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

曹恭祥[1] 郭 中[1] 王云霓[1] 季 蒙[1*] 韩珊珊[1] 耿庆春[2] 冯丽红[2] 刘海利[2]
([1]内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010; [2]红花尔基林业局, 内蒙古海拉尔 021112)

摘 要 以呼伦贝尔沙地樟子松人工林为对象,利用树木年轮学方法和解析木法,推算过去41年的樟子松林生物量、碳密度和固碳速率,并分析固碳速率与月均气温、月均最低温、月均最高温、月降水量、月均大气相对湿度等气象因子的关系。结果表明:樟子松林碳密度随着林龄的增加而增加,碳密度从1977年的2.58 t·hm^{-2}增加到2017年的87.97 t·hm^{-2};樟子松林固碳速率的年际差异较大,总体上呈现出先增加后减小,最终趋于稳定的趋势,多年固碳速率为1.37~3.21 t·hm^{-2}·a^{-1},平均为2.13 t·hm^{-2}·a^{-1};樟子松林固碳速率与上一年和当年生长季的降水呈正相关,与非生长季降水呈负相关,特别是与上一年12月和当年3月降水量呈显著相关;与上一年和当年8—9月的月均湿度显著正相关;与上一年及当年生长季的月平均气温、月均最低温和月均最高温呈显著或极显著负相关;樟子松林固碳能力同时受温度和降水的影响,但温度的影响大于降水的影响,在未来该地区气候暖干化的变化趋势下樟子松林固碳潜力可能会降低。

关键词 樟子松; 碳密度; 固碳速率; 气象因子

Carbon sequestration rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and its responses to climate factors in Hulunbuir Sandy Land.

CAO Gong-xiang[1], GUO Zhong[1], WANG Yun-ni[1], JI Meng[1*], HAN Shan-shan[1], GENG Qing-chun[2], FENG Li-hong[2], LIU Hai-li[2] ([1]*Inner Mongolia Academy of Forestry Science*, *Hohhot* 010010, *China*; [2]*The Forestry Bureau of Honghuaerji*, *Hailaer* 021112, *Inner Mongolia*, *China*).

Abstract: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* is one of the main native plantation species in Hulunbuir Sandy Land. Understanding the response of biomass carbon density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation to changes of climatic factors is important for rational management to enhance carbon sequestration. We set three 30 m×30 m plots in plantation with stand age of 41 years in Hulunbuir Sandy Land. Using dendrochronological methods and empirical biomass equations, we estimated biomass, carbon density, and net vegetation carbon sequestration rate (CSR) of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in the past 41 years. Further, we analyzed the relationship between CSR and climatic factors, including monthly air temperature, humidity and precipitation. The results showed that carbon density increased with increasing stand age, with 2.58 t·hm^{-2} in 1977 to 87.97 t·hm^{-2} in 2017. The interannual variation of CSR showed a trend of increasing first and then decreasing. The average CSR was 2.13 t·hm^{-2}·a^{-1}, within a range of 1.37-3.21 t·hm^{-2}·a^{-1}. The CSR of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation was positively correlated with precipitation in the growing season of previous year and current year, and negatively correlated with precipitation in the non-growing season. The CSR was negatively correlated with precipitation in last December and that in current March. The CSR was positively correlated with the average daily air relative humidity from August to September in previous year and current year. The CSR was negatively correlated with monthly average temperature, monthly average min-

林业公益性行业科研专项课题(201404204-01A)和全球环境基金内蒙古项目(GEF-NMG-201601)资助。
收稿日期: 2019-08-21 接受日期: 2020-01-01
*通讯作者 E-mail: jimeng04@tom.com

imum temperature, and monthly average maximum temperature. In general, the CSR is affected by temperature and precipitation, with higher sensitivity to temperature. Our results highlight that CSR of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation could decrease in the future due to potential warming in Hulunbuir.

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; carbon density; carbon sequestration rate; climate factor.

气候变化会深刻改变树木的生理生态过程(Delbart *et al.*,2008;Lafleur *et al.*,2010),进而影响森林生态系统的结构、功能和组成(Liu *et al.*,2013;Liang *et al.*,2016)。森林作为陆地生态系统重要的碳库和碳汇,对全球碳平衡及调节气候变化具有重要作用(胡海清等,2015a)。碳密度作为森林碳汇功能最常用的评价指标之一,其年际变化可用于指示气候变化对森林碳汇的影响。树木年轮宽度是树木径向生长的长期记录,具有定年准确、连续性强和分辨率高等优点,常被用于理解树木生长对气候变化的响应(王守乐等,2017;贺敏等,2018)或反演林分碳密度或生产力的年际动态(王云霓等,2013,2015)。如,于健等(2016)基于红松(*Pinus koraiensis*)径向生长年际变化反演林分碳汇潜力;王云霓等(2015)利用华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)年轮宽度反演碳密度的历史动态;程瑞梅等(2011)利用年轮宽度推算过去 30 年中鸡公山马尾松(*Pinus massoniana*)林生产力的动态。以树木径向生长为基础,已有很多关于森林碳密度的研究,但多为不同地区各类森林的静态对比,及同一林分碳密度及其年净增量(固碳速率)的动态变化。如,刘迎春等(2011)利用空间代替时间法,建立黄土丘陵区不同林龄刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabuliformis*)人工林碳储量的时间序列;马炜等(2010)探讨了不同发育阶段长白落叶松(*Larix olgensis*)人工林碳储量的变化规律。然而,受土地利用方式(张新厚等,2009)、立地条件(张国斌等,2008;Hui *et al.*,2012)、树种(胡青等,2012;郭超等,2014;朱苑维等,2016)、林分结构(李皎等,2014;佟健等,2014;胡海清等,2015b)、经营措施(漆良华等,2009;Bradford,2011;刘琦等,2012;韩阳瑞等,2014)、气候条件(王云霓等,2015)等众多因素的影响,碳密度表现出明显的时空差异。要想全面理解气候变化对森林碳汇的影响,就需扩大研究树种。

