ISSN 1005-264X
www.plant-ecology.com

植物生态学报

Chinese Journal of Plant Ecology

第41卷 第8期 2017年8月 Vol. 41 No. 8 August 2017

主办单位: 中国科学院植物研究所
中国植物学会

Sponsors: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences
Botanical Society of China

河北塞罕坝樟子松人工林生长及碳储量的变化

邢娟 郑成洋* 冯婵莹 曾发旭

北京大学城市与环境学院, 北京 100871

摘要 樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)作为华北地区重要的造林树种, 其生长及固碳特征的研究对樟子松人工林经营有着重要的意义。该文通过2006–2016年10年的定点观测, 研究河北省塞罕坝林场樟子松人工林的生长和固碳特征。结果表明: 10年间樟子松人工林胸径年增长4.19%, 树高年增长1.97%; 林木死亡率8.39%。该林分2006年和2016年的碳储量分别为59.04和109.64 t·hm⁻², 即10年间固碳量为50.6 t·hm⁻², 固碳年平均增长8.57%。不同径级的林木固碳能力有差异, 0–10 cm径级的林木总株数占39.1%, 但固碳量仅占8.3%; 10–20 cm径级的林木株数占59.2%, 固碳量占比达87.1%。结果显示樟子松人工林具有较大的固碳潜力, 未来评估林分生态效益与固碳潜力时, 应充分考虑林分的结构特征。

关键词 樟子松人工林; 生长特征; 径级结构; 碳储量

引用格式: 邢娟, 郑成洋, 冯婵莹, 曾发旭 (2017). 河北塞罕坝樟子松人工林生长及碳储量的变化. 植物生态学报, 41, 840–849. doi: 10.17521/cjpe.2017.0060

Change of growth characters and carbon stocks in plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Saihanba, Hebei, China

XING Juan, ZHENG Cheng-Yang*, FENG Chan-Ying, and ZENG Fa-Xu

College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract

Aims *Pinus sylvestris* var. *mongolica* is one of the main afforestation tree species in North China. It is important to study the characters of growth and carbon (C) sequestration, which can provide scientific basis for the sustainable management. Therefore, our study aims at quantifying the growth characters and C sequestration in these middle-aged plantations, and to investigate the effect of diameter at breast height (DBH) on those dynamics.

Methods We selected a middle-aged *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation as our permanent experimental plot, which is located in Saihanba, Hebei Province, China. DBH and height of all stands in this plot were measured in 2006 and 2016. Based on the anatomical trees and allometric equation, we calculated C density and sequestration from 2006 to 2016. We also analyzed C sequestration in different DBH groups in the study area.

Important findings Our results showed that the carbon sink of those middle-age (age between 28 and 38 years old) plantation would be enhanced in future, and there were differences in characters of growth and C sequestration among DBH groups. The decadal increment rate of DBH and height were 4.19% and 1.97%, and the increment rate was the lowest in the 0–10 cm DBH class. The mortality rate of the plantation was 8.39%, with 7.82% mortality occurred in 0–10 cm tree size class. The forest stands biomass carbon stocks in 2006 and 2016 were 59.04 and 109.64 t·hm⁻², respectively, and almost 87.1% of the carbon stocks were in the middle DBH-class, even though the number of trees only accounted for nearly 59.2%. The small class's number of trees accounted for 39.1%, while the carbon stocks accounted for 8.3%. Our results also demonstrate that forests in Saihanba would continue to act as a carbon sink in the coming years. The variations among DBH groups highlights that the diameter class should be taken into consideration while assess the ecological efficiency and carbon sequestration capacity in a certain area.

Key words *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation; growth character; diameter class; carbon sequestration

Citation: Xing J, Zheng CY, Feng CY, Zeng FX (2017). Change of growth characters and carbon stocks in plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Saihanba, Hebei, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 840–849. doi: 10.17521/cjpe.2017.0060

收稿日期Received: 2017-03-16 接受日期Accepted: 2017-05-19

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: zhengcy@pku.edu.cn)

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 hm^2 , 约占我国森林总面积的31.8%^①。自20世纪70年代以来, 我国森林碳储量的增加主要源自人工林面积的增加, 人工林碳储量约占森林碳储量的47.8% (Fang *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016)。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是我国北方干旱半干旱区的主要造林树种, 在我国人工林建设中具有重要的地位。樟子松属于欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)的一个变种, 分布于我国大兴安岭和呼伦贝尔地区, 具有耐寒、耐旱、耐瘠薄、速生等优良特性(姜凤岐等, 1996)。樟子松在我国北方地区大量引种是从1955年开始的, 至今已在我国北方13省份300多个县营造樟子松人工林约67万 hm^2 , 目前樟子松仍是我国北方干旱半干旱地区主要的造林树种(曾德慧等, 1996; 张继义等, 2005; Song *et al.*, 2016)。研究樟子松人工林生长及固碳特征, 对我国北方风沙区人工林乃至全国人工林的经营管理与可持续发展具有重要的理论意义。

