

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.030

郎明翰,张日升,凡胜豪,等.科尔沁沙地南缘樟子松人工林碳汇及对气候因子的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):236-245.

LANG Minghan, ZHANG Risheng, FAN Shenghao, et al. Carbon sequestration function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and its responses to climate factors on the Southern Edge of Horqin Sandy Land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 236-245.

科尔沁沙地南缘樟子松人工林碳汇及对气候因子的响应

郎明翰¹, 张日升¹, 凡胜豪², 肖巍¹, 姜涛³, 卢元⁴, 李书杨⁵, 刘思琪⁶

(1. 辽宁省沙地治理与利用研究所, 辽宁章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测研究站, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁省水利事务服务中心, 沈阳 110003; 3. 辽宁省沙地治理与利用研究所, 国家农业环境彰武观测实验站,

辽宁 阜新 123000; 4. 辽宁省林业调查规划监测院, 沈阳 110122; 5. 内蒙古兴安盟林业科学研究所,

内蒙古 兴安盟 137400; 6. 敖汉旗林业和草原局, 内蒙古 赤峰 024399)

摘要: [目的] 以科尔沁沙地南缘不同初植密度沙地樟子松人工林为研究对象, 旨在明晰不同初植密度林分碳储量、碳汇功能及其对气候的响应机制, 以便于评估森林生态系统的固碳功能及其适应性管理。

[方法] 利用林分胸高断面面积估算樟子松人工林碳储量及固碳速率, 结合气象因子分析其对温度、降水及蒸发的响应, 利用 GM(1,1) 灰色预测模型对 2030 年林分碳储量进行预测。[结果] 不同初植密度樟子松人工林碳储量和固碳速率年际波动趋势基本一致, 碳储量逐年增加, 固碳速率曲线呈“U”形。初植密度过低或者过高均降低樟子松人工林碳汇能力; 在林龄 29 年之前, 碳汇强度最高林分初植密度为 1 500~2 000 株/hm², 31~42 年林龄的林分最优密度为 1 000~1 200 株/hm²。林分碳储量随林分密度增加而增加, 且二者拟合公式符合 Logarithm 方程。樟子松人工林固碳速率对降雨无响应。不同初植密度林分的气温对固碳速率响应模式不同, 前一年 8 月及当年 3, 5, 6, 7 月平均气温是限制高密度、极高密度樟子松人工林碳汇的主要气候因子; 前一年 8 月及当年 3, 10 月平均气温是限制低密度、中密度樟子松人工林碳汇的主要气候因子。由蒸发和密度林固碳速率相关分析可知, 低密度樟子松人工林碳汇对蒸发的响应更为敏感。基于 GM(1,1) 灰色模型可知, 过高或者过低初植密度均降低未来樟子松人工林固碳潜力, 固碳速率最优初植林分密度为 1 772 株/hm²。[结论] 林分初植密度对沙地樟子松林的碳储量和碳汇及其对气候响应存在明显影响, 初植密度调整可能是气候变化下樟子松人工林适应管理的关键措施之一。

关键词: 碳储量; 碳汇; GM(1,1)模型; 初植密度; 人工林

中图分类号: S758.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0236-10

Carbon Sequestration Function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation and Its Responses to Climate Factors on the Southern Edge of Horqin Sandy Land

LANG Minghan¹, ZHANG Risheng¹, FAN Shenghao², XIAO Wei¹,

JIANG Tao³, LU Yuan⁴, LI Shuyang⁵, LIU Siqu⁶

(1. Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization, Liaoning Zhanggutai Desert Ecosystem Research Station,

Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Soil and Water Conservation Bureau of Liaoning Province, Shengyang 110003,

China; 3. Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization, National Agricultural Environment Zhangwu

Observation and Experimental Station, Fuxin, Liaoning 123000, China; 4. Liaoning Forestry Investigation,

Planning and Monitoring Institute, Shenyang 110122, China; 5. Xing'anmeng Institute of Forestry Sciences Wulanhot,

Xing'anmeng, Inner Mongolia 137400, China; 6. Bureau of Aohan Banner

Forestry and Grassland, Chifeng, Inner Mongolia 024300, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the carbon storage, carbon sink function, and response mechanism to climate in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different initial planting densities

收稿日期: 2024-03-08 修回日期: 2024-04-03 录用日期: 2024-04-10 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-06

资助项目: 国家自然科学基金项目 (32071836); 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302505-02, SQ2023YFD1500036); 辽宁省农业科学院基
本科研业务费计划项目 (2021HQ1913)

第一作者: 郎明翰 (1995—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事荒漠水文研究。E-mail: 18804502009@163.com

通信作者: 张日升 (1976—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事荒漠化防治和森林培育研究。E-mail: zrs973204@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

on the southern edge of Horqin Sandy Land. The goal is to facilitate the assessment of the carbon sequestration function and adaptive management of forest ecosystems. [Methods] Estimating carbon storage and carbon sequestration rate of *Pinus sylvestris* plantations using stand height and cross-sectional area, and analyzing their responses to temperature, precipitation, and evaporation in conjunction with meteorological factors. The GM (1,1) grey prediction model was used to predict forest carbon storage in 2030. [Results] The carbon storage and sequestration rate of *Pinus sylvestris* plantations with different initial planting densities exhibited similar annual fluctuations, with an overall increase in carbon storage each year. The curve of the sequestration rate showed a “U” shape. Both thinly and excessive initial planting densities can reduce the carbon carbon sequestration capacity of *Pinus sylvestris* plantations. Before reaching 32 years old, the highest carbon sequestration intensity was observed in stands with initial planting densities of 1 500~2 000 tree/hm², and for stands aged 35~46 years, the optimal density was 1 000~1 200 tree/hm². The carbon storage increased logarithmically with increasing stand density. The response pattern of the planted *Pinus sylvestris* forests' carbon sequestration rate differed among stands with different initial planting densities regarding temperature but not precipitation. For high and extremely high-density *Pinus sylvestris* plantations, the average temperature in August of the previous year and in March, May, June and July of the current year were the main climatic factors limiting carbon sink. For low and medium-density plantations, the average temperature in August of the previous year and in March and October of the current year were the main climatic factors that constrain carbon sink. The correlation analysis between evapotranspiration and carbon sequestration rate in different planting density stands showed that carbon sink of low-density *Pinus sylvestris* plantations was more sensitive to evapotranspiration. Based on the GM (1,1) grey model, it was found that excessively high or low initial planting density would reduce the carbon sequestration potential of future *Pinus sylvestris* plantations. The optimal planting density for carbon sequestration rate was 1 772 tree/hm². [Conclusion] The initial planting density of *Pinus sylvestris* has a significant impact on carbon storage and carbon sequestration, as well as their response to climate change in sandy areas. Adjusting the initial planting density may be one of the key adaptive management measures for *Pinus sylvestris* plantations under climate change.

