

小兴安岭7种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力

胡海清¹ 罗碧珍¹ 魏书精^{1,2,3} 魏书威⁴ 孙 龙¹ 罗斯生¹ 马洪斌^{1*}

¹东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; ²桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西桂林 541004; ³广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西桂林 541004; ⁴兰州理工大学设计艺术学院, 兰州 730050

摘 要 森林生物碳储量作为森林生态系统碳库的重要组成部分, 在全球碳循环中发挥着重要作用。以小兴安岭7种典型林型为研究对象, 通过外业样地调查与室内实验分析相结合的方法, 从林分尺度对林分生物量与碳密度进行计量, 分析了林分生物碳储量的空间分配格局, 并对林分年固碳能力与碳汇潜力进行了探讨。结果表明: 小兴安岭不同林型从幼龄林到成熟林的乔木层碳密度增长速率为: 蒙古栎(*Quercus mongolica*)林>兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林>云冷杉(*Picea-Abies*)林>樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林>山杨(*Populus davidiana*)林>红松(*Pinus koraiensis*)林>白桦(*Betula platyphylla*)林。7种典型林型不同龄组(幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)林分生物量碳密度分别为: 红松林31.4、74.7、118.4和130.2 t·hm⁻²; 兴安落叶松林28.9、44.3、74.2和113.3 t·hm⁻²; 樟子松林22.8、52.0、71.1和92.6 t·hm⁻²; 云冷杉林23.1、44.1、77.6和130.3 t·hm⁻²; 白桦林18.8、35.3、66.6和88.5 t·hm⁻²; 蒙古栎林25.0、20.0、47.5和68.9 t·hm⁻²; 山杨林19.8、28.7、43.7和76.6 t·hm⁻²。红松林、兴安落叶松林、樟子松林和蒙古栎林在幼龄林时林分年固碳量较高, 其他林型在成熟林时林分年固碳量较高。7种典型林型不同龄组的林分生物量碳密度均随林龄增长而增加, 但不同林型的碳汇功能存在差异, 同一林型不同林龄的生物量碳密度增幅差异也较大。林分年固碳量在0.4–2.8 t·hm⁻²之间, 碳汇能力较强、碳汇潜力较大。尤其是小兴安岭目前林分质量较差, 幼龄林和中龄林所占的比重较大, 具有较大的碳汇潜力。研究结果可为森林经营管理及碳汇功能评价提供参考。

关键词 林分生物量, 碳密度, 固碳能力, 年固碳量, 碳汇管理路径, 小兴安岭

引用格式: 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. doi: 10.17521/cjpe.2015.0014

Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China

HU Hai-Qing¹, LUO Bi-Zhen¹, WEI Shu-Jing^{1,2,3}, WEI Shu-Wei⁴, SUN Long¹, LUO Si-Sheng¹, and MA Hong-Bin^{1*}

¹College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; ³Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin, Guangxi 541004, China; and ⁴College of Design Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract

Aims Forests are the world's largest carbon (C) pool and sink among the terrestrial ecosystems. The amount of C in vegetation plays an important role in the global C cycle and balance. Our objectives were to assess C density and sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, Heilongjiang Province, China and to understand the implication of the C sink to the regional C budget and future forest C management.

Methods Field surveys were combined with laboratory analysis and allometric equations for obtaining data for a variety of variables. Seven typical forest types in the Xiaoxing'an Mountains were studied based on age groups and plant functional groups (trees, shrubs, herbaceous and litter), including *Pinus koraiensis*, *Larix gmelinii*, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *Picea-Abies*, *Betula platyphylla*, *Quercus mongolica*, and *Populus davidiana* forests. Surveys were made on C density and annual carbon gains in trees, understory shrubs, herbaceous plants and litter for each forest type. The forest stands were classified into age groups for estimating the biomass and C density of the study area.