目前, 关于樟子松人工林生长、固碳等方面的研究已取得不少成果。20世纪后期, 主要是针对樟子松引种技术的研究(郎建民和宋廷茂, 1993; 曾德慧等, 1996)。21世纪初开始关注樟子松生长与立地条件的关系, 立地条件主要包括土壤水分和养分等(Zeng *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2014, 2015)。近年来, 有关樟子松人工林的研究主要集中在生长和固碳两个方面。关于生长特征的研究主要在红花尔基、毛乌素沙漠、乌兰布和、科尔沁等地开展(Zhu *et al.*, 2003; 格日勒等, 2004; 李露露等, 2015; 刘芳等, 2015; 刘新平等, 2016)。这些研究中, 20–40林龄的樟子松人工林生长速率存在区域差异。关于樟子松人工林固碳特征的研究受到学界的关注, 取得了不少成果(贾炜玮等, 2012; 韩美娜等, 2015; 胡海清等, 2015), 发现樟子松中龄林仍具有较大的固碳潜力。但上述关于生长和固碳的研究, 大多是采用空间代替时间的方法或针对固定龄级的樟子松开展, 缺少时间尺度上对固定样地的调查, 并且往往未能考虑径级结构对生长与固碳的影响。针对上述问题, 我们用2006–2016年樟子松人工林固定样地生长数据,

研究其中龄林的生长及固碳特征, 并分析不同径级的林木生长及固碳特征是否存在差异。

我们选取河北塞罕坝机械林场樟子松人工林进行研究。该区域地处我国森林草原交错区、半湿润半干旱季风气候区, 也是20世纪六七十年代大面积樟子松造林的主要地区, 目前有林地面积7.5万 hm^2 , 樟子松人工林约1.3万 hm^2 (戴继先, 2002), 樟子松生长大部分进入中龄阶段。本文基于1978年在该区营造的樟子松林, 进行10年(2006–2016年)的定点调查, 研究樟子松人工林在近自然状态下的生长和固碳特征, 并分析不同径级的林木生长和固碳差异, 为樟子松人工林的经营管理提供科学依据, 也为评估人工林生长及碳汇潜力提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究区地处内蒙古高原、大兴安岭山系与冀北山地交汇之处, 位于河北省围场满族蒙古族自治县北部的塞罕坝机械林场千层板林场(42.40° N、117.23° E, 海拔1 431 m)。该区域东部毗邻河北省围场满族蒙古族自治县姜家店乡, 西部与内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县接壤, 南部毗邻河北省承德市御道口牧场, 北部与内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗相接。该区属于半干旱、半湿润气候区, 夏季凉爽, 冬季寒冷漫长。1960–2010年塞罕坝气象站统计资料表明, 该区年平均气温-1.4 °C, 年降水量454.2 mm, 年日照时间2 367.8 h, 年平均相对湿度74.4%, 年蒸发量1 244.4 mm, 积雪期长达7个月, 最深冻土深度为168 cm。塞罕坝土壤为风沙土, 主要成土母质为风积物、残积物及冲积物。林下灌木、草本稀疏, 草本以大披针藁草(*Carex lanceolata*)、腺毛委陵菜(*Potentilla longifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、瓣蕊唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等为主。

1.2 数据采集

2006年9月在北京大学生态与环境观测系统塞罕坝实验站西边樟子松人工林(1978年栽植, 林龄29)设置400 m × 250 m的大样地, 样地四周以铁丝网围栏, 围栏内选择林分相对均匀的区域设置9块20 m × 20 m的固定样地。对样方内所有胸径(DBH) ≥ 3 cm的活立木进行挂牌编号, 安装自制的胸径生长圈, 用激光测高仪(Laser Technology, Germantown, USA)测定树高, 并记录其健康状态。固定样地保持

① State Forestry Administration of the People's Republic of China (2010). The 7th National forest inventory and status of forest resources, 1, 3–10. (in Chinese) [国家林业局 (2010). 第七次全国森林资源清查, 1, 3–10.]

自然生长状态(即无人抚育、采伐或其他人为干扰)。2016年9月对样地内所有林木按2006年调查方法进行复查。对调查数据逐一进行校对核查,确保数据的准确性。

1.3 数据处理

根据2006年及2016年的实测胸径、树龄(N), 计算每株乔木的胸径、树高年生长量(AI)及年增长率(AIR), 计算公式如下:

$$AI_{DBH} = DBH_N / N$$

$$AIR_{DBH}(\%) = (DBH_{2016} - DBH_{2006}) / DBH_{2006} \times 100\%$$

根据胸径计算得到胸高断面积(BA), 将样地内胸高断面积之和换算为单位面积胸高断面积($m^2 \cdot hm^{-2}$), 并计算胸高断面积生长量(BAI)及增长率($BAIR$), 计算公式如下:

$$BAI (m^2 \cdot hm^{-2}) = (BA_{2016} - BA_{2006})$$

$$BAIR(\%) = (BA_{2016} - BA_{2006}) / BA_{2006} \times 100\%$$

乔木生物量方程是根据河北塞罕坝樟子松解析木计算获得, 包括樟子松的树干、树枝、树叶和树根生物量, 总生物量为各个器官总和。碳储量用生物量乘以0.5系数获得(表1)。

本文数据分析和图表制作采用SPSS 20.0 (IBM,

USA)统计软件完成。

2 结果和分析

2.1 胸径和树高变化

2006年和2016年塞罕坝樟子松人工林林木的平均胸径为(10.95 ± 3.53) cm和(15.56 ± 6.29) cm, 10年间胸径增长量为4.61 cm, 同比增长了4.21% (表2、表3), 年均增长量为0.461 cm, 大于2006年前的