呼伦贝尔是集中分布面积最大的樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)自然分布区,随着"三北"防护林、退耕还林等林业生态工程的实施,发展了大面积樟子松人工林,仅红花尔基现有樟子松人工林面积达 2.67×10^4 hm^2。在全球气候变化的背景下,我国东北地区森林—草原过渡带上樟子松人工林碳汇功能对气候变化的响应如何,目前仍缺乏该地区人工林碳密度及固碳速率与气候变化响应关系的相关报道。为此,本研究以呼伦贝尔沙地樟子松人工林为对象,利用生物量经验方程和年轮生态学方法,推算樟子松人工林的生物量年增量和固碳速率的历史动态,分析气候要素变化对樟子松人工林植被净固碳速率的影响,对于探索全球气候变化下半干旱沙地樟子松林碳汇功能具有重要意义,也为我国林业经营更好地应对气候变化提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究的采样点位于呼仑贝尔红花尔基自然保护区(47°36′N—48°35′N,118°58′E—120°32′E)。

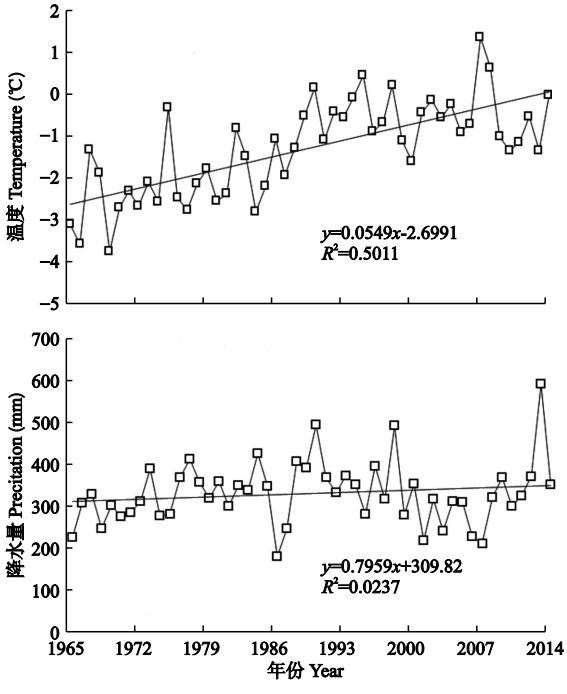


图 1 研究区 1965—2014 年的年平均温度和年降水量
Fig.1 Changes of annual mean temperature and precipitation from 1965 to 2014

该地区属于半湿润、半干旱气候区;冬季漫长,寒冷干燥;夏季短暂,温凉相对湿润。多年(1965—2014年,图 1)平均气温-1.30 ℃,7 月最热,极端最高气温 40.1 ℃;1 月份最冷,极端最低气温-46.5 ℃,平均相对湿度为 61.7%;降水集中在 6—8 月,平均年降水量为 330.1 mm,波动范围为 180.0~591.2 mm。日照时数为 2857.25 h,年蒸发量 1480.2 mm。土壤一般呈酸性或微酸性,质地以沙土、淋溶黑土、薄层粗骨土等为主。

本研究采用的树种为樟子松,该树种深根性,耐寒耐旱,生长较快,对土壤水分要求不高,适应性强,是欧亚温带广泛分布的赤松(*P. sylvestris*)的变种。红花尔基分布的樟子松多为纯林,仅在阴坡凹地混生有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等伴生树种。灌木主要有山刺玫(*Rosa davurica*)、稠李(*Prunus padus*)、小叶杜香(*Ledum palustre*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)等。草本植物发育良好,盖度较大,主要有苔草(*Carex stenophylloides*)、兴安野青茅(*Calamagrostic turczaninowii*)、莎草(*Cyperus rotundus*)、羊草(*Leymus chinensis*)、广布野豌豆(*Vicia cracca*)、百蕊草(*Thesium chinense*)、蕨(*Pteridium aquilum*)、小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)和矮山黧豆(*Lathyrus humilis*)等。

1.2 观测样地设置

在红花尔基沙地樟子松林区选择生长良好、年龄较大的樟子松人工林,设置观测样地 3 个,样地大小 30 m×30 m,调查样地的海拔、坡度等立地因子,并进行每木检尺,调查胸径、树高、冠幅、枝下高等植被特征,样地的基本特征见表 1。

1.3 树木年轮宽度测定

样地调查的基础上,按照径级选择生长良好、干形较直的标准木 20 株,在标准木胸高处(1.3m)垂直交叉钻取 2 个树芯。按照树木年轮处理的基本程序,即固定、风干、打磨(王云霓等,2013),并初步检查可能存在的伪轮和遗失年轮。利用 Lintab5 年轮分析仪(Frank Rinn,德国)测量宽度(精度为 0.01 mm),并利用折线图比法和 COFECHA 程序(Holmes,1983)对定年准确性和测量结果进行合理性检验,选择与主序列相关系数较大、奇异点少的样芯。