Important findings The C density of the seven forest types in different age groups varied widely. The C density per unit area for young, middle-aged, near mature and mature forests of each forest type were as follows: 31.4, 74.7, 118.4 and 130.2 t·hm⁻² in *Pinus koraiensis*; 28.9, 44.3, 74.2 and 113.3 t·hm⁻² in *L. gmelinii*; 22.8, 52.0, 71.1 and 92.6 t·hm⁻² in *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; 23.1, 44.1, 77.6 and 130.3 t·hm⁻² in *Picea-Abies*; 18.8, 35.3,

66.6 and 88.5 t·hm⁻² in *B. platyphylla*; 25.0, 20.0, 47.4 and 68.9 t·hm⁻² in *Q. mongolica*; and 19.8, 28.7, 43.7 and 76.6 t·hm⁻² in *Populus davidiana* forests, respectively. These results show that biomass C stocks in the Xiaoxing'an Mountains play an important role in the C cycle and regional C balance. Different forest types and stands of different age groups varied greatly in C stocks. Because most growth in the seven forest types occurs in the young and middle-aged forest stands, these age groups are considered to have a great potential to increase the biomass C density. This significant C sink will be further enhanced in the Xiaoxing'an Mountains with the development and restoration designed to provide specific ecological services including C sequestration.

Key words forest stand biomass, carbon density, carbon sequestration capacity, annual carbon sequestration, carbon sink management path, Xiaoxing'an Mountains

Citation: 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. doi: 10.17521/cjpe.2015.0014

全球变化是生态环境科学界研究的热点与前沿(王绍强等, 1999; IPCC, 2000, 2006), 尤其是大气中 CO₂ 浓度从工业革命前的 280 μmol·L⁻¹ 上升至 2011 年的 390 μmol·L⁻¹ (World Meteorological Organization, 2011; 胡海清等, 2013b), 大气中的 CO₂ 和 CH₄ 浓度分别比工业革命前高 35% 和 155% (Houghton *et al.*, 2010), 以气候变暖为主要特征的全球变化更是引起学术界的广泛关注(Adams & Piovesan, 2002)。森林生态系统是陆地生态系统的重要碳吸收汇, 特别是北半球中、高纬度地区的森林生态系统是重要的碳储库, 在全球碳平衡中发挥着重要的碳吸收汇功能(Houghton, 2005), 科学准确地计量森林生态系统碳密度及碳储量是评价森林碳汇潜力、评估森林在减缓大气 CO₂ 浓度上升、应对气候变化等方面功能的关键。

近年来, 国内外有关森林生态系统碳密度与碳储量的研究大量开展。美国、加拿大、俄罗斯等国许多学者对区域乃至全球的植被碳密度及森林碳循环进行了研究(Vloedbeld & Leemans, 1993; Foley, 1995; King *et al.*, 1995; FAO, 2010)。国内许多学者对我国森林植被的碳密度和碳储量进行了研究(方精云等, 1996; 王绍强等, 1999; 周玉荣等, 2000; 赵敏和周广胜, 2004; 徐新良等, 2007; 孙龙等, 2013)。王效科等(2001)发现全球森林植物碳储量为 359 Pg C, 平均碳密度 86 t·hm⁻²。Liu 等(2012)认为全球森林地上生物量碳容量约为 (586.2 ± 49.3) Pg C, 其中地上生物的固碳潜力为 313.4 Pg C。李海奎等(2011)认为我国森林植被碳储量是 7.81 Pg C。目前这些研究均是通过大尺度估算森林生态系统植被碳密度与碳储量, 然而, 森林生态系统具有显著的复杂性与多样性, 而且不同学者的研究方法存在差异, 因而不

同森林类型甚至同一种森林类型在不同气候等条件下, 植被的碳密度和碳储量差异较大(Kolchugina & Vinson, 1993; Kurz *et al.*, 1993; Tumer *et al.*, 1995)。因此, 大尺度的估算可能无法准确地计量中国植被的碳密度与碳储量, 为此本研究在林分尺度上分林型以及分龄组和组分进行研究, 精确计量森林生态系统的碳密度与碳储量。

