松-红松-水曲柳复层林模式在经营周期内平均碳密度最大,为 62.55  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ ,是落叶松连作模式的 1.5 倍,是红松连作模式的 1.6 倍。因此,复层林模式具有更大的碳密度。复层林增加了林地空间利用率,缩短了再造林的成林时间,提高了生产力<sup>[21,30]</sup>。

#### 3.3 经营对林分碳密度和碳汇的影响

本研究表明,乔木碳密度并不是一直增长的(图 5)。在当前的经营密度下,落叶松林和红松林分别在 30 和 40 年时碳密度达到或接近最大,如果利用差值法来计算林分碳汇,落叶松人工林 40 年的最大碳密度(97.24  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )小于 30 年(120.84  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ ),红松人工林 80 年的最大碳密度(156.62  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )与 40 年(147.82  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )相差不大,因此差值法很容易得出林地为碳源或者弱碳汇,但实际上落叶松林在 30 年之后的碳汇仍可达 2.75  $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,红松林在 40 年之后碳汇达 2.54  $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,仍然有较强的碳汇能力。

用差值法来计算林地碳汇时,一般用碳密度除以对应的林龄,则 40 年的落叶松林和 80 年红松林年均碳汇为 2.43 和 1.96  $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,仅为以累积生长量法计算结果(5.45 和 4.36  $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )的 44.6% 和 44.5%。因此,以两期森林清查数据的差计算森林碳汇时,低估了林分的实际碳汇能力。

#### 3.4 人工林固碳增汇的最佳经营模式

试验样地计算的林分平均碳密度,红松林大于落叶松林,与二类调查数据分析结果不同,这可能与试验地的经营密度或者立地条件有关。但复层林的结果与二类数据的结果相似,复层林模式的平均和

最大碳密度明显高于纯林连作模式(图3、图7)。其中,落叶松-红松-水曲柳复层林最大,平均碳密度和最大碳密度比落叶松连作模式分别高49.7%和78.0%,比红松连作模式分别高12.6%和37.3%。

本研究中,对于林地的年碳汇量和累积固碳量,落叶松-红松-水曲柳复层林最大,稍高于落叶松连作模式,但比红松连作模式高28.1%,比落叶松-红松复层林模式高12.0%,因此落叶松-红松-水曲柳复层林具有较高的年碳汇量,而且在形成红松水曲柳等阔混交林后仍能维持 $4.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右的碳汇能力。若以林地最大碳密度时的林分状态考虑,落叶松-红松复层林模式中,落叶松45~50龄和红松15~20龄时最大,而红松-水曲柳复层期间,以红松130龄和水曲柳70龄时最大,因此在落叶松达到45~50龄伐除上层落叶松,在红松70龄时伐除上层红松,调整冠层树种组成,最利于林分固碳增汇。

有研究表明,人工林连作导致土壤有机碳降低,林地土壤表层有机碳可能在皆伐后的5~10年内显著降低,约在15年之后才能恢复到伐前水平<sup>[23]</sup>。有研究表明,在福建三明陈大国有采育场,人工造林(1年生)土壤有机碳矿化损失量为 $12.775 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[31]</sup>。复层林模式不但具有较高乔木碳密度,且能增加土壤碳库,碳汇效果和潜力更明显<sup>[21,32]</sup>。

当以差值法计算森林碳汇时,追求的是各年龄的平均碳密度达到最大,用复层林代替落叶松纯林,可使乔木固碳量增加近一半。在经营模式选择中,栽植长寿命树种、诱导复层林结构和延长采伐周期能够提高人工林碳储量和潜力;当累积以生长量法计算森林碳汇时,追求的是林分累积固碳量达到最大,即各年龄的连年碳汇量达到最大,此时用复层林代替落叶松纯林,乔木累积固碳量可能还会减少。在经营模式选择中,采用速生树种、短采伐周期,或诱导复层林结构能提高人工林的固碳速率和潜力。

#### 4 结 论

辽宁省落叶松人工林和红松人工林的最大碳密度分别为 $70.24$ 和 $63.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,若不改变经营模式,则其增碳潜力为 $11.66 \text{ Tg C}$ 。在现有经营周期内落叶松人工林(40年)和红松人工林(80年)固碳速率分别为 $1.62$ 和 $0.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,碳成熟年龄分别为22和41年,以此为采伐周期可提高落叶松人工林和红松人工林碳汇37.0%和36.3%;红松替代落叶松后林分年碳汇量将减少40.7%,碳密度减

少5.1%。现有经营模式中,落叶松-红松-水曲柳复层林模式比落叶松人工林模式的林分碳密度高36.6%,累积碳汇量高2.5%,且能够持续固碳,减少土壤碳损失。以红松人工林代替落叶松人工林时,在面积不变的情境下,碳储量和累积固碳量都将显著降低。落叶松-红松-水曲柳复层林无论平均碳密度还是累积固碳量都显著高于落叶松,是提高落叶松人工林的最佳经营模式。