1.4 生物量的估算

利用对数函数 $H=c\ln D+d$(H 为树高,m;D 为胸径,cm)建立树高与胸径的关系,得到标准木历年的树高,见公式(1)。利用调查时测定胸径 D_{2017} 依次减去历年树芯年轮宽度之和 d_n,得到历年的胸径 D_n,见公式(2)。

利用红花尔基林业局樟子松解析木数据建立的单株各部分(干、枝、叶)生物量方程与胸径的函数关系(丛俊霞等,2017),计算样树的地上生物量,见公式(3)~(5);根据单株根系生物量 W_2 与胸径的关系计算地下生物量(董利虎,2012),公式(6);将地上和根生物量相加得到单株总生物量(式 7),最后结合样地面积和株数计算单位面积上乔木层生物量(W_T,t · hm^{-2}),公式(8)。

$$H=7.7126\ln(D)-8.7329\ (R^2=0.9016, n=186) \quad (1)$$

$$D_n=D2017-d_n \quad (2)$$

$$W_{干}=0.0581D^{2.3888} \quad (3)$$

$$W_{枝}=0.0271D^{2.0649} \quad (4)$$

$$W_{叶}=0.0185D^{2.1462} \quad (5)$$

$$W_{根}=0.0689D^{1.9613} \quad (6)$$

$$W_{Ti}=W_{干i}+W_{枝i}+W_{叶i}+W_{根i} \quad (7)$$

$$W_T=\left(\sum_{i=1}^{n} W_n\right)/(S\times 1000) \quad (8)$$

式中:$d_n=d_{2016}+d_{2015}+\cdots\cdots+d_{n+2}+d_{n+1}$,$W_{Ti}$ 为样地第 i 株树木的包括地上和根系的总生物量(kg);n 为样地内树木总株数,S 为样地面积(hm^2)。

1.5 碳含量测定

每个样地按照径级分布,每个径级选择 3 株样木,分叶、枝、干、根、皮采集植物样品,不同径级树木相同器官的样品混合,取混合样装袋带回实验室

表 1 樟子松样地基本特征

Table 1 Characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations

样地编号 Plot No.	林分起源 Stand origin	林龄 Age (a)	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope degree (°)	密度 Density (trees · hm^{-2})	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均高 Mean tree height (m)	郁闭度 Canopy density
Ⅰ	人工林 Planted forest	41	810	<3	782	25.4	12.9	0.90
Ⅱ	人工林 Planted forest	41	835	<3	667	22.5	13.4	0.86
Ⅲ	人工林 Planted forest	41	829	<3	625	26.3	13.6	0.89

85 ℃烘至恒重,粉碎机粉碎,过 0.25 mm 筛,然后采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定各器官的有机碳含量。

1.6 碳密度和固碳速率的估算

本研究乔木层的碳密度(C,t · hm^{-2})是由乔木层地上生物量、地下生物量与碳含量的乘积求和计算得到:

$$C = W_1 \times R_1 + W_2 \times R_2 + W_3 \times R_3 + W_4 \times R_4 \quad (9)$$

其中:R_1、R_2、R_3和 R_4分别为樟子松干、枝、叶和根的碳含量(分别为 0.5160、0.7536、0.3060 和 0.3255);W_1、W_2、W_3和 W_4分别为樟子松干、枝、叶和根的总生物量(t · hm^{-2})。

乔木层净固碳速率(CSR)为样地历年单位面积上的碳密度之差。

$$CSR_i = C_i - C_{i-1} \quad (10)$$

式中,C_i 是第 i 年的碳密度(t · hm^{-2}),CSR_i 是第 i 年的碳密度年增量(t · hm^{-2} · a^{-1}),i 表示年份。

1.7 气象数据获取

气象数据来自鄂温克旗气象站,包括 1965—2014 年的月均气温,月均最高气温,月均最低气温,月降水量和月均相对湿度等 5 个气象因素。利用 Mann-Kandell 和 Double-mass analysis 方法对气象数据的均一性进行检验,结果表明气象资料变化相对均一,无随机突变和随机变化,可以用来代表研究区自然气候的变化。

考虑到上一年气象特征对当年树木生长的影响(程瑞梅等,2011;王云霓等,2013),本文在分析樟子松林固碳速率与气象因子的相关分析时,选择前 1 年 6 月到当年 12 月的平均气温、平均最低气温、平均最高气温、降水量和大气相对湿度等气象因子。

1.8 数据处理

应用 Excel 和 SPSS 18 统计软件进行数据处理,利用 Pearson 相关分析碳密度年增量与气象因子的关系。

2 结果与分析

2.1 碳密度的年际变化

樟子松不同器官之间碳含率的差异较为明显(图 2),在不同器官里分布不均,具体表现为:枝(75.36%) > 干(61.66%) > 皮(41.01%) > 根(32.55%) > 叶(30.61%),乔木层各器官平均含碳率为 48.23%。

如图 3 所示,随着林龄的增加,樟子松人工林生物量和碳密度的变化均可以用Logistic生长方程较好模拟,樟子松林生物量和碳密度分别从 1977 年的 4.83 t · hm^{-2}、2.58 t · hm^{-2}增加到 2017 年的 167.95 t · hm^{-2}、87.97 t · hm^{-2}。多年平均生产力为 4.08 t · hm^{-2} · a^{-1},变异系数为 0.26。