表1 樟子松和落叶松各生物量组分计算公式

Table 1 Formulae for biomass in different components of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix principis-rupprechtii*

树种 Species	器官 Organ	生物量方程 Formulate for biomass
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	树干 Stem	$W = 0.039 \times (D^2H)^{0.888}$
	树枝 Branch	$W = 0.047 \times (D^2H)^{0.705}$
	树叶 Foliage	$W = 0.075 \times (D^2H)^{0.404}$
	树根 Root	$W = 0.012 \times (D^2H)^{0.873}$
落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	树干 Stem	$W = 0.065 \times (D^2H)^{0.793}$
	树枝 Branch	$W = 0.052 \times (D^2H)^{0.679}$
	树叶 Foliage	$W = 0.139 \times (D^2H)^{0.457}$
	树根 Root	$W = 0.023 \times (D^2H)^{0.75}$

D , 胸径(cm); H , 树高(m); W , 生物量(kg)。资料来自北京大学郑成洋研究组2010–2012年调查数据(未发表)。

D , diameter at breast height (cm); H , tree height (m); W , biomass (kg). Data from Zheng Cheng-Yang Research Team in Peking University from 2010 to 2012 (unpublished).

表2 樟子松人工林林分结构特征(平均值±标准偏差)

Table 2 Stand characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations (mean ± SD)

树种 Species	2006年			2016年			年均增幅 Annual increment rate (%)	
	密度 Density (stems·hm ⁻²)	胸径 DBH (cm)	树高 Tree height (m)	密度 Density (stems·hm ⁻²)	胸径 DBH (cm)	树高 Tree height (m)	胸径 DBH	树高 Tree height (m)
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	2 900	10.95 ± 3.53	8.74 ± 1.54	2 625	15.56 ± 6.29	10.62 ± 2.22	4.21	2.15
落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	669	12.29 ± 4.34	9.49 ± 2.08	650	17.18 ± 6.54	10.67 ± 2.66	3.98	1.24
林分 Stand	3 569	11.19 ± 3.73	8.88 ± 1.68	3 275	15.88 ± 6.37	10.63 ± 2.37	4.19	1.97

DBH, diameter at breast height.

表3 树木年生长量特征

Table 3 Dynamics of annual tree growth

树种 Species	年份 Year	胸径 DBH (cm)		树高 Tree height (m)	
		总生长量 Total increment	年生长量 Annual increment	总生长量 Total increment	年生长量 Annual increment
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	2006	10.95	0.456	8.74	0.257
	2016	15.56	0.458	10.62	0.312
落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	2006	12.29	0.512	9.49	0.279
	2016	17.18	0.505	10.67	0.314
林分 Stand	2006	11.19	0.466	8.88	0.261
	2016	15.88	0.467	10.63	0.313

DBH, diameter at breast height.

年均生长量0.456 cm; 样地内混生一些落叶松(*Larix principis-rupprechtii*), 2006年和2016年平均胸径为(12.29 ± 4.34)和(17.18 ± 6.54) cm, 10年间胸径增量为4.89 cm, 增长了3.98%, 年平均增长量(0.49 cm)小于2006年之前的年平均增长量(0.512 cm)。樟子松10年间平均树高增加1.88 m, 增长率21.5%, 落叶松树高10年间增加了1.18 m, 增幅为12.40%。樟子松胸径、树高增幅均大于落叶松。9块调查样地的樟子松和落叶松株数比例有差异, 其中样地S1、S2、S3的樟子松和落叶松株数比例属于混交林, 样地S4、S5、S6、S7、S8、S9为樟子松纯林, 样地间树木平均胸径、树高增长量有一定差别, 但没有统计上的显著性(图1)。

2.2 胸高断面积变化

樟子松林10年间胸高断面积(BA)增加了(36.27 ± 4.09) $\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 增长率为98.1%。其中, 樟子松和落叶松胸高断面积分别增长27.94和8.33 $\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 增长率分别为98.5%和105.0%, 这两个树种的胸高断面积年增长率相近。数据分析(图2)表明, 不同径级林木对林分总胸高断面积增长的贡献不同, 其中, 10–15 cm、15–20 cm径级的林木胸高断面积增量占

图1 10年间塞罕坝樟子松人工林胸径、树高增长量(平均值±标准误差)。

Fig. 1 Decadal increment of diameter at breast height (DBH) and tree height in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Saihanba (mean $\pm$ SE).