Keywords: carbon storage; carbon sink; GM (1,1) model; planting density; plantation

Received: 2024-03-08

Revised: 2024-04-03

Accepted: 2024-04-10

Online(www.cnki.net): 2024-06-06

碳循环是全球气候变化研究中备受国际社会关注的一个核心问题^[1-2]。碳循环分为碳源和碳汇2个过程,碳源是指碳排放的源头,碳汇指的是碳的储存和吸收。随着人类使用化石燃料、工业生产及毁林开荒等活动的增加,导致大量的CO₂等温室气体排放到大气中,CO₂气体的持续增加已造成全球气候的变暖,进而对地球生态系统造成巨大的威胁^[3]。森林生态系统作为陆地生态系统的主体,由于其巨大的碳库功能和较高的生产力,在调节全球碳平衡、减缓大气中CO₂等温室气体浓度上升及维持全球气候稳定等方面具有不可替代的作用^[4]。利用森林生态系统对CO₂进行固定是实现减缓温室效应是重要举措,因此定量估算森林碳储量、碳汇能力的研究成为当下科学研究热点^[5]。我国是世界上人工林面积最大的国家,人工林面积达6 200万hm²,约占我国森林总面积的

31.8%^[6]。自20世纪70年代以来,我国森林碳储量的增加主要来源于人工林的营造^[7]。几十年,国内外学者对杨(*Populus*)^[8]、兴安落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)^[9]、杉木(*Cunninghamia lanceolate* (Lamb.) Hook.)^[10]等人工林碳汇功能开展了大量的研究,且众学者目光主要集中在气候变化对人工林碳汇功能的影响。林分密度控制作为森林经营的重要手段,不仅影响林内自然生态环境,也影响林分的生长、发育及各器官的生物量和碳储量的分配格局^[11]。林分初植密度是造林初始决策,时刻影响着单木和林分整体的发展,虽然林分经营过程中抚育措施可以调整优化林分结构,但其对苗木初始影响却无法更改。

本文以沙地樟子松人工林为研究对象,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是我国北方干旱

半干旱地区的主要造林树种,是欧洲赤松的地理变种之一,天然分布于东北亚一带^[12]。我国主要分布在大兴安岭北部、东部、黑龙江流域及呼伦贝尔沙地地区^[13]。20 世纪 50 年代初,在辽宁省彰武县章古台镇开展了樟子松引种栽植试验,经对比,樟子松表现耐旱、耐寒等优良的特性,是众多固沙植物中综合表现最好的,并营建起中国第 1 个以樟子松为主的防风固沙林,为全国植被治沙提供了样板^[14]。采用模型模拟法估算不同初植密度樟子松人工林乔木层碳储量。通过研究林分初植密度对林分乔木层碳储量动态变化的影响机制,从林分固碳速率和碳储量动态预估的角度,探讨林分初植密度与人工林生态系统碳储量定性定量关系,为确定基于碳汇效益的林分初植密度营造措施提供依据。同时利用具有“贫信息”“小样本”及预测结果准确特点的 GM(1,1)模型^[15]对不同初植密度樟子松人工林 2030 年碳储量进行模拟预测,在“双碳”目标背景下,为科尔沁沙地南缘沙地樟子松林碳汇规划决策和经营管理提供科学参考和理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省彰武县章古台镇辽宁省沙地治理与利用研究所实验林场(42°43′15″N,122°22′30″E)三家子试验区,海拔 204 m,地处科尔沁沙地东南部,原分布着大面积沙丘沙地,经过治理后,大多数转

化固定沙丘沙地^[5]。多年平均气温 6.8 ℃,全年无霜期 150~160 天,多年平均降水量 456 mm,年平均蒸发量 1 313 mm,历年最低气温-30.5 ℃,属于半湿润气候。土壤以风沙土为主,沙层厚度为 126~128 m^[7],沙土贫瘠,流动风沙土 0—30 cm 土层内有机质含量为 3.3~3.6 g/kg,樟子松林地 0—30 cm 土层有机质含量为 4.2~5.0 g/kg。研究区地处森林—草原过渡带,以樟子松纯林为主,林下植被有细叶胡枝子(*Lespedeza daurica*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)和披碱草(*Chloris virgata*)等。

1.2 样地设置与调查

1980 年用 2 年生樟子松裸根苗造林,造林设计不同林分密度,每个小区面积为 80 m×80 m。试验区内樟子松林未经历过人工干扰,模拟自然状态下不同林分初植模式的生长发育。根据《辽宁省樟子松人工林经营技术规程》^[16]选取低(L, low density, 435, 826 株/hm²)、中(M, medium density, 1 172, 1 937 株/hm²)、高(H, high density, 3 724, 3 919 株/hm²)和极高(EH, extremely high density, 5 826 株/hm²) 4 个初植密度梯度的样地,于 1992 年、1997 年、2000 年、2003 年、2006 年、2009 年、2012 年、2015 年、2018 年、2020 年对标准地进行每木检尺,获取林分平均胸径(表 1)和现存林分密度(图 1)。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plot

样地 编号	密度 梯度	坡度/(°)	坡向	海拔/m	平均胸径/cm								
					1992 年	1997 年	2000 年	2003 年	2006 年	2009 年	2012 年	2018 年	2020 年
L1	低	10	ES	200	1.20	6.30	8.41	11.08	13.84	16.56	19.49	23.33	28.81
L2	低	10	S	205	4.25	13.57	17.08	20.84	24.38	27.62	31.26	36.46	44.07
M3	中	8	E	201	8.16	30.11	39.84	47.53	53.73	57.33	64.50	76.28	92.78
M4	中	7	WS	220	8.68	24.14	29.82	35.09	39.42	42.91	47.16	53.93	63.60
H5	高	11	S	210	11.47	28.68	34.63	38.15	40.57	41.29	44.14	49.55	57.38
H6	高	2	ES	207	11.86	32.88	39.53	42.76	43.50	41.80	45.61	51.65	60.08
EH7	极高	1	E	209	13.18	33.26	38.73	41.81	43.13	42.74	45.06	49.92	56.52