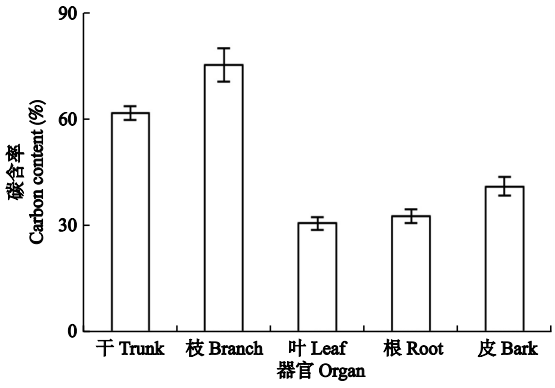


图 2 乔木层不同器官的碳含率
Fig.2 Carbon content in different organs of the arbor

2.2 固碳速率的年际变化

樟子松林固碳速率的年际变化趋势总体表现出先增加后减小,最后趋于稳定,但年际间波动存在差异(图 4)。在 1977—1987 年快速上升,1987 年固碳速率达到 3.14 t · hm^{-2} · a^{-1},但 1988—1991 年间樟子松林的固碳速率呈持续降低趋势,降低到 2.26 t · hm^{-2} · a^{-1};在 1992 回升到 3.14 t · hm^{-2} · a^{-1},1993 年的固碳速率最高,达到 3.20 t · hm^{-2} · a^{-1};1994—2006 年呈下降的趋势,但是在下降中又有波动,固碳速率在 2006 年降到最低,为 1.37 t · hm^{-2} · a^{-1};之后趋于稳定,变化幅度较小。41 年间平均固碳速率为 2.13 t · hm^{-2} · a^{-1},变异系数为 0.26。

2.3 固碳速率对气象因子的响应

不同年份樟子松林固碳速率与不同月份气候指标的相关性见表2,相关系数的显著性说明固碳速

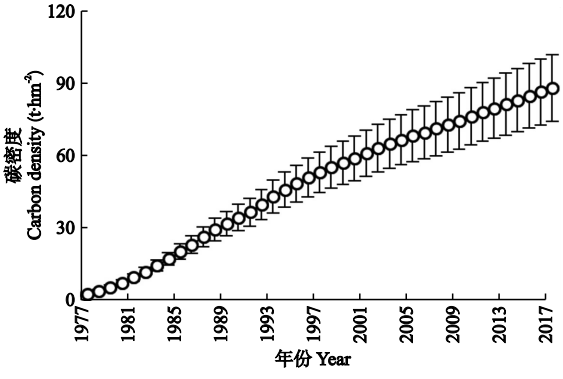


图 3 樟子松林碳密度的年际变化
Fig.3 Interannual changes of carbon density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation

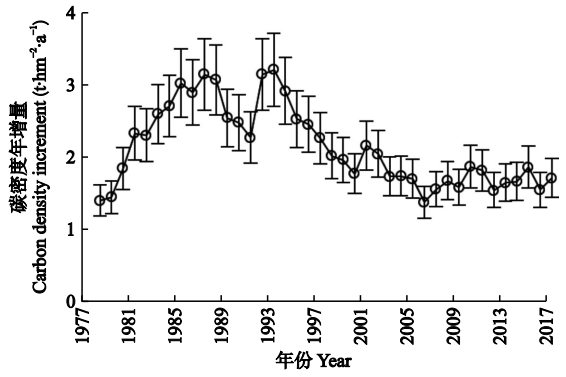


图 4 樟子松林固碳速率的年际变化

Fig.4 Interannual changes of carbon sequestration rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation

率对气候要素的响应存在明显“滞后效应”。固碳速率与上一年 12 月降水分别呈显著性负相关($P<0.05$),相关系数为 0.329;与上一年 8、9 月月均湿度呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别达到 0.607 和 0.508;与上一年 7 月月均最低温、8 月月均最高温及 7、9 月的月均温和月均最高温均呈极显著($P<0.01$)或显著负($P<0.05$)相关,相关系数达到 0.36 以上。说明上一年 12 月降水、8—9 月湿度和 7—9 月的温度指标对樟子松林的碳密度存在显著影响。

从表 2 还可以看出,当年 3 月降水显著影响樟子松林固碳速率,相关系数为 0.375;樟子松林固碳速率与当年 1、6、8、9 月的月均湿度显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关。樟子松林的固碳速率与当年生长季平均气温、月均最低温和月均最高温呈负相关,与 8、9 月平均气温和月均最高温度呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关;与 5 月月均最低温、6 月月均最高温呈显著相关($P<0.05$)。

表 2 樟子松林固碳速率与月份气象因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between carbon sequestration rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and monthly meteorological factors

月份 Month	降水 Precipitation	月均气温 Mean temperature	湿度 Humidity	月均最低温 Mean min temperature	月均最高温 Mean max temperature
-6	0.051	-0.274	0.292	-0.360	-0.207
-7	0.165	-0.434**	0.197	-0.482**	-0.364*
-8	0.200	-0.308	0.607**	-0.009	-0.406*
-9	0.018	-0.447**	0.508**	-0.223	-0.485**
-10	-0.122	-0.224	0.236	-0. 176	-0.147
-11	-0.190	-0.013	-0.034	-0. 017	0.018
-12	-0.329*	0.201	0.354	0.173	0.249
1	-0.219	0.224	0.418*	0.212	0.236
2	-0.226	0.063	0.179	0.050	0.162
3	0.375*	0.088	0.210	0.066	0.136
4	0.308	-0.058	0.285	-0.139	0.044
5	0.255	-0.216	0.040	-0.350*	-0.167
6	0.177	-0.279	0.396*	-0.320	-0.239*
7	0.087	-0.280	0.291	-0.312	-0.266
8	0.122	-0.355*	0.582**	-0.144	-0.413*
9	0.116	-0.421**	0.371**	-0.315	-0.408*
10	0.148	-0.132	0.192	-0.129	-0.006
11	-0.260	0.000	-0.040	-0.02	0.040
12	-0.303*	0.244	0.361*	0.180	0.317

注:** 在 $P<0.01$ 水平下显著,* 在 $P<0.05$ 水平下显著。月份前的“-”为上一年。

Note: ** refers to significant on the level of $P<0.01$, * refers to significant on the level of $P<0.05$. “-” designates the previous year.