林分总体增量的87.7%, 是樟子松人工林胸高断面积增加的主要来源。小径级($DBH \leq 10$ cm)林木胸高断面积增量占林分总体增量的8.1%, 该径级林木株数占林分总株数的24.5%。

2.3 径级与林木生长的关系

以2006年胸径大小划分径级, 10年间不同径级林木的胸径生长存在差异(图2)。樟子松DBH增长量在0–5 cm之间(平均胸径(DBH_{avg}) = 1.74 cm)的林木占总株数的61.7%, DBH增长量在5–10 cm之间(DBH_{avg} = 7.27 cm)的林木占总株数的31.7%; 样地

图2 10年间不同径级的胸径、树高和胸高断面积增长量。小写字母表示不同径级的10年间胸径、树高、胸高断面积增长量的多重比较显著水平($p < 0.05$) (平均值±标准误差)。

Fig. 2 Decadal increment of diameter at breast height (DBH), tree height and basal area in different DBH-class. Lowercase letter represent the significant level of multiple comparisons of decadal increment of DBH, tree height and basal area in different DBH-class (mean $\pm$ SE).

doi: 10.17521/cjpe.2017.0060

内混交的落叶松10年间胸径平均增长量为4.89 cm, DBH_{avg} 增长量在0–5 cm之间($DBH_{avg} = 2.47$ cm)的林木占总株数的50.2%, DBH 增长量在5–10 cm之间($DBH_{avg} = 6.78$ cm)的林木占总株数的47.2%。15–20 cm径级的林木胸径增长最高, 年增长率达6.15%, 其次是20–25 cm径级的林木年增长率达6.03%, 0–5 cm和5–10 cm径级的林木年增长率较低, 分别为2.23%和2.47%。就胸高断面面积增长而言, 10–15 cm径级的林木贡献最大, 其次是15–20 cm、5–10 cm径级的林木, 0–5 cm径级的林木对林分总体胸高断面面积增量的贡献最小。

不同径级林木的树高生长存在差异, 樟子松15–20 cm径级林木的树高年增长率(3.21%)最大, 其次是10–15 cm径级林木的年增长率(3.05%), 最小树高增长率出现在0–5 cm径级(2.54%), 这与20–25 cm径级的树高年增长率(2.64%)相近。落叶松树高年增长率呈现与樟子松相似的趋势, 即随着径级增加, 树高的年增长率逐渐增大。落叶松的树高年增长率最高出现在20–25 cm径级的林木(2.99%), 最低出现在0–5 cm径级的林木(2.25%), 其余径级的树高年增长率相近, 在2.4%–2.5%之间。总体看来, 树高年生长率与胸径呈现不同的规律, 树高生长在不同径级之间的差异小于胸径, 即胸径生长变化较大, 树高生长较为均一。

2.4 树木死亡

10年间树木死亡较多(表4), 总死亡株数占2006年树木株数的7.78%。其中, 0–5 cm径级的林木死亡数量较大, 死亡株数占该径级林木总株数的64.7%, 5–10 cm径级的林木死亡率为13.85%, 而10–15 cm径级的林木死亡率为1.40%。综上所述, 5–10 cm径级的林木死亡数量最大, 但是0–5 cm径级的林木死亡率最高。研究数据表明, 樟子松、落叶松株数比

例为混交林样地(S1–3)樟子松死亡率大于纯林样地(S4–S9)。

10年前后树木径级结构变化明显(图3)。2006年树木生长比较均一, 树木胸径主要分布在5–15 cm径级, 大部分树木生长较快, 林木个体间的差异不大, 近90%的林木处于相似径级。2016年树木径级差异增大, 小径级的林木个体减少, 中等径级的个体分布较多, 林内个体生长差异增大。

2.5 碳储量变化

樟子松人工林2006年和2016年乔木层碳储量分别为59.04 $Mg \cdot hm^{-2}$ 和109.64 $Mg \cdot hm^{-2}$, 10年间固碳量为50.60 $Mg \cdot hm^{-2}$, 增幅高达85.69%。其中, 10年间樟子松组分固碳量为36.09 $Mg \cdot hm^{-2}$, 落叶松组分固碳量为14.51 $Mg \cdot hm^{-2}$ 。进一步划分树干、枝、叶和根进行分析, 树干碳储量占比较高, 其次是树枝、树根, 树叶碳储量占比最小。10年前后不同组分碳储量占比发生了变化, 树干、树根的碳储量占比增加, 树枝、树叶的碳储量占比下降。2006年树干、树枝、树叶、树根占比分别为56.77%、19.32%、8.94%、14.98%, 到2016年占比为60.10%、17.79%、6.61%、15.33%, 可见树干和树根是碳储量的主要载体。10年前后, 碳储量占比变化较大的是树叶, 占比减少了31.65%, 其次是树枝占比下降了7.9%, 树干占比增长了5.88%, 树根占比增加了2.33%。

不同径级林木的固碳能力存在差异(图4)。2006–2016年林分整体碳储量增加明显, 但0–5 cm径级的林木碳储量减少, 这可能与该径级林木的死亡率较高有关。10–15 cm径级的林木碳储量年变化量最大, 年均增长5.41 $Mg \cdot hm^{-2}$, 其次是15–20 cm径级的林木(3.41 $Mg \cdot hm^{-2}$)、5–10 cm径级的林木(0.88 $Mg \cdot hm^{-2}$)。值得注意的是, 落叶松和樟子松的碳储量年变化量最大值分别为4.02和1.37 $Mg \cdot hm^{-2}$,

表4 不同径级林木死亡率

Table 4 Mortality of forest stand in different DBH-class

径级 DBH-class (cm)	2006年		2016年		10年间死亡率 Decadal mortality (%)	
	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>
0–5	29	5	8	4	72.4	20.0
5–10	404	67	330	63	18.3	5.9
10–15	466	107	460	105	1.3	1.9
15–20	143	47	143	47	0.0	0.0
20–25	4	15	4	15	0.0	0.0

DBH, diameter at breast height.

www.plant-ecology.com

图3 2006年和2016年樟子松人工林胸径频率分布。
Fig. 3 Diameter at breast height (DBH) frequency distribution in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2006 and 2016.