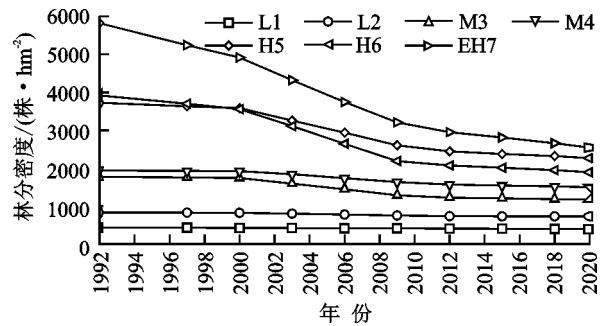


图 1 不同样地樟子松林 1992—2020 年密度动态变化
Fig. 1 Dynamic changes in density of *Pinus sylvestris* forest in different areas from 1992 to 2020

1.3 碳储量估算

根据以树木胸径为参数的樟子松生物量方程计算得到不同年份樟子松林分的总生物量^[17]:

$$W_i = 0.121\ 2 \times DBH_i^{2.362\ 6} \tag{1}$$

$$W = \frac{\sum_{i=1}^m W_i}{S \times 1\ 000} \tag{2}$$

式中: W_i 为樟子松树木的总生物量(kg); DBH_i 为树木胸径(1.3 m 处)(cm); W 为样地总生物量密度(Mg/hm²); S 为样地面积(hm²); m 为每个调查样地的樟子松株数(株)。

乔木层碳储量计算公式^[18]为:

$$C = WR \quad (3)$$

式中: C 为样地总碳储量密度(Mg/hm^2); R 为樟子松干物质含碳率; W 为樟子松林总生物量(kg)。

乔木层固碳速率计算公式为:

$$\text{CSR}_\alpha = (C_\alpha - C_\beta) / (\alpha - \beta) \quad (4)$$

式中: C_α 为第 α 年的碳密度(Mg/hm^2); CSR_α 为第 α 年碳密度的年增量 [$\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; $\alpha - \beta$ 为年份差值(年)。

1.4 GM(1,1)模型与检验

GM(1,1)模型被广泛地应用在森林资源发展趋势预测方面,计算过程简单,模拟预测结果准确。

其拟合方程可表示为:

$$\text{d}x^{(1)}(t)/\text{d}t + ax^{(1)}(t) = b \quad (5)$$

对公式(5)求解得:

$$x^{(1)}(t+1) = \left[x^{(1)}(t) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (6)$$

式中: t 为时间; a 为发展灰数; b 为内生控制灰数; $x^{(1)}(t)$ 为 t 时刻的原始值; $x^{(1)}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻的累加生成值。

本研究采用确定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)、平均误差绝对值(MAE)和平均相对误差绝对值(MARE)评价拟合效果。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N - P}} \quad (8)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |Y_i - \hat{Y}_{i-i}|}{N} \quad (9)$$

$$\text{MARE} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_{i-i}}{Y_i} \right)}{N} \times 100\% \quad (10)$$

式中: N 为样本总量; Y_i 为第 i 个观测值; $\hat{Y}_i$ 为采用全部数据建模得到的拟合值; $\bar{Y}$ 为观测值的平均值。

1.5 气象数据

气象数据来自辽宁省沙地治理与利用研究所(辽宁省固沙造林研究所)气象站资料,包括1992—2020年月平均气温、月降雨量和月蒸发量等3个气象因素。综合考虑前一年气候变化对当年树木生长存在的影响,以前一年6月至当年12月为时间跨度,进行统计分析,利用Pearson相关分析碳储量与气候因子的关系。

1.6 数据处理

文中所有数据用R-Studio 2021、Excel 2016和Origin 2017等统计分析软件对试验数据进行分析与作图。

2 结果与分析

2.1 碳储量、碳汇年际变化

由图2可知,7块初植密度樟子松人工林碳储量年际动态变化趋势基本一致,碳储量逐年增高。低初植密度林固碳幅度最低,中初植密度林的固碳幅度最高。14~42年林龄间样地1增长幅度最小($31.81 \text{ Mg}/\text{hm}^2$),3号样地碳储量增幅最大,为 $98.53 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。样地2号、4号、5号、6号、7号的碳储量增幅分别为 $45.98, 62.39, 51.82, 54.51, 48.17 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。随着林分的生长发育,林分碳储量逐年升高,42年林龄7块样地碳储量分别为 $33.01, 50.23, 106.69, 71.08, 63.29, 66.37, 61.35 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。

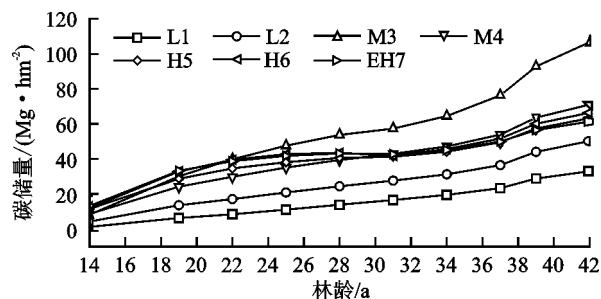


图2 不同样地樟子松人工林碳储量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in carbon storage of *Pinus sylvestris* plantation in different regions

由图3可知,不同初植密度樟子松人工林固碳速率年际波动一致,曲线呈“U”形。17~29年林龄固碳速率逐年降低,29~42年林龄固碳速率逐年升高,29年林龄樟子松林的固碳速率为最低值。7块样地29年林龄固碳速率最大值为3号样地的 $1.2 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,最小值为6号样地的 $-0.57 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。17年林龄固碳速率分别为 $1.02, 1.86, 4.39, 3.09, 3.44, 4.20, 4.01 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。样地42年林龄固碳速率分别为 $2.10, 3.08, 6.96, 3.74, 2.96, 3.14, 2.41 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

2.2 林分密度对樟子松林碳储量、碳汇的影响

林分密度是限制樟子松人工林固碳速率的关键因子之一。林分生长的不同时期,存在着最优的林分密度,樟子松人工林的最优密度随着林龄的增加逐渐降低。由图4可知,14~19年林龄段,固碳速率最高值的林分密度为 $4000 \text{ 株}/\text{hm}^2$;19~22年林龄段,固碳速率最高值的林分密度为 $3800 \text{ 株}/\text{hm}^2$;22~25年林龄段,固碳速率最高值的林分密度为 $1800 \text{ 株}/\text{hm}^2$;25~37年林龄段,固碳速率最高值的林分密度