3 讨 论

3.1 樟子松林的碳密度

本文樟子松林碳密度平均为 87.97 t · hm^{-2},远高于 Fang 等(2001)基于生物量换算因子连续函数法估算得到的全国森林植被碳密度(44.91 t · hm^{-2}),说明红花尔基樟子松人工林是重要的碳库;本文樟子松林碳密度大于任丽娟(2011)在红花尔基的研究结果(78.57 t · hm^{-2}),但低于其在奇乾研究的结果(117.33 t · hm^{-2}),任丽娟(2011)研究方法跟本文一致,也是基于樟子松生物量与胸径之间的函数关系,结合室内实验得到的樟子松碳含量,估算樟子松林碳密度。造成差异的原因可能是林分起源、林分密度、立地条件等因素不同,山地水热条件优于沙地,导致沙地樟子松林碳密度小于山地樟子松林的。本文研究区坡度较缓,土壤层相对较厚,土壤水分相对较多,立地条件相对优越,且本文樟子松人工林密度大于任丽娟(2011)在红花尔基的研究样地,这可能是导致本研究中樟子松林碳密度大于后者研究结果的原因。此外,本文估算的樟子松人工林地上部分碳密度为 70.14 t · hm^{-2},高于其他研究中樟子松林地上部分碳密度。如:昭日格等(2011)基于生物量与蓄积量的方程和森林清查资料估算的内蒙古樟子松林地上碳密度(59.36 t · hm^{-2});丛俊霞等(2017)利用遥感数据、森林清查资料及野外调查的方法,得到沙地樟子松天然林地上部分平均碳密度(55.18 t · hm^{-2})。造成该差异的主要原因是研究方法和研究尺度的不同。昭日格等(2011)和丛俊霞等(2017)均在区域尺度上,且主要是利用森林清查数据,可能存在一定人为统计的不确定性及林龄、密度等林分结构的空间差异性,造成估算结果存在一定差异。

此外,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。本研究中,沙地樟子松林多年碳密度年增量变化范围为 1.37~3.21 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,平均为 2.13 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,低于六盘山南侧半湿润气候区华北落叶松林固碳速率(5.57 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)(王云霓等,2015)、四川西北部亚高山云杉(*Picea asperata*)天然次生林固碳速率(4.68 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)(马明东等,2007)、中南林学院树木园樟树(*Cinnamomum camphora*)人工林固碳速率(4.98 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)(雷丕锋等,2004)和亚热带杉木人工林的固碳速率(3.489 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)(方晰等,2002),但高于六盘山北侧半干旱气候区华北落叶松林固碳速率(2.58 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)(王云霓等,2015)。总体来看,虽然呼伦贝尔沙地樟子松人工林固碳能力低于湿润、半湿润地区林分的,但高于半干旱地区林分的,说明呼伦贝尔沙地樟子松林具有相对较高的固碳能力,对于调节大气 CO_2 具有重要的意义。

3.2 气象因子对固碳速率的影响

樟子松人工林乔木层生物碳密度及固碳速率是生物量、生产力与含碳率共同决定的,故影响樟子松生长的因素也是影响其碳密度的因素。已有研究关于气象因子对固碳速率影响的报道较少,故本文在讨论气象因子对固碳速率的影响时也增加了前人关于气象因子对树木生长的影响。

本研究中,樟子松林固碳速率与上一年 12 月和当年 3 月的月降水量达到显著相关,与生长季各月月降水多呈正相关关系,但没有达到显著或极显著相关,说明生长季降水增加能促进樟子松生长,但降水多少不是限制樟子松林固碳能力的主导因素。这与前人研究结果基本一致。牛春梅等(2017)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(2012)研究发现,海拉尔沙地樟子松生长与各月降水多呈正相关关系,当年生长季(5—8 月)降水量显著影响着径向生长;王云霓等(2013)研究发现,上一年生长季末期(9 月)和当年 4 月的月降水量显著地影响着华北落叶松林年生产力。研究区 3 月的最高气温回升到 0 ℃以上,积雪开始消融,树木细胞开始分裂,此时较多的降水和融雪,可为樟子松萌芽生长储备较多的土壤水分,有利于增大树木的固碳潜力。上一年生长季(6—9 月)和当年生长季(3—10 月)的降水量与林分固碳速率呈正相关关系,而上一年 10 月至当年 2 月及当年 11—12 月的降水量却与固碳速率呈负相关。这可能与立地条件、降水形态等有关。首先,本文样地均处在海拔较低的下坡,土壤层较厚,受重力作用和降雨的坡面再分配影响,下坡位土壤含水量较高,养分较丰富,立地条件相对优越,所以樟子松林生长相对较快,固碳速率较高;生长季较多的降水,不仅为樟子松提供当年需水量,还可以在土壤中储存较多水分,为下一年树木生长提供贮备,且适量的土壤水分也可保证树木安全越冬。