图4 10年间不同径级林木碳储量变化和碳储量年平均变化率。
Fig. 4 Decadal variation and annual rate of change of tree carbon storage in different DBH-class. DBH, diameter at breast height.

都出现在10–15 cm径级的林木。樟子松和落叶松碳储量年变化量最小值分别是–0.05和0.01 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 都出现在0–5 cm径级的林木。但两个树种5–10 cm、20–15 cm径级的林木碳储量变化存在差异。樟子松5–10 cm径级的林木碳储量年增长量更高, 这可能与该径级的林木株数较多有关。

碳储量年均变化率在树种和不同径级间存在差异(图4)。林分总体的碳储量年均增长8.69%, 樟子松增长了8.15%, 落叶松增长了10.58%。林分总体碳储量年均变化率最大的是15–20 cm的林木, 增长了11.29%, 年均变化率最小的是0–5 cm径级的林木, 下降了3.12%。对不同组分而言, 樟子松的碳储量年均变化率大致随着径级增长而增大, 15–20 cm径级的林木碳储量变化率高达11.46%, 即每年增长11.46%。落叶松的碳储量年均变化率有两个高峰, 变化率最大的是0–5 cm径级的林木, 达到15.38%,

并且10–15、15–20 cm的树木年均变化率相近, 约为11%。

3 讨论和结论

3.1 樟子松人工林的生长特征

樟子松人工中龄林在不同引种区的生长存在差异, 这主要与所在区域的气候条件有关(Zhu *et al.*, 2003, 2008; Song *et al.*, 2016)。塞罕坝作为20世纪60–70年代樟子松的主要造林地区, 樟子松人工中龄林生长比较稳定, 没有出现明显的衰退迹象。本研究中樟子松人工林在2006年(28年林龄)、2016年(38年林龄)平均胸径分别为10.95和15.56 cm, 平均树高分别为8.74和10.62 m, 该结果与辽宁省章古台地区樟子松人工林同龄级树木平均胸径、树高相近, 但胸径在10年间的年均增量(0.46 cm)高于章古台地区(0.2–0.3 cm), 树高年均增量(0.18 m)低于章古台地区(0.2 m)(曾德慧等, 1996), 胸径、树高增量均低于多伦地区樟子松人工幼龄林胸径年均增长量(6.37 cm)、树高年均增量(0.41 m)(刘红梅等, 2013), 胸径年均增量与同龄红花尔基地区樟子松天然林(0.3–0.4 cm)相似, 树高增量小于该区(0.2–0.3 m)(姜凤岐等, 1996)。本研究中樟子松人工林10年间树木胸径年均增长率为3.1%, 树高年均增长率为21.5%。该结果表明, 林分生长到一定阶段后树高的年均增长率略好于胸径的年均增长率, 这与Willims等(2012)的研究基本一致。

胸径与树木生长、死亡特征密切相关(Muller-Landau *et al.*, 2006), 影响林分的生物量(Xu *et al.*, 2016)。本研究中, 无人干扰的樟子松人工林10年间中等径级(15–20 cm)林木的胸径生长优于小径级(0–10 cm)林木, 其死亡率(1.4%)远远低于小径级林木。这可能与该径级的林木能够较好地获取资源, 在竞争中处于优势地位有关(Stephenson *et al.*, 2014)。在成熟林和过熟林中, 往往是较大径级个体的林木容易死亡(Runkle, 2013), 但本研究中, 小径级林木死亡数量率约占64.7%, 说明樟子松人工中龄林仍处于发展阶段, 长势较弱的林木在竞争中逐渐被淘汰。本研究中, 10年间死亡的树木数量较大, 树木死亡率为7.78%, 这与森林不同发育阶段的树木个体间竞争加剧有关, 符合自然稀疏法则(Coomes & Allen, 2007)。综上所述, 中等径级的林木生长速率较高、死亡率低, 因此对林分生物量增加的

贡献较大;小径级林木生长率不高,死亡率较高,对胸高断面面积以及生物量的贡献较小。

3.2 樟子松人工林的固碳特征

2006年和2016年研究区域樟子松人工中龄林的碳储量分别是59.04和109.64 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$,高于其他地区的类似研究结果。胡海清等(2015)的研究显示东北地区樟子松中龄林碳密度为52.0 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$;袁立敏等(2011)研究发现科尔沁沙地樟子松人工中龄林乔木层碳储量为57.8 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$;韩美娜等(2015)研究的辽宁地区樟子松人工中龄林植被碳密度为33.83 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。但该结果与中欧地区樟子松林的碳储量相近,该生态系统碳储量为79–187 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中乔木层碳储量占比小于50% (Vucetich *et al.*, 2000),该结果也接近我国森林平均碳密度116.68 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (赵敏, 2004)。通过对比,塞罕坝樟子松人工林密度较高(3 568株 $\cdot\text{hm}^{-2}$),其他研究地的樟子松密度一般在900–2 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。以往研究表明,立地条件好的樟子松林适宜密度为3 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ (曾德慧等, 2000),塞罕坝地区樟子松人工林能维持较高密度,与当地中纬度、中海拔、降水量适中的良好环境条件有关。