变化不大,为 1 500 株/hm²;37~42 年林龄段,固碳速率最高值的林分密度为 1 200 株/hm²。

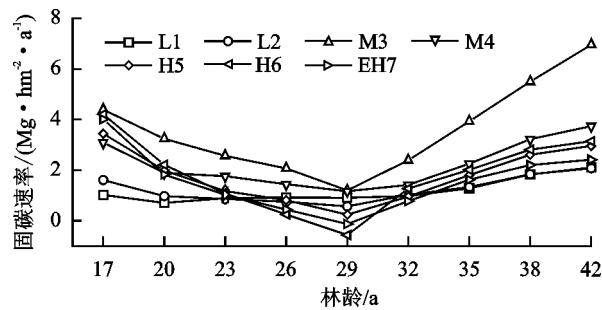


图 3 不同样地樟子松人工林固碳速率动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in carbon fixation rate of *Pinus sylvestris* plantation in different areas

由图 5 可知,林分碳储量随林分密度增加而增加。将不同年份不同林龄与林分碳储量二者数据进行拟合发现,二者的关系符合对数函数形式。Logar

ithm 方程对不同林龄樟子松林分碳储量均有较好的拟合效果,能够反映出其碳储量随林分密度变化而变化的趋势,但其随林龄的增加,拟合 R^2 逐渐减小,前期林分密度可以较好地解释碳储量变化规律,随着林龄的增加,拟合效果较差,二者逐渐解耦。

2.3 樟子松林碳汇对气象的响应机制

2.3.1 樟子松林碳汇对降雨的响应 不同初植密度的樟子松人工林碳汇与月降雨量的相关分析表明降雨对樟子松人工林固碳速率的影响的时期为当年 5 月。低初植密度林 L 和中初植密度林 M 固碳速率与当年 5 月降雨显著正相关($p < 0.05$),当初植密度林分过高时,降雨量与林分碳汇功能相关性降低(图 6)。总体来看,当年 5 月降雨是限制樟子松人工林碳汇功能主要时期,这与樟子松树木进入生长期的时间相吻合。

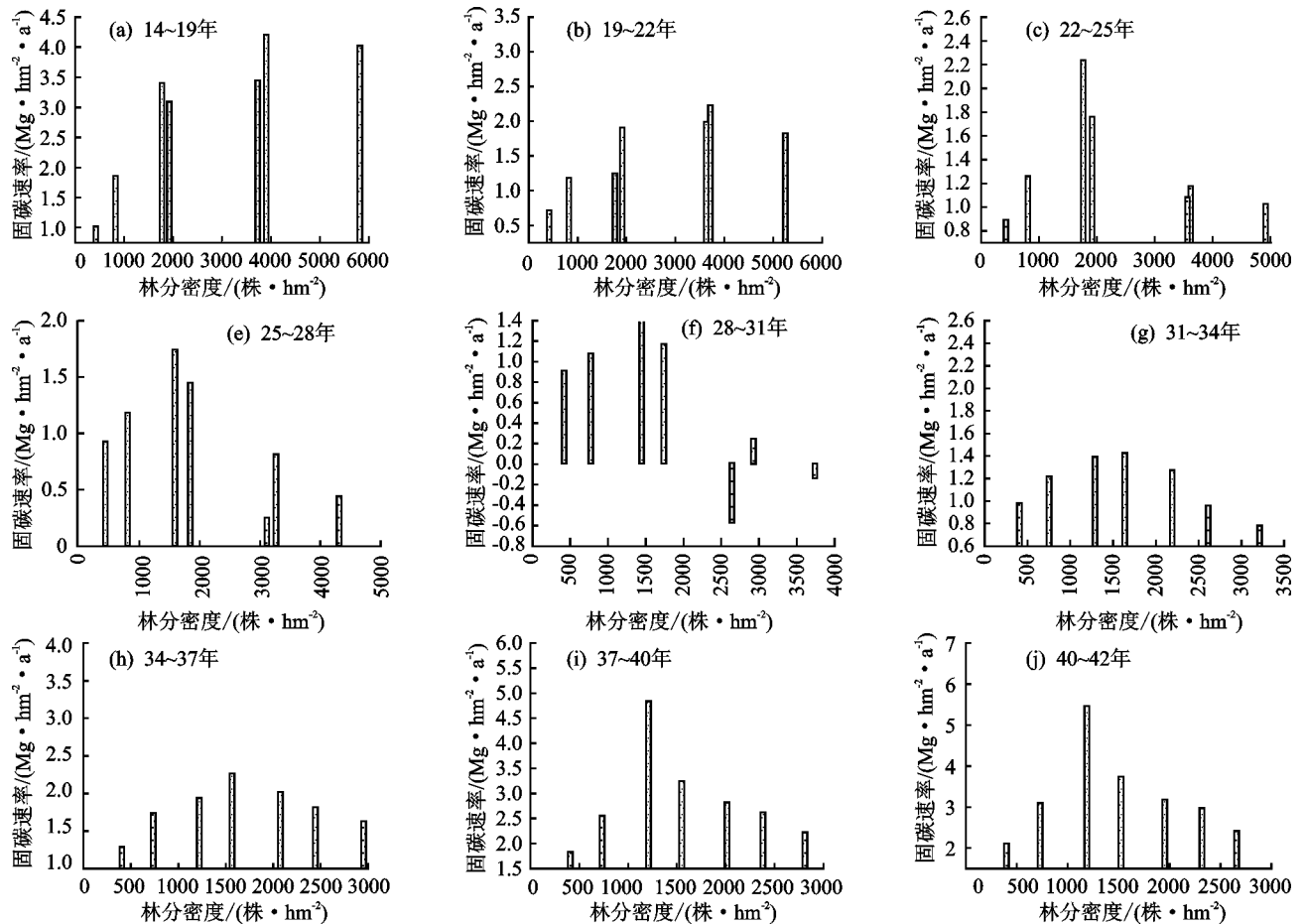


图 4 林分密度对樟子松人工林碳汇的影响

Fig. 4 The effect of stand density on carbon sequestration of *Pinus sylvestris* plantation

2.3.2 樟子松林碳汇对气温的响应 不同初植密度的樟子松人工林碳汇与月平均气温的相关分析表明,除 L1 和 H6 样地外,前一年 8 月平均气温与樟子松人工林碳汇均呈现显著负相关($p < 0.05$);低中密度林样地(L1、L2、M3、M4)的樟子松人工林碳汇与当年 10 月份平均气温呈显著负相关($p < 0.05$);除 L1

样地外,当年 3 月平均气温与樟子松人工林碳汇呈显著正相关($p < 0.05$);H5、H6、EH7 3 个樟子松人工林样地与当年 5 月平均气温呈显著负相关($p < 0.05$),与当年 6、7 月平均气温呈显著正相关($p < 0.05$)(图 7)。当年 3、5、6、7 月平均气温与樟子松人工林碳汇的相关系数随林分密度的增加逐渐增加;当