本研究显示,樟子松林固碳速率与上一年及当年生长季的月均气温、月均最低温和月均最高温均呈负相关,且与大多月份温度指标达到显著或极显著的关系,说明生长季温度是影响呼伦贝尔沙地樟子松人工林碳汇能力和生长的关键生态因子。这与前人关于温度对樟子松林生长的影响基本一致。张先亮等(2011)对大兴安岭山地樟子松的研究认为,樟子松径向生长与上一年 6—9 月和当年 4—8 月各月的各项温度指标均呈显著负相关,温度是限制树木生长的主要因子;尚建勋等(2012)认为,樟子松径向生长与生长季的月平均温度、月均最高温和月均最低温均呈负相关;王云霓等(2013)研究发现,当年 5—7 月月均温和月均最低温度与华山松(*P. armandii*)天然林的生产力呈负相关关系;程瑞梅等(2011)在北亚热带对马尾松研究发现,净生产力与当年 5 月月均气温呈负相关。导致温度抑制樟子松林生长的关系可能与樟子松生理过程有关,温度升高导致樟子松林蒸散增多,土壤水分减少,如果此时土壤水分不能及时补充,林分耗水只能使用树体内储存水分,不仅引起树木的生理干旱,还影响下一年的生长。本研究中樟子松林固碳速率与降水的相关性低于温度及生长季月均湿度与樟子松林固碳速率的相关性就是例证,所以温度升高引起的干旱胁迫或树木生理干旱是该地区樟子松林碳汇能力相对较低的主要原因。李俊霞等(2017)对海拉尔、阿尔山地区和张先亮等(2011)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;姜凤岐等(2009)研究认为,气温升高引起了三北地区樟子松的早衰。此外,关于气温升高对树木碳汇或生长影响的结论并不统一。如:Yu 等(2013)在长白山的研究认为,气温升高促进高海拔地区红松生长,但降低低海拔地区红松生长;而 Zhang 等(2010)对青藏高原中纬度地区青海云杉(*Picea crassfolia*)的研究发现,随季节气温升高,高

海拔地区树木生长趋势呈现出积极和消极的反应，而低海拔却没有呈现出不同的生长趋势。赵敏等(2004)认为，植被碳储量随着降水的增加而增加，随着气温的增加而较小。本文所处研究区正经历着暖干化的变化(姜凤岐等，2009)，可能不利于樟子松碳汇潜力，但由于气候变化引起的降水时空格局、降水强度及CO_2浓度升高和氮沉降所引起的碳氮循环变化对樟子松林碳储量和固碳速率的影响还不十分清楚，未来还需加强相关方向的研究。

4 结 论

本文利用年轮生态学方法和生物量经验方程，研究了呼伦贝尔沙地樟子松人工林乔木层的碳密度特征、固碳速率及对气象因子的响应，结果表明：樟子松人工林的碳密度从1977年到2017年随着林龄的增长逐渐增加，从2.58 t·hm^{-2}增加到87.97 t·hm^{-2}；樟子松林固碳速率的年际差异较大，总体呈先增加、后减小的变化趋势；41年间固碳速率变化为1.37~3.20 t·hm^{-2}·a^{-1}，多年平均固碳速率为2.13 t·hm^{-2}·a^{-1}。樟子松林固碳速率的年际差异主要是由气象因子引起，但不同月份的气象因子对固碳速率的影响存在明显差异；固碳速率与上一年12月和当年3月降水量显著相关($P<0.05$)；与上一年和当年8—9月的月均湿度极显著正相关($P<0.01$)；与上一年及当年生长季的月平均气温、月均最低温和月均最高温均呈负相关关系。从分析上一年6月至当年12月的气象因子与樟子松林固碳速率的关系来看，研究区樟子松林固碳能力同时受温度和降水的影响，但温度的影响大于降水的影响，在未来该地区气候暖干化的背景下，温度升高引起的干旱胁迫或树木生理干旱对樟子松林固碳速率的限制会更加突出，樟子松林固碳潜力可能会降低。

参考文献

程瑞梅, 封晓辉, 肖文发, 等. 2011. 北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应. 生态学报, **31**(8): 2086-2095. [Chen RM, Feng XH, Xiao WF, *et al*. 2011. Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in north subtropical region. *Acta Ecologica Sinica*, **31**(8): 2086-2095.]

丛俊霞, 郑 晓, 朱教君, 等. 2017. 沙地樟子松天然林地上碳储量估算及其空间分布特征. 生态学杂志, **36**(11): 2997-3007. [Cong JX, Zheng X, Zhu JJ, *et al*. 2017. Estimation and spatial distribution of aboveground carbon storage for natural *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests on sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(11): 2997-3007.]

董利虎. 2012. 黑龙江省主要树种相容性生物量模型研究(硕士学位论文). 哈尔滨：东北林业大学. [Dong LH. 2012. Study on the compatible models of tree biomass for main species in Heilongjiang province (Master's thesis). Harbin: Northeast Forestry University.]

方 晰, 田大伦, 项文化. 2002. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, **38**(3): 14-19. [Fang X, Tian DL, Xiang WH. 2002. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, **38**(3): 14-19.]

郭 超, 周志勇, 康峰峰, 等. 2014. 太岳山森林碳储量随树种组成的变化规律. 生态学杂志, **33**(8): 2012-2018. [Guo C, Zhou ZY, Kang FF, *et al*. 2014. The alteration of carbon stock of forest ecosystem by tree species composition in Taiyue Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(8): 2012-2018.]

韩阳瑞, 牟长城, 庄 宸, 等. 2014. 透光抚育对长白山中期"栽针保阔"红松林碳收支的影响. 生态学杂志, **33**(9): 2296-2307. [Han YR, Mu CC, Zhuang C, *et al*. 2014. Effects of light-felling on carbon budget of mid-term Korean pine forests by planting conifer and reserving broad-leaved tree in Changbai Mountains of China. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(9): 2296-2307.]