不同径级的林木固碳能力有差异。本研究中,中等径级(10–20 cm)的林木株数约占总体的50%,但碳储量增加量占总体碳储量增量的87%,中等、较大径级林木生物量较高、固碳能力较强,是林分生物量、碳储量的主要载体。该结果与我国尖峰岭地区、美国东北部地区关于森林生长的研究结论一致(陈德祥等, 2010; Fedrigo *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2016)。本研究中,小径级(5–10 cm)林木10年间碳储量增加量较少。0–5 cm径级林木的碳储量减少,这可能与该径级林木死亡率较高有关。但本研究区中等径级林木占比较大,且树木生长较稳定,可以预测未来10年能够持续、稳定地发挥固碳作用(张日升, 2016)。

影响樟子松林固碳能力的因素比较复杂。气候条件是影响樟子松固碳能力的重要因素,Vucetich等(2000)研究发现,随着纬度升高和水热条件的下降,樟子松林的碳储量减少,Dobbertin等(2010)发现水分增加能够促进樟子松的生长,Eilmann等(2010)和Maetin-Benito等(2013)认为干旱会导致樟子松生长减缓,并且影响生长周期,干旱通过影响碳水化合物产生进而影响树木生长和林分的固碳能力。同时,森林的自身特征也影响樟子松人工林的固碳

水平,Alvarez等(2016)发现合理的林分密度有利于樟子松林的生长, Lee等(2016)研究认为樟子松林碳储量随着林龄的增加而增长, Michelot等(2012)研究认为生长季持续的时间对樟子松生长非常重要。同时,王霓虹等(2014)和韩美娜等(2015)发现,随着树龄增加,树干、树枝、树叶、树根对碳储量的贡献度发生变化,树根占比略微增长,树枝和树叶占比逐渐下降,本研究结果与之一致。

塞罕坝地区樟子松人工中龄林10年间生长状况良好,碳储量增加明显,该林分未来仍具有较大的固碳潜力。不同径级的林木生长、固碳能力有差异,中等径级(10–20 cm)的林木生长速率较高,对林分年固碳量贡献最大;小径级(0–10 cm)林木株数虽多,但在竞争中处于劣势,生长速率低于中等径级林木,并且死亡率高,固碳能力十分有限。可见,樟子松人工中龄林生长及固碳量与径级结构、胸径增长量等密切相关。因此,在人工林经营管理中应充分考虑上述因素,并且在今后评估樟子松人工林乃至我国其他人工林生长特征和固碳潜力时,应充分考虑林分的径级结构特征,以期得到更准确的预测结果。

基金项目 国家自然科学基金(40671064)。

致谢 北京大学方精云等老师在本研究中给予指导,任艳林在数据收集给予支持和帮助,李鹏、郭强、李超等同学在文章撰写中给予帮助,在此表示感谢。

参考文献

- Alvarez S, Ortiz C, Díaz-Pinés E, Rubio A (2016). 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. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21, 1045–1058.
- Chen DX, Li YD, Xu H, Xiao WF, Luo TS, Zhou Z, Lin MX (2010). Biomass and carbon dynamics of a tropical mountain rain forest in China. *Science China: Life Science*, 40, 596–609. (in Chinese) [陈德祥, 李意德, 许涵, 肖文发, 骆土寿, 周璋, 林明献 (2010). 尖峰岭热带山地雨林生物量及碳库动态. *中国科学: 生命科学*, 40, 596–609.]
- Coomes DA, Allen RB (2007). Mortality and tree-size distributions in natural mixed-age forests. *Journal of Ecology*, 95, 27–40.
- Dai JX (2002). *Afforestation Techniques of Pinus sylvestris* var.