年 10 月平均气温与樟子松人工林碳汇的相关系数随林分密度的增加逐渐减小。总体来看,前一年 8 月及当年 3,5,6,7 月平均气温是限制高密度、极高密度樟子松人工林碳汇的主要气候因子;前一年 8 月及当年 3,10 月平均气温是限制低密度、中密度樟子松人工林碳汇的主要气候因子。

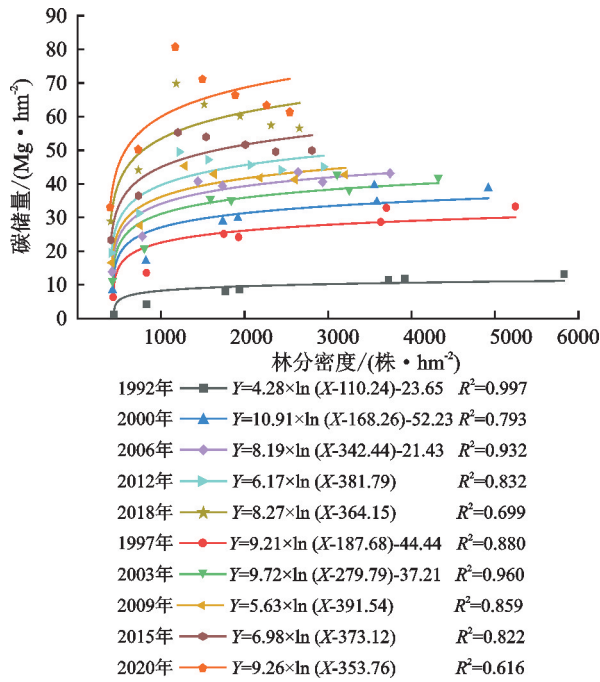


图 5 林分密度对樟子松人工林碳储量的影响

Fig. 5 The effect of stand density on carbon storage of *Pinus sylvestris* plantation

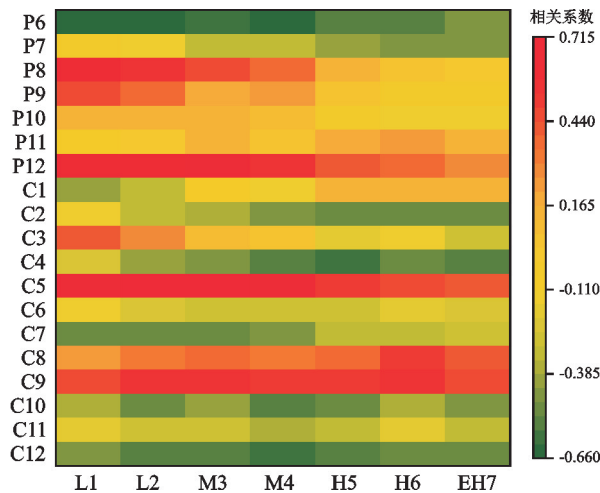


图 6 不同密度樟子松人工林月逐月降雨的相关系数

Fig. 6 The correlation coefficient of monthly rainfall in artificial forests of *Pinus sylvestris* with different densities

2.3.3 樟子松林碳汇对蒸发的响应 蒸发是地表水分平衡和能量平衡的重要组成部分,其数值可以有效表征大气的干湿程度^[19]。不同初植密度的樟子松人工林碳汇与月平均蒸发的相关分析表明,不同初植密度樟子松林对蒸发的响应机制不同,L1 样地碳汇与

当年 5,7,8,9 月蒸发呈显著负相关($p<0.05$);L2、M3 样地碳汇与当年 8,9 月蒸发呈显著负相关($p<0.05$);当年 11 月蒸发与 EH7 样地的碳汇呈显著正相关($p<0.05$)(图 8)。此外,8,9 月蒸发与樟子松人工林碳汇相关系数随林分密度的增加呈减小趋势,表明低密度樟子松人工林碳汇对蒸发的响应更为敏感。

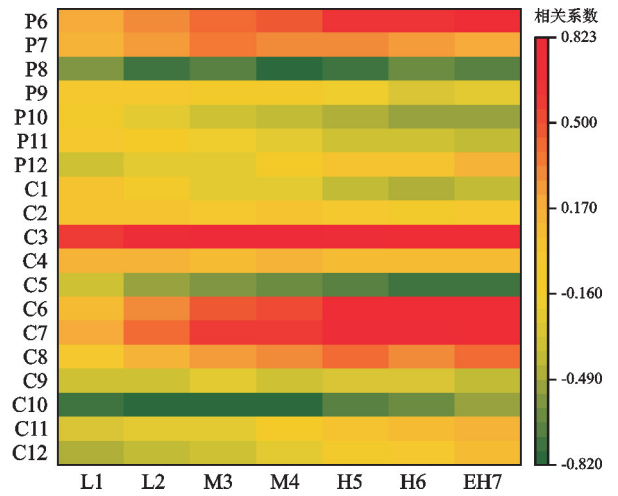


图 7 不同密度樟子松人工林月逐月气温的相关系数

Fig. 7 The correlation coefficient of monthly temperature in different densities of *Pinus sylvestris* plantations

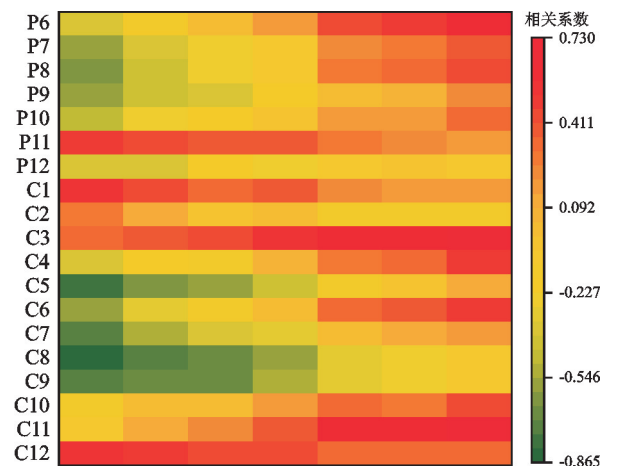


图 8 不同密度樟子松人工林月逐月蒸发的相关系数

Fig. 8 The correlation coefficient of monthly evaporative of *Pinus sylvestris* plantations with different densities

2.4 不同初植密度林碳储量发展趋势的灰色预测

根据国家 2030 年的“双碳”目标,以时间为单一变量,选取沙地樟子松碳储量作为关键指标,构建樟子松人工林碳储量 GM(1,1)模型,对不同初植密度樟子松人工林 2030 年密度林乔木层碳储量进行灰色预测。由表 1 可知,模型的拟合效果较好($R^2=0.88\sim 0.99$),均方根误差的范围为 1.31~4.58,平均误差范围为 1.73~21.01,平均误差绝对值范围为 0.98~3.71。表明 GM(1,1)模型精度较高,预测结果可靠。