贺 敏, 魏江生, 石 亮, 等. 2018. 大兴安岭南段山杨径向生长和死亡对区域气候变化的响应. 生态学杂志, **37**(11): 3237-3244. [He M, Wei JS, Shi L, *et al*. 2018. The response of radial growth and death of *Populusdavidiana* to regional climate change in southern Greater Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, **37**(11): 3237-3244.]

胡 青, 汪思龙, 陈龙池, 等. 2012. 湖北省主要森林类型生态系统生物量与碳密度比较. 生态学杂志, **31**(7): 1626-1632. [Hu Q, Wang SL, Chen LC, *et al*. 2012. Biomass and carbon density of main forest ecosystems in Hubei Province. *Chinese Journal of Ecology*, **31**(7): 1626-1632.]

胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 2015a. 大兴安岭5种典型林型森林生物碳储量研究. 生态学报, **35**(17): 5745-5760. [Hu HQ, Luo BZ, Wei SJ, *et al*. 2015a. Estimating biological carbon storage of five typical forest types in the Daxing'anling Mountains, Heilongjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, **35**(17): 5745-5760.]

胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 2015b. 小兴安岭7种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力. 植物生态学报, **39**(2): 140-158. [Hu HQ, Luo BZ, Wei SJ, *et al*. 2015b. Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **39**(2): 140-158.]

姜凤岐, 于占源, 曾德慧, 等. 2009. 气候变化对三北防护林的影响与应对策略. 生态学杂志, **28**(9): 1702-1705. [Jiang FQ, Yu ZY, Zeng DH, *et al*. 2009. Effects of cli-

mate change on the Three-North shelter forest program and corresponding strategies. *Chinese Journal of Ecology*, **28**(9): 1702-1705.]

雷丕锋, 项文化, 田大伦, 等. 2004. 樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究. 生态学杂志, **23**(4): 25-30. [Lei PF, Xiang WH, Tian DL, *et al*. 2004. Carbon storage and distribution in *Cinnamomum camphor* plantation. *Chinese Journal of Ecology*, **23**(4): 25-30.]

李 皎, 张 红, 张莉秋, 等. 2014. 山西阳泉地区乔木林地上碳密度遥感估测. 生态学杂志, **33**(9): 2308-2315. [Li J, Zhang H, Zhang LQ, *et al*. 2014. Estimation of aboveground carbon density for tree forests based on remote sensing data in Yangquan of Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(9): 2308-2315.]

李俊霞, 白学平, 张先亮, 等. 2017. 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. 生态学报, **37**(21): 7232-7241. [Li JX, Bai XP, Zhang XL, *et al*. 2017. Different responses of natural *Pinus sylvstris* var. *mongolica* growth to climate change in southern and northern forested areas in the Great Xing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, **37**(21): 7232-7241.]

刘 琦, 蔡慧颖, 金光泽. 2013. 择伐对阔叶红松林碳密度和净初级生产力的影响. 应用生态学报, **24**(10): 2709-2716. [Liu Q, Cai HY, Jin GZ. 2013. Effects of selective cutting on the carbon density and net primary productivity of a mixed broadleaved-Korean pine forest in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **24**(10): 2709-2716.]

刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 等. 2011. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力. 生态学报, **31**(15): 4277-4286. [Liu YC, Wang QF, Yu GR, *et al*. 2011. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, **31**(15): 4277-4286.]

马 炜, 孙玉军, 郭孝玉, 等. 2010. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量. 生态学报, **30**(17): 4659-4667. [Ma W, Sun YJ, Guo XY, *et al*. 2010. Carbon storage of *Larix olgensis* plantation an different stand ages. *Acta Ecologica Sinica*, **30**(17): 4659-4667.]

马明东, 江 洪, 罗承德, 等. 2007. 四川西北部亚高山云杉天然林生态系统碳密度、净生产量和碳贮量的初步研究. 植物生态学报, **31**(2): 305-312. [Ma MD, Jiang H, Luo CD, *et al*. 2007. Preliminary study of carbon density, net production and carbon stock in natural spruce forests of northwest subalpine Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **31**(2): 305-312.]

牛春梅, 关晋宏, 程然然, 等. 2017. 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. 生态学报, **37**(15): 5049-5058. [Niu CM, Guan JH, Cheng RR, *et al*. 2017. Ecosystem carbon density of *Robinia pseudoacacia* plantations and influencing factors in the middle and western Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, **37**(15): 5049-5058.]

漆良华, 刘广路, 范少辉, 等. 2009. 不同抚育措施对闽西毛竹林碳密度、碳储量与碳格局的影响. 生态学杂志, **28**(8): 1482-1488. [Qi LH, Liu GL, Fan SH, *et al*. 2009. Effects of different tending measures on carbon density, storage, and allocation pattern of *Phyllostachy edulis* forests in western Fujian Province. *Chinese Journal of Ecology*, **28**(8): 1482-1488.]

任丽娟. 2013. 内蒙古大兴安岭天然樟子松群落结构特征与碳储量研究(硕士学位论文). 呼和浩特: 内蒙古农业大学. [Ren LJ. 2013. The resesrch on community structure and carbon storage of natural *Pinus sylvestris* in Greater Xing'an Mountains Inner Mongolia (Master's thesis). Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University.]

尚建勋, 时忠杰, 高吉喜, 等. 2012. 呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应. 生态学报, **32**(4): 1077-1084. [Shang JX, Shi ZJ, Gao JX, *et al*. 2012. Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China. *Acta Ecologica Sinica*, **32**(4): 1077-1084.]