小兴安岭是我国北温带针阔混交林区, 同时作为我国重要的生态功能区, 对我国东北平原乃至华北平原起着重要的生态屏障作用(胡海清等, 2013), 有关小兴安岭碳源碳汇的研究引起了政府和学者们的广泛关注, 但研究结果仍然存在不确定性, 主要是许多研究着眼于乔木层生物量的测定, 对灌木层、草本层和凋落物层的研究分散在不同的研究之中, 从林分水平上研究林分生物量碳密度的文献鲜有报道。同时, 有关林分生物量碳密度的研究中, 通过分龄组(幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)的研究来阐明林分随着林龄的增长而导致固碳水平变化规律的研究在国内较少报道。为此, 本文以黑龙江省小兴安岭 7 种典型林型森林生态系统为研究对象, 并在研究对象的林分尺度上, 系统研究各林型不同龄组对生物量以及由此引起的森林生物量碳密度及固碳能力的影响进行研究, 同时对 7 种林型不同龄组(幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)林分年固碳量进行计算, 通过林分尺度的研究, 旨在进一步定量计算森林生态系统的生物量碳密度, 并试图探讨影响森林生态系统碳密度变化的原因, 以期准确地计量森林林分生物量碳密度提供科学计量方法, 为森林生态系统生物碳储量的估算及碳汇造林树种的选择提供参考数据。研究结果可为森林生态系统抚育等森林经营管理及区域森林生态系统碳汇功能

评价提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黑龙江省小兴安岭林区地处我国东北部、黑龙江省中北部,是我国少有的原始阔叶红松林区(46.47°–49.35° N, 127.70°–130.23° E),西北与伊勒呼里山为邻,东南靠松花江畔,北部临俄罗斯。属于低山丘陵山地,海拔400–1 000 m,有林地面积 3.10×10^6 hm²,森林覆盖率达到80.60%,素有“红松故乡”的美誉。据伊春市气象局的资料,该区属于温带大陆性季风气候,近30年(1983–2012年)来,年平均气温为–0–2 °C,年降水量600–700 mm,降水时间分布不均匀,多集中于夏季。土壤类型主要以棕色针叶林土和暗棕壤为主。地带性植被属于北温带针阔混交林,以红松(*Pinus koraiensis*)林为主要地带性植被优势建群种。其他乔木树种主要有针叶乔木兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)等(红皮云杉与鱼鳞云杉、臭冷杉混生,构成我国东北重要的森林群落——云冷杉林(*Picea-Abies* forests))和阔叶乔木白桦(*Betula platyphylla*)、黑桦(*Betula dahurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄波罗(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*)等(胡海清等, 2013a)。

1.2 森林生物量调查

结合森林资源调查资料,根据林分生长状况、林相图、植被分布图、土壤类型分布图和黑龙江省小兴安岭行政区划图,选择小兴安岭典型林分分布区,在小兴安岭北部的五营林业局和小兴安岭南部的带岭林业局分别设置固定标准样地,并进行野外调查与样品的采集。五营林业局的采样时间为2013年6月和8月,带岭林业局的采样时间为2013年7月和9月。根据小兴安岭不同林型各林分分布的特点,选择有代表性的7种林型(红松林、兴安落叶松林、樟子松林、云冷杉林、白桦林、蒙古栎林和山杨林),根据《国家森林资源连续清查主要技术规定》的龄组划分方法划分为5种龄组(幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林),由于过

度开发,过熟林在小兴安岭地区较为少见,因此采样时没有对过熟林进行取样。小兴安岭7种主要林型树种龄组与龄组划分标准见表1,按照此划分标准设置标准样地,进行调查与采样。把各林型的不同组分(乔木、林下的灌木、草本、凋落物等)作为研究对象,采用随机布点法,在每种林型各龄组分别设置20 m × 20 m的3个重复样地作为固定标准样地。共设置固定标准样地336块(7种林型×3个重复×4龄组×4次)。