表 1 樟子松林碳储量预测模型和精度检验参数

Table 1 Prediction model and precision testing parameters for carbon storage of *Pinus sylvestris* forest

样地	预测模型方程	评价指标			
		R^2	RMSE	ME	MAE
L1	$Y = 74.782e^{0.069\ 46x} - 75.832$	0.99	1.31	1.73	0.98
L2	$Y = 189.316e^{0.056\ 33x} - 185.063$	0.98	1.54	2.38	1.15
M3	$Y = 359.371e^{0.052\ 1x} - 351.212$	0.97	3.40	11.57	2.69
M4	$Y = 413.520e^{0.047\ 14x} - 404.838$	0.97	3.01	9.05	2.22
H5	$Y = 665.945e^{0.035\ 26x} - 654.473$	0.93	3.53	12.44	2.75
H6	$Y = 827.134e^{0.031\ 95x} - 815.279$	0.88	4.58	21.01	3.71
EH7	$Y = 938.537e^{0.028\ 96x} - 925.353$	0.88	4.18	17.43	3.19

根据图 9 中 2030 年不同初植密度樟子松人工林碳储量预测值可知,2030 年各样地碳储量模拟值分别为 70.27,88.20,132.11,114.23,88.12,87.58,80.50 Mg/hm^2 ,中密度 M3 号样地的碳储量模拟值最高,低密度 L1 号样地的碳储量模拟值最低。2030 年各样地碳储增长量分别为 35.19,37.99,53.65,42.94,26.18,23.95,20.24 Mg/hm^2 ,中密度 M3 号样地的碳储增长量最高,极高密度 EH7 号样地的碳储增长量最低。综上所述,未来 10 年,以 GM(1,1)模型为基础的中密度林的碳储量和碳储增长量模拟值始终最高,过高和过低初植密度均降低未来樟子松人工林固碳潜力。

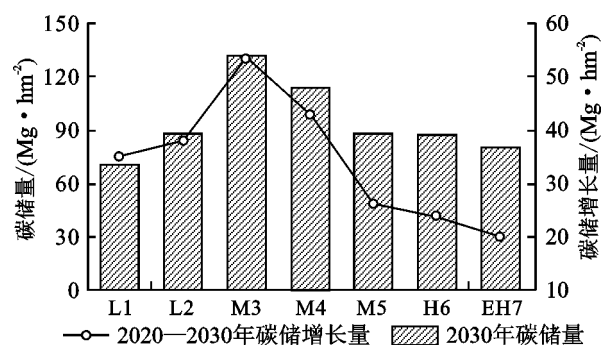


图 9 樟子松人工林 2030 年碳储量预测值

Fig. 9 Predicted carbon storage of *Pinus sylvestris* plantation in 2030

3 讨论

3.1 樟子松人工林碳储量与碳汇

不同初植密度的樟子松人工林碳储量和固碳速率年际动态变化趋势基本一致,碳储量逐年增高。受树种碳吸附能力的种间差异和不同区域环境水热条件差异的影响,不同气候区不同树种的固碳速率存在差异^[20]。本研究中,14~42 年林龄固碳速率范围为 1.14~3.52 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,平均为 2.01 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,低于^[19]呼伦贝尔沙地樟子松固碳速率(2.13 $\text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)。总体来看,科尔沁沙地南缘沙地樟子松人工林固碳能力受限于当地水分条件,气候、生长季

持续时间差异是影响林分生长发育、固碳速率的主要原因^[21]。但樟子松人工林固碳能力对调节大气 CO_2 具有的重要作用不可忽视。

樟子松可以通过光合作用和呼吸作用将大气中碳转化为碳水化合物,并将其储存在树木中。PEI 等^[22]研究表明,樟子松随树木的生长而变化,其固碳曲线为倒“U”形,与树木的生长速度相似,但本研究发现,林分固碳曲线与单木固碳曲线相反,为“U”形。同时单株樟子松固碳曲线拐点和林分固碳速固碳曲线拐点年份均为 30 年。林分生长发育过程初期,单木樟子松固碳能力逐渐增强,但林分过密,自然稀疏导致的林分密度下降成为林分整体固碳能力下降的主要影响因素;林分生长发育后期,单木樟子松固碳能力出现降低的现象,但此刻林分整体结构密度趋于稳定,林分整体碳储量呈现上升趋势。综上所述,林分密度是影响樟子松人工林林分固碳能力主要影响因素,探究林分碳汇应在林分尺度下估算。

3.2 林分密度对樟子松林碳储量与碳汇的影响

樟子松人工林乔木层碳储量随着林分密度的增加而增加;固碳速率变化总体表现为先增加后降低的趋势;林龄 31 年之前,1 500~2 000 株/ hm^2 为林分碳汇最高,35~46 年林龄的林分最优密度为 1 000~1 200 株/ hm^2 。中初植密度林更易形成较好的水热空间组合,更适合沙地樟子松人工林的生长;较高初植密度林中的光照、水分及养分条件的竞争激烈,林分营养空间较低,导致林分的生长收到抑制,不利于樟子松林碳储量的积累,这与大多数的研究^[23-24]结果保持一致,而最优林分密度随林龄增加而减小的原因,可能是随着单株樟子松生长发育,树木个体所需营养空间逐渐增加所导致的。因此可以通过控制林分密度来提高林分的碳储量^[25],但随着林分林龄的增加,需不断调整其林分密度以满足树木个体所需生存空间和营养供给量。

3.3 樟子松林碳汇对气象的响应机制

樟子松人工林生物碳储量及固碳速率是生物量、生产力和含碳率共同决定的,因此影响樟子松生长的因素同样也是影响樟子松生物碳的因素。本研究发现,樟子松人工林固碳速率对降雨无明显响应,当年 5 月降雨显著正相关($p < 0.05$),其余樟子松林固碳速率与降雨的相关关系均不显著,与当年 5 月降雨多呈正相关,并且随林分密度的增加,相关性逐渐降低。对于科尔沁沙地南缘地区来说,樟子松的生长从 5 月开始,10 月结束,春季是树木开始生长的季节,因此春季降雨决定着樟子松生长量,进而影响这樟子松的碳汇能力。牛春梅等^[26]研究认为,黄土高原刺槐林