#### 参考文献

- [1] Peng SL, Wen D, He NP, et al. Carbon storage in China's forest ecosystems: Estimation by different integrative methods. *Ecology and Evolution*, 2016, 6: 3129–3145
- [2] Fang JY, Guo ZD, Piao SL, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50: 1341–1350
- [3] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. *林业科学*, 2011, 47(7): 7–12
- [4] 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. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(2): 199–214
- [5] Yao L, Liu T, Qin J, et al. Carbon sequestration potential of tree planting in China. *Nature Communications*, 2024, 15: 8398
- [6] 王丹, 王文娟, 武海涛, 等. 气候变暖对长白山自然保护区森林碳库的影响. *生态学杂志*, 2024, 43(9): 2596–2606
- [7] Ge R, He H, Ren X, et al. Underestimated ecosystem carbon turnover time and sequestration under the steady state assumption: a perspective from long-term data assimilation. *Global Change Biology*, 2019, 25: 938–953
- [8] Li P, Shang R, Chen JM, et al. Evaluation of five models for constructing forest NPP-age relationships in China based on 3121 field survey samples. *Biogeosciences*, 2024, 21: 625–639
- [9] Wang S, Chen JM, Ju WM, et al. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901–2001. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85: 524–537
- [10] Yu GR, Chen Z, Piao SL, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111: 4910–4915
- [11] 王耀, 梁宇, 刘波, 等. 东北地区森林地上碳储量动态及固碳潜力预测[EB/OL]. (2024-08-16) [2024-10-01]. *生态学杂志*. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-STXZ20240815002.htm>
- [12] Cai WX, He NP, Li MX, et al. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: Spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. *Science Bulletin*, 2022, 67: 836–843
- [13] He N, Wen D, Zhu J, et al. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050. *Global*

- Change Biology, 2017, 23: 1575-1584
- [14] 田杰, 于大炮, 周莉, 等. 辽东山区典型森林生态系统碳密度. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2723-2729
- [15] 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. 林业科学, 2022, 58(2): 32-41
- [16] 刘迎春, 高显连, 付超, 等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力. 生态学报, 2019, 39(11): 4002-4010
- [17] 蔡伟祥, 徐丽, 李明旭, 等. 2010—2060年中国森林生态系统固碳速率省际不平衡性及调控策略. 地理学报, 2022, 77(7): 1808-1820
- [18] 朱建华, 田宇, 李奇, 等. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力. 生态学报, 2023, 43(9): 3442-3457
- [19] 王婷, 任思远, 陈云, 等. 基于树木年轮信息的宝天曼不同径级华山松碳储量动态变化. 科学通报, 2014, 59(35): 3499-3507
- [20] 刘立斌, 许海洋, 郭银明, 等. 基于树木年轮定量重建过去50年贵州典型森林优势树种的地上生物量与生产力变化. 生态学报, 2020, 40(10): 3441-3451
- [21] 丁磊, 潘丕克, 李淳, 等. 间伐方式对日本落叶松人工林生长状况、林下植物多样性及土壤性质的影响. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2024, 53(4): 483-490
- [22] 谢锦, 闫巧玲, 张婷. 间伐对日本落叶松人工林林下更新木本植物组成和生长影响的时间效应. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2481-2490
- [23] 巨文珍, 王新杰, 孙玉军. 长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律. 生态学报, 2011, 31(4): 1139-1148
- [24] 王春梅, 邵彬, 王汝南. 东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力. 生态学报, 2010, 30(7): 1764-1772
- [25] 廖国莉, 段劫, 贾忠奎, 等. 辽东地区不同林龄长白落叶松人工林生态系统碳储量分配特征. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 8-22
- [26] 殷鸣放, 赵林, 陈晓非, 等. 长白落叶松与日本落叶松的碳储量成熟龄. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2567-2571
- [27] 董灵波, 蔺雪莹, 张一帆, 等. 兼顾碳汇和木材生产的长白落叶松人工林最优轮伐期. 林业科学, 2022, 58(5): 18-30
- [28] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508
- [29] 国家林业局. 东北东部山地森林抚育技术规程(LYT 2592—2016). 北京: 中国质量标准出版传媒有限公司, 2016
- [30] 陈传国, 朱俊凤. 东北主要林木生物量手册. 北京: 中国林业出版社, 1989
- [31] 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 等. 中国森林碳汇经营策略探讨. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 297-303
- [32] 刘迎春, 于贵瑞, 王秋风, 等. 基于成熟林生物量整合分析中国森林碳容量和固碳潜力. 中国科学: 生命科学, 2015, 45(2): 210-222

---

作者简介 张岩松, 男, 1993年生。主要从事森林生态系统管理和碳汇形成机制研究。E-mail: zhangyansong\_iae@163.com

责任编辑 孙 菊

---