佟 健, 金光泽, 李凤日, 等. 2014. 黑龙江省不同龄组软阔混交林碳密度及其分配. 生态学杂志, **33**(12): 3191-3202. [Tong J, Jin GZ, Li FR, *et al*. 2014. Carbon density and distribution in soft broad-leaved mixed forest of different age classes in Heilongjiang Province, Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(12): 3191-3202.]

王守乐, 赵 媛, 盖学瑞, 等. 2017. 长白山鱼鳞云杉径向生长对气候响应的海拔差异. 生态学杂志, **36**(11): 3131-3137. [Wang SL, Zhao Y, Gai XR, *et al*. 2017. Response of radial growth of *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate factors along an altitudinal gradient on Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(11): 3131-3137.]

王云霓, 曹恭祥, 王彦辉, 等. 2015. 宁夏六盘山华北落叶松人工林植被碳密度特征. 林业科学, **51**(10): 10-16. [Wang YN, Cao GX, Wang YH, *et al*. 2015. Characteristics of biomass carbon density of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Liupan Mountains of Ningxia. *Scientia Silvae Sinicae*, **51**(10): 10-16.]

王云霓, 熊 伟, 王彦辉, 等. 2013. 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. 生态学报, **33**(13): 4002-4010. [Wang YN, Xiong W, Wang YH, *et al*. 2013. The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(13): 4002-4010.]

于 健, 罗春旺, 徐倩倩, 等. 2016. 长白山原始林红松径向生长及林分碳汇潜力. 生态学报, **36**(9): 2626-2636. [Yu J, Luo CW, Xu QQ, *et al*. 2016. Radial growth of *Pinus koraiensis* and carbon sequestration potential of the old growth forest in Changbai Mountain, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(9): 2626-2636.]

张国斌, 刘世荣, 张远东, 等. 2008. 岷江上游亚高山暗针叶林的生物量碳密度. 林业科学, **44**(1): 1-6. [Zhang GB, Liu SR, Zhang YD, *et al*. 2008. Biomass carbon den-

sity of study alpine dark coniferous forest in the upper reaches of Minjiang River. *Scientia Silvae Sinicae*, **44**(1): 1-6.]

张先亮, 何兴元, 陈振举, 等. 2011. 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. 应用生态学报, **22**(12): 3101-3108. [Zhang XL, He XY, Chen ZJ, *et al*. 2011. Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* radial growth to climate warming in Great Xing'an-Mountins: A case study in Mangui. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **22**(12): 3101-3108.]

张新厚, 范志平, 孙学凯, 等. 2009. 半干旱区土地利用方式变化对生态系统碳储量的影响. 生态学杂志, **28**(12): 2424-2430. [Zhang XH, Fan ZP, Sun XK, *et al*. 2009. Effects of land use change on ecosystem carbon stock in semi-arid region. *Chinese Journal of Ecology*, **22**(12): 3101-3108.]

昭日格, 岳永杰, 姚云峰, 等. 2011. 内蒙古自治区森林碳储量及其动态变化. 干旱资源与环境, 25(9): 80-84. [Zhao RG, Yue YJ, Yao YF, *et al*. 2011. Forest carbon storage and its dynamics in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, **25**(9): 80-84.]

赵 敏, 周广胜. 2004. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, **24**(1): 50-54. [Zhao M, Zhou GS. 2004. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, **24**(1): 50-54.]

朱苑维, 罗 婧, 陈玉娟, 等. 2016. 广州市海珠区万亩果园主要生态系统的碳密度及其分配特征. 生态学杂志, **35**(1): 164-169. [Zhu YW, Luo Q, Chen YJ, *et al*. 2016. Carbon density and distribution of main ecosystems in Ten-Thousnd-Mu Orchard at Haizhu District, Guangzhou. *Chinese Journal of Ecology*, **35**(1): 164-169.]

Bradford JB. 2011. Potential influence of forest management on regional carbon stocks: An assessment of alternative scenarios in the Northern Lake States, USA. *Forest Science*, **57**: 479-488.

Delbart N, Picard G, Le Toan T, *et al*. 2008. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Global Change Biology*, **14**: 603-614.

Fang JY, Chen AP, Peng CH, *et al*. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**: 2320-2322.

Holmes RL. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, **43**: 69-78.

Hui DF, Wang J, Le X, *et al*. 2012. Influences of biotic and abiotic factors on the relationship between tree productivity and biomass in China. *Forest Ecology and Management*, **264**: 72-80.

Lafleur B, Pare D, Munson AD, *et al*. 2010. Response of north-eastern North American forests to climate change: Will soil conditions constrain tree species migration? *Environmental Reviews*, **18**: 279-289.

Liang EY, Leuschner C, Dulamsuren C, *et al*. 2016. Global warming-related tree growth decline and mortality on the north-eastern Tibetan plateau. *Climatic Change*, **134**: 163-176.

Liu HY, Williams AP, Allen CD, *et al*. 2013. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, **19**: 2500-2510.

Yu DP, Liu JQ, Lewis BJ, *et al*. 2013. Spatial variation and temporal instability in the climate-growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of Northeast China. *Forest Ecology and Management*, **300**: 96-105.

Zhang YX, Wilmking M. 2010. Divergent growth responses and increasing temperature limitation of Qinghai spruce growth along an elevation gradient at the northeast Tibet Plateau. *Forest Ecology and Management*, **260**: 1076-1082.

作者简介 曹恭祥,男,1984年生,博士,副研究员,主要从事森林生态方向研究。E-mail: caogongxiang1984@163.com

责任编辑 张 敏