碳密度与年降水量呈显著正相关;尚建勋等^[27]研究发现,海拉尔沙地樟子松与各月降水呈正相关关系。相对于降雨,平均气温对沙地樟子松固碳速率的影响更大。前一年8月与当年5月与固碳速率均呈负相关;高初植密度樟子松人工林当年生长季温度升高显著提高林分固碳速率,低初植密度樟子松人工林当年生长季末温度升高显著降低林分固碳速率。张先亮等^[28]对大兴安岭山地樟子松的研究认为,樟子松的生产力与上一年6—9月和当年4—8月的温度均呈负相关,温度是限制树木生长的主要因子;王云霓等^[29]研究发现,当年5—7月平均气温与月平均最低温度与华山松(*P.armandii*)天然林的生产力呈负相关关系;李俊霞等^[30]对海拉尔、阿尔山地区和张先亮等^[28]对满归地区的研究均显示,温度升高引起的干旱是导致油松树木生长速率下降的主要原因。樟子松生理过程可能是导致温度抑制樟子松林生长的主要原因之一,温度升高使樟子松林蒸散增多,土壤水分减少,若此时土壤水分不能及时补充,林分只能大量消耗树体内储存水分,由此引起树木的生理干旱,同时还影响下一年的生长。蒸发作为森林水循环体系的主要构成,能体现林分内水分的可利用性和亏缺度^[31]。本研究通过分析不同初植密度的樟子松人工林碳汇与月平均蒸发的相关分析发现,低中初植密度樟子松人工林生长季蒸发升高抑制林分生长,高密度樟子松人工林生长及蒸发升高促进林分生长。也许是由于高密度樟子松人工林种内竞争压力等生物因素的干扰,森林固碳对气候因素的反应被掩盖^[32]。

众多研究^[33-34]表明,树木对气候的响应敏感程度随地理位置、立地条件和树木种间种内竞争等影响而存在分异。沙地樟子松人工林种内竞争的强度导致不同樟子松人工林固碳对气候因子的响应的差异,高密度的樟子松人工林的固碳能力除受气温、降水、蒸发等气候因子影响外,种内竞争影响也较大。因此,林分密度调整、初植密度选取作为重要的森林管理措施,在提升森林应对气候变化的抗逆性、稳定性具有积极作用^[35]。

3.4 不同初植密度林碳储量发展趋势的灰色预测

为了响应2030年“碳达峰”目标,通过预测模型对不同初植密度樟子松人工林2030年碳储量进行预测,樟子松人工林碳储量会持续增大,但不同初植密度林碳储量增加的幅度不同,中初植密(M3)林的碳储量(132.11 Mg/hm²)、碳增量最高(53.65 Mg/hm²)。科尔沁沙地南缘沙地樟子松人工林4段密度梯度中,中初植密度林固碳潜力最优,其林分密度为2 000株/hm²左右,过高或者过低初植密度的樟子松

人工林均降低林分固碳潜力,固碳潜力下降的主要原因可能是立地条件与植被生长不协调导致的,沙地土壤土肥条件较差,不足以支持过高的林分密度,而林分密度过低又浪费土壤土肥资源,只有适当的林分密度适合林分碳的累积。基于本研究提供有利于沙地樟子松林碳储量意见:高密度林分定期进行间伐不仅有利于单木生长发育,为其提供充足的生长环境,而且有利于提高林分整体碳储量;低密度林分的樟子松林可以进行苗木补植,使樟子松更加充分的利用过剩的生长环境,同时提升林分碳储量。因此,若能加强沙地樟子松人工林抚育管理,合理延长人工林的经营周期,在人工林不同的发育阶段不断对林分密度进行优化调整,将有助于加强沙地樟子松人工林的碳汇功能。

4 结论

(1)不同初植密度的沙地樟子松人工林碳储量和固碳速率年际变化趋势基本一致,碳储量年际曲线呈逐年增加趋势,固碳速率年际曲线呈倒“U”形,固碳速率拐点年份为29年。

(2)通过分析相同年份不同林分密度对碳储量和固碳速率影响发现,樟子松人工林乔木层碳储量随着林分密度的增加而增加;固碳速率变化总体表现为先增加后降低的趋势;林龄31年之前,1 500~2 000株/hm²为林分碳汇最高的最优解,31~42年林龄的林分最优密度为1 000~1 200株/hm²。

(3)当年5月降雨量是限制樟子松林碳汇功能的主要时期;前一年8月及当年3,5,6,7月平均气温是限制高密度、极高密度樟子松人工林碳汇的主要气候因子,前一年8月及当年3,10月平均气温是限制低密度、中密度樟子松人工林碳汇的主要气候因子;低密度樟子松人工林固碳速率对蒸发的响应更为敏感。

(4)利用GM(1,1)模型模拟预测2030年不同初植密度樟子松人工林碳储量后发现,中初植密度M3林的碳储量(132.11 Mg/hm²)、碳增量最高(53.65 Mg/hm²)。

参考文献:

- [1] LI W H. Contemporary ecology research in China[M]. GE Q S, ZHENG J Y, LIU H L, et al. Chapter 15: Climate change and carbon cycle. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015:437-468.
- [2] WANI A A, JOSHI P K, SINGH O, et al. Estimating soil carbon storage and mitigation under temperate coniferous forests in the southern region of Kashmir Himalayas[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2014, 19(8):1179-1194.
- [3] LANDRY J S, MATTHEWS H D. Non-deforestation