- mongolica* China. Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [戴继先 (2002). 樟子松造林技术. 中国林业出版社, 北京.]
- Dobbertin M, Eilmann B, Bleuler P, Giuggiola A, Graf Pannatier E, Landolt W, Schleppi P, Rigling A (2010). Effect of irrigation on needle morphology, shoot and stem growth in a drought-exposed *Pinus sylvestris* forest. *Tree Physiology*, 30, 346–360.
- Eilmann B, Buchmann N, Siegwolf R, Saurer M, Cherubini P, Rigling A (2010). Fast response of Scots pine to improved water availability reflected in tree-ring width and delta ^{13}C . *Plant, Cell & Environment*, 33, 1351–1360.
- Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320–2322.
- Fedrigo M, Kasel S, Bennett LT, Roxburgh SH, Nitschke CR (2014). Carbon stocks in temperate forests of south-eastern Australia reflect large tree distribution and edaphic conditions. *Forest Ecology and Management*, 334, 129–143.
- Gerile, Siqinbilige, Jin R (2004). Research on the growth characteristics of the introduced *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Maowusu sandy land. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 18(5), 159–162. [格日勒, 斯琴毕力格, 金荣 (2004). 毛乌素沙地引种樟子松生长特性的研究. 干旱区资源与环境, 18(5), 159–162.]
- Guo ZD, Hu HF, Li P, Li NY, Fang JY (2013). Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008. *Science China: Life Sciences*, 56, 661.
- Han MN, Wei YW, Qin SJ, Deng LP, Zhou YB (2015). Carbon storage dynamics and its distribution pattern in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 1798–1803. (in Chinese with English abstract) [韩美娜, 魏亚伟, 秦胜金, 邓莉萍, 周永斌 (2015). 沙地樟子松人工林碳库动态及其分配特征. 生态学杂志 34, 1798–1803.]
- Hu HQ, Luo BZ, Wei SJ, Wei SW, Sun L, Luo SS, Ma HB (2015). Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 140–158. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 魏书威, 孙龙, 罗斯生, 马洪斌 (2015). 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, 140–158.]
- Jia WW, Li FR, Dong LH, Zhao X (2012). Carbon density and storage for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation based on compatible biomass models. *Journal of Beijing Forestry University*, 34(1), 6–13. (in Chinese with English abstract) [贾炜玮, 李凤日, 董利虎, 赵鑫 (2012). 基于相容性生物量模型的樟子松林碳密度与碳储量研究. 北京林业大学学报, 34(1), 6–13.]
- Jiang FQ, Zeng DH, Fan ZP, Zhu JJ (1996). Simulation of individual tree growth of Mongolian pine forest in sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 7, 1–5. (in Chinese with English abstract) [姜凤岐, 曾德慧, 范志平, 朱教君 (1996). 沙地樟子松林单木生长的研究. 应用生态学报, 7, 1–5.]
- Lang JM, Song TM (1993). Effects of root treatment and packaging methods on afforestation of seedling of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Journal of Beijing Forestry University*, 15(2), 203–206. [郎建民, 宋廷茂 (1993). 根系处理及包装方法对樟子松苗木造林效果的影响. 北京林业大学学报, 15(2), 203–206.]
- Lee J, Tolunay D, Makineci E, Çömez A, Son YM, Kim R, Son Y (2016). Estimating the age-dependent changes in carbon stocks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Turkey. *Annals of Forest Science*, 73, 523–531.
- Li LL, Li LG, Chen ZJ, Zhou YB, Zhang XL, Bai XP, Chang YX, Xiao JQ (2015). Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to gradient change of hydrothermal in plantations in Liaoning Province. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4508–4517. (in Chinese with English abstract) [李露露, 李丽光, 陈振举, 周永斌, 张先亮, 白学平, 常永兴, 肖建强 (2015). 辽宁省人工林樟子松径向生长对水热梯度变化的响应. 生态学报, 35, 4508–4517.]
- Li Q, Zhu JH, Feng Y, Xiao WF (2016). Carbon stocks and carbon sequestration of the main plantation in China. *Journal of Northwest Forestry University*, 31, 1–6. (in Chinese with English abstract) [李奇, 朱建华, 冯源, 肖文发 (2016). 中国主要人工林碳储量与固碳能力. 西北林学院学报, 31, 1–6.]
- Liu F, Zhang YX, Ma YB, Dong LL, Yu XC, Huang YR (2015). Growth rhythm of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Ulan Buh Desert. *Journal of Desert Research*, 35, 1234–1238. [刘芳, 章尧想, 马迎宾, 董礼隆, 余新春, 黄雅茹 (2015). 乌兰布和沙漠绿洲樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长规律初探. 中国沙漠, 35, 1234–1238.]
- Liu HM, Lü SJ, Lui QQ, Lui LY, Wang YJ, Zhang BH (2013). Biomass and carbon storage of the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in the Duolun County. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 34, 49–53. (in Chinese with English abstract) [刘红梅, 吕世杰, 刘清泉, 刘丽英, 王玉芝, 章海波 (2013). 多伦县樟子松人工林生物量及碳储量研究. 内蒙古农业大学学报, 34, 49–53.]
- Lui XP, He YH, Wei SL, Zhao XY, Zhang TH, Yue XF (2016). Growth response of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to precipitation and air temperature in the Horqin Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 36(1), 57–63. [刘新平, 何玉惠, 魏水莲, 赵学勇, 张铜会, 岳祥飞 (2016). 科尔沁

沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长对降水和温度的响应. 中国沙漠, 36(1), 57–63.]

- Martin-Benito D, Beeckman H, Cañellas I (2013). Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research*, 132, 33–45.
- Michelot A, Simard S, Rathgeber C, Dufrene E, Damesin C (2012). Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree Physiology*, 32, 1033–1045.
- Muller-Landau HC, Condit RS, Chave J, Thomas SC, Bohman SA, Bunyavejchewin S, Davies S, Foster R, Gunatilleke S, Gunatilleke N, Harms KE, Hart T, Hubbell SP, Itoh A, Kassim AR, LaFrankie JV, Lee HS, Losos E, Makana JR, Ohkubo T, Sukumar R, Sun IF, Nur Supardi MN, Tan S, Thompson J, Valencia R, Muñoz GV, Wills C, Yamakura T, Chuyong G, Dattaraja HS, Esufali S, Hall P, Hernandez C, Kenfack D, Kiratiprayoon S, Suresh HS, Thomas D, Vallejo MI, Ashton P (2006). Testing metabolic ecology theory for allometric scaling of tree size, growth and mortality in tropical forests. *Ecology Letters*, 9, 575–588.
- Runkle JR (2013). Thirty-two years of change in an old-growth Ohio beech-maple forest. *Ecology*, 94, 1165–1175.
- Song L, Zhu J, Li M, Yu Z (2014). Water utilization of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in a sparse wood grassland in the semiarid sandy region of Northeast China. *Trees*, 28, 971–982.
- Song L, Zhu J, Li M, Zhang J (2016). Water use patterns of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees of different ages in a semiarid sandy lands of Northeast China. *Environmental and Experimental Botany*, 129, 94–107.
- Song L, Zhu J, Yan Q, Li M, Yu G (2015). Comparison of intrinsic water use efficiency between different aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wide windbreaks in semiarid sandy land of northern China. *Agroforestry Systems*, 89, 477–489.
- Stephenson NL, Das AJ, Condit R, Russo SE, Baker PJ, Beckman NG, Coomes DA, Lines ER, Morris WK, Ruger N, Alvarez E, Blundo C, Bunyavejchewin S, Chuyong G, Davies SJ, Duque A, Ewango CN, Flores O, Franklin JF, Grau HR, Hao Z, Harmon ME, Hubbell SP, Kenfack D, Lin Y, Makana JR, Malizia A, Malizia LR, Pabst RJ, Pongpattananurak N, Su SH, Sun IF, Tan S, Thomas D, Mantgem PJ, Wang X, Wiser SK, Zavala MA (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 507, 90.
- Vucetich JA, Reed DD, Breymeyer A, Degórski M, Mroz GD, Solon J, Roo-Zielinska E, Noble R (2000). Carbon pools and ecosystem properties along a latitudinal gradient in northern Scots pine (*Pinus sylvestris*) forests. *Forest Ecology and Management*, 136, 135–145.
- Wang D, Wang B, Niu X (2014). Forest carbon sequestration in China and its benefits. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29, 51–59.
- Wang NH, Gao M, Li D (2014). Tree layer biomass distribution and carbon storage capacity of *Larix olgensis* plantation. *Bulletin of Botanical Research*, 34, 554–558. (in Chinese with English abstract) [王霓虹, 高萌, 李丹 (2014). 长白落叶松人工林乔木层生物量分布特征及其固碳能力研究. 植物研究, 34, 554–558.]
- Williams CA, Collatz GJ, Masek J, Goward SN (2012). Carbon consequences of forest disturbance and recovery across the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, 1005–1017.
- Xu B, Pan Y, Plante AF, Johnson A, Cole J, Birdsey R (2016). Decadal change of forest biomass carbon stocks and tree demography in the Delaware River Basin. *Forest Ecology and Management*, 374, 1–10.
- Yuan LM, Yan DR, Wang YQ, Jiang P, Liu Y (2015). Carbon storage of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 37, 9–13. (in Chinese with English abstract) [袁立敏, 闫德仁, 王熠青, 姜鹏, 刘阳 (2011). 沙地樟子松人工林碳储量研究. 内蒙古林业科技, 37, 9–13.]
- Zeng DH, Hu YL, Chang SX, Fan ZP (2000). Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy lands in Keerqin, northeastern China. *Plant and Soil*, 317, 121–133.
- Zeng DH, Jiang FQ, Fan ZP, Du XJ (2010). Self-thinning of even-aged pure plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 235–242. (in Chinese with English abstract) [曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 杜晓军 (2000). 沙地樟子松人工林自然稀疏规律. 生态学报, 20, 235–242.]
- Zeng DH, Jiang FQ, Fan ZP, Zhu JJ (1996). Stability of Mongolian pine plantations on sandy land. *Journal of Applied Ecology*, 7, 337–343. (in Chinese with English abstract) [曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 朱教君 (1996). 樟子松人工固沙林稳定性的研究. 应用生态学报, 7, 337–343.]
- Zhang JY, Zhao HL, Cui JY, Zhang TH, Zhao XY (2005). Community structure, soil water dynamics and community stability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Horqin Sandy Land. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(3), 1–6. (in Chinese with English abstract) [张继义, 赵哈林, 崔建垣, 张铜会, 赵学勇 (2005). 科尔沁沙地樟子松人工林

土壤水分动态的研究. 林业科学, 41(3), 1–6]

Zhang RS (2016). Growth and maturity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land. *Protection Forest Science and Technology*, (11), 45–47. (in Chinese with English abstract) [张日升 (2016). 沙地樟子松人工林的生长与成熟. 防护林科技, (11), 45–47.]

Zhao M (2004). *Carbon Storage Dynamics and Its Distribution Pattern in Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation in Sandy Land. PhD dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [赵敏 (2004). 中国主要森林生态系统碳储量和碳收支评估. 博士学位论文, 中国科学院植物研究

所, 北京.]

Zhu JJ, Fan ZP, Zeng DH, Jiang FQ, Matsuzaki T (2003) Comparison of stand structure and growth between artificial and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land. *Journal of Forestry Research*, 14, 103–111.

Zhu JJ, Li FQ, Xu ML, Kang HZ, Wu XY (2008). The role of ectomycorrhizal fungi in alleviating pine decline in semi-arid sandy soil of northern China: An experimental approach. *Annals of Forest Science*, 65, 1–12.

责任编辑: 周广胜 责任编辑: 王 葳

扫码向作者提问