- fire vs. fossil fuel combustion: The source of CO₂ emissions affects the global carbon cycle and climate responses[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(7): 2137-2149.
- [4] PAN Y D, BIRDSEY R A, PHILLIPS O L, et al. The structure, distribution, and biomass of the world's forests[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44: 593-622.
- [5] BROWN S. Mitigation potential of carbon dioxide emissions by management of forests in Asia[J]. *Ambio*, 1996(25): 273-278.
- [6] ALVAREZ S, ORTIZ C, DÍAZ-PINÉS E, et al. Influence of tree species composition, thinning intensity and climate change on carbon sequestration in Mediterranean Mountain forests: A case study using the CO₂ fix model[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(7): 1045-1058.
- [7] 李奇, 朱建华, 冯源, 等. 中国主要人工林碳储量与固碳能力[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 1-6.
- LI Q, ZHU J H, FENG Y, et al. Carbon stocks and carbon sequestration capacity of the main plantations in China[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 1-6.
- [8] 贾黎明, 刘诗琦, 祝令辉, 等. 我国杨树林的碳储量和碳密度[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 1-7.
- JIA L M, LIU S Q, ZHU L H, et al. Carbon storage and density of poplars in China[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 37(2): 1-7.
- [9] QI G, CHEN H, ZHOU L, et al. Carbon stock of larch plantations and its comparison with an old-growth forest in Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(1): 10-21.
- [10] ZHANG H, ZHOU G M, WANG Y X, et al. Thinning and species mixing in Chinese fir monocultures improve carbon sequestration in subtropical China[J]. *European Journal of Forest Research*, 2019, 138(3): 433-443.
- [11] 卢立华, 农友, 李华, 等. 保留密度对杉木人工林生长和生物量及经济效益的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 717-724.
- LU L H, NONG Y, LI H, et al. Effects of retention density on growth, biomass, and economic benefit of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 717-724.
- [12] LIU Y Y, WANG A Y, AN Y N, et al. Hydraulics play an important role in causing low growth rate and dieback of aging *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees in plantations of Northeast China[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2018, 41(7): 1500-1511.
- [13] 刘轩, 赵珮杉, 高广磊, 等. 沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)物候特征及其对气候的响应[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 25-35.
- LIU X, ZHAO P S, GAO G L, et al. Variations in phenology of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and the response to climate factors[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(2): 25-35.
- [14] 党宏忠, 张学利, 韩辉, 等. 樟子松固沙林林水关系研究进展及对营林实践的指导[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(9): 971-983.
- DANG H Z, ZHANG X L, HAN H, et al. Research advances on forest-water relationships in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations for sand dune immobilization and guidance to forest management practices[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(9): 971-983.
- [15] 刘琳, 刘美爽, 徐永飞, 等. 我国重点国有林区林地面积变化及趋势分析: 基于黑龙江森工林区的实证研究[J]. *林业科学*, 2015, 51(8): 88-94.
- LIU L, LIU M S, XU Y F, et al. Changes and tendency analysis of forest land area in the key state-owned forest region: A case study based on the data of forest industry region of Heilongjiang Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(8): 88-94.
- [16] 辽宁省固沙造林研究所. DB21/T 2599—樟子松人工林经营技术规程[S]. 沈阳: 辽宁省质量技术监督局, 2016: 12-13.
- Liaoning Sand-Fixation and Afforestation Research Institute. DB21/T 2599—The technical regulation for cultivation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations[S]. Shenyang: Liaoning Bureau of Quality and Technical Supervision, 2016: 12-13.
- [17] 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, 2013.
- DONG L H. Study on the compatible models of tree biomass for main species in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [18] LAMLOM S H, SAVIDGE R A. A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25(4): 381-388.
- [19] 岳元, 刘海峰, 秦孟晟, 等. 吉林省蒸发皿蒸发量时空变化特征及其成因定量化分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 176-183, 189.
- YUE Y, LIU H F, QIN M S, et al. Temporal-spatial variations of pan evaporation and quantification of the causes in Jilin Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 176-183, 189.
- [20] 曹恭祥, 郭中, 王云霓, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松人工林乔木层固碳速率及其对气象因子的响应[J]. *生态学杂*

- 志, 2020, 39(4): 1082-1090.
- CAO G X, GUO Z, WANG Y N, et al. Carbon sequestration rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and its responses to climate factors in Hulunbuir Sandy Land [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1082-1090.
- [21] 王云霓, 曹恭祥, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山华北落叶松人工林植被碳密度特征[J]. 林业科学, 2015, 51(10): 10-16.
- WANG Y N, CAO G X, WANG Y H, et al. Characteristics of biomass carbon density of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Liupan mountains of Ningxia [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(10): 10-16.
- [22] PEI S, XIE G D, ZHANG C S, et al. Dynamic simulation of carbon sequestration by *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(1): 37-43.
- [23] 黄小男. 六盘山华北落叶松人工林生物量对立地条件和林分结构的响应与模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- HUANG X N. The response and simulation of the biomass of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Liupan Mountains to site condition and stand structure [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [24] 代林利, 周丽丽, 伍丽华, 等. 不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 710-719.
- DAI L L, ZHOU L L, WU L H, et al. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 710-719.
- [25] WGIEL A, POLOWY K. Aboveground carbon content and storage in mature Scots pine stands of different densities [J]. Forests, 2020, 11(2): e240.
- [26] 牛春梅, 关晋宏, 程然然, 等. 黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5049-5058.
- NIU C M, GUAN J H, CHENG R R, et al. Ecosystem carbon density of *Robinia pseudoacacia* plantations and influencing factors in the middle and western Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5049-5058.
- [27] 尚建勋, 时忠杰, 高吉喜, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 73-80.
- SHANG J X, SHI Z J, GAO J X, et al. Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 73-80.
- [28] 张先亮, 何兴元, 陈振举, 等. 大兴安岭山地樟子松径向生长对气候变暖的响应: 以满归地区为例[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3101-3108.
- ZHANG X L, HE X Y, CHEN Z J, et al. Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* radial growth to climate warming in Great Xing'an Mountains: A case study in Mangui [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3101-3108.
- [29] 王云霓, 熊伟, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4002-4010.
- WANG Y N, XIONG W, WANG Y H, et al. The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4002-4010.
- [30] 李俊霞, 白学平, 张先亮, 等. 大兴安岭林区南、北部天然樟子松生长对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7232-7241.
- LI J X, BAI X P, ZHANG X L, et al. Different responses of natural *Pinus sylvestris* var. *mongolica* growth to climate change in southern and northern forested areas in the Great Xing'an Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7232-7241.
- [31] 李炜, 司建华, 苗政. 林分耗水的尺度扩展研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 714-723.
- LI W, SI J H, MIAO Z. Advance in the application of upscaling methods to stand evapotranspiration [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 714-723.
- [32] 牛进松, 刘小粉, Se Myung Kwon, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松生产力及其对气候因子的响应[J]. 林业科学研究, 2022, 35(3): 141-150.
- NIU J S, LIU X F, KWON S M, et al. Productivity of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) and its response to climate change in Hulunbuir sandy land [J]. Forest Research, 2022, 35(3): 141-150.
- [33] MARTIN - BENITO D, PEDERSON N, KÖSE N, et al. Pervasive effects of drought on tree growth across a wide climatic gradient in the temperate forests of the Caucasus [J]. Global Ecology and Biogeography, 2018, 27(11): 1314-1325.
- [34] CALAMA R, CONDE M, DE-DIOS-GARCÍA J, et al. Linking climate, annual growth and competition in a Mediterranean forest: *Pinus pinea* in the Spanish Northern Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 264: 309-321.
- [35] SCHMITT A, TROUVÉ R, SEYNAVE I, et al. Decreasing stand density favors resistance, resilience, and recovery of *Quercus petraea* trees to a severe drought, particularly on dry sites [J]. Annals of Forest Science, 2020, 77(2): e52.