1.2.1 乔木层生物量调查

根据乔木分布特点和生长状况,在设置好的标准样地内,以5 cm为起测胸径(5 cm以下胸径的小树当作灌木进行测定),调查因子包括胸径(胸径尺测定)、树高(普鲁莱测高器(CGQ-1型直读式测高器,哈尔滨光学仪器厂,哈尔滨)测量)、树种、郁闭度、林龄、枝下高、冠幅和林分生长状况等,并分树种统计各径级的平均值,在每个固定标准样地内选取各径级的标准木3株(胡海清等, 2012a, 2012b)。主要采集乔木的干、枝、叶、皮和根,其中干和皮分别从树干基部、胸径和梢头3个部位进行取样,枝带皮从粗枝到小枝按比例取样,叶亦分别从不同部位取样,根带皮从粗根到小根按比例分别取样。采集的样品野外称鲜质量,并取样,标记好带回实验室进行实验测定及实验分析。

1.2.2 灌木层生物量调查

根据灌木分布的均匀程度沿标准样地的对角线设置小样方(每种林型每个龄组均有3个标准样地,每个标准样地亦有5个灌木样方,设置时沿标准样地的对角线设置5个小样方(胡海清等, 2012a),当分布较为均匀时设置2 m × 2 m重复样方5个,当分布不均匀时设置5 m × 5 m重复样方5个)。调查灌木层的盖度、株数和平均高度,各树种数量、地径、高度等,然后按灌木种类收割样方内的所有灌木(包括灌木的根),称量并取样。

1.2.3 草本层生物量调查

在设置好的标准样地内沿另一对角线设置1 m × 1 m的重复样方5个,调查草本层种类、盖度和平均高度,然后全部收割(包括草的根)称量并取样。

1.2.4 凋落物层生物量调查

在标准样地内按对角线选取1 m × 1 m的样方5个,分别收集小样方内的凋落物(枯枝和落叶、针叶和阔叶分开),记录其鲜质量并取样。

表1 小兴安岭7种主要林型树种龄级与龄组划分表

Table 1 Category of age groups of seven main forest types in the Xiaoxing'an Mountains

林型 Forest type	龄组划分 Age group			
	幼龄林 Young forest (a)	中龄林 Middle forest (a)	近熟林 Premature forest (a)	成熟林 Mature forest (a)
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	≤60	61–100	101–120	120–160
兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	≤40	41–80	81–100	101–140
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	≤40	41–80	81–100	101–140
云冷杉林 <i>Picea-Abies</i> forest	≤60	61–100	101–120	120–160
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	≤30	31–50	51–60	61–80
蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest	≤40	41–60	61–80	81–120
山杨林 <i>Populus davidiana</i> forest	≤10	11–15	16–20	21–30

1.3 林分生物量碳密度的计算方法

假设森林生物量碳密度用 C_t 表示, 森林生物量用 M 表示; 森林生物量的含碳率用 f_c 表示, 森林生物量碳密度的计算公式可以表示为:

$$C_t = M \times f_c \quad (1)$$

1.4 林分年固碳量的计算方法

某种林型林分净初级生产力可用现存各龄级标准木连年生长量估算, 亦可通过现存各龄级林分生物量数据推算生物生产量, 根据各林型林分净初级生产力, 换算年固碳量。本文假设林分年固碳量用 C_a ($t \cdot hm^{-2}$)表示, 现有林分碳密度(林分单位面积的碳储量)用 C_d 表示; 林分年龄用 N 表示, 林分年固碳量的计算公式可以表示为:

$$C_a = C_d / N \quad (2)$$

1.5 测定计量方法

1.5.1 乔木层生物量的测定

乔木生物量的估测一般用相对生长法(Huxley, 1932), 根据林木生长过程中各生长系之间有协调增长的规律, 提出“异速生长”关系法则, 亦称相对关系法则, 其相对生长关系可用公式(Blackstone, 1987; 胡海清等, 2012a)表示为:

$$Y = a(D^2 H)^b \quad (3)$$

式中: Y 表示生物量, D 表示胸径, H 表示树高, a 、 b 为回归所得的常数。

异速生长法则的核心思想是建立生物量与主要测树因子(即胸径、树高)的关系来计量乔木层生物量。根据实验测定结果重新拟合黑龙江省小兴安岭7种典型树种的生物量回归方程(表2), 并对模拟的模型进行检验, 经检验, 方程拟合效果良好。然后根据拟合好的生物量回归方程, 把采样得到的 D 、 H 代入方程(3), 根据 D 、 H 的实测结果计算各树种各部位的

生物量, 根据各树种林龄等因子估算单位面积乔木生物量, 并依据调查样地的单位面积生物量外推到林分水平, 林分水平的生物量计算公式如下:

$$Y_f = Y_t + Y_s + Y_h + Y_l \quad (4)$$

式中: Y_f 表示林分总生物量, Y_t 表示乔木层生物量, Y_s 表示灌木层生物量, Y_h 表示草本层生物量, Y_l 表示凋落物层生物量。

1.5.2 灌木层生物量的测定

灌木层生物量的测定方法, 主要通过计算含水率的方法推算单位面积内的生物量。把通过收割法采集得到的灌木样品带回到实验室, 经85℃恒温烘干至恒重(间隔6 h两次称量所得的含水率差小于0.1%即被视为达到恒重), 用精度0.01 g的电子天平称干质量, 用公式(4)计算出样品不同器官的含水率(P), 并通过含水率的方法换算出不同器官的生物量, 不同器官的生物量相加便可计算出单位面积的生物量。灌木层生物量含水率的计算公式可表示为:

$$P = (\text{湿重} - \text{干重}) / \text{干重} \times 100\% \quad (5)$$

1.5.3 草本层生物量的测定

草本层生物量的测定方法与1.5.2节中灌木层生物量的测定方法相同。

1.5.4 凋落物层生物量的测定

凋落物层生物量的测定方法与1.5.2节中灌木层生物量的测定方法相同。

1.5.5 森林生物量含碳率的测定

对于森林生物碳储量的计量, 一般用直接或间接方法测定植被生物量的现存量再乘以生物量的含碳率进行推算(Blackstone, 1987; 胡海清等, 2012b, 2012d), 本文通过直接测定生物量中含碳率的方法计算森林生物碳储量(胡海清等, 2012c)。通过对以上各生物量的实验样品进行3次粉碎法制样, 样品

表2 小兴安岭7种林型乔木层生物量回归方程 $Y = a (D^2H)^b$ 与决定系数
Table 2 Values for fitting biomass regression equation $Y = a (D^2H)^b$ and coefficient of determination for seven forest types in the Xiaoxing'an Mountains

林型 Forest type	组分 Component	<i>a</i>	<i>b</i>	决定系数 Coefficient of determination (<i>R</i> ²)	样本数 No. of samples (<i>N</i>)
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	干 Trunk	0.046 65	0.902 37	0.97	30
	枝 Branch	0.031 23	0.612 48	0.99	30
	叶 Leaf	0.012 35	0.643 47	0.95	30
	皮 Bark	0.029 57	0.564 89	0.90	30
	根 Root	0.009 25	0.739 65	0.96	30
兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	干 Trunk	0.013 02	1.021 54	0.99	30
	枝 Branch	0.001 29	1.039 98	0.92	30
	叶 Leaf	0.011 12	0.637 45	0.95	30
	皮 Bark	0.031 27	0.615 24	0.97	30
	根 Root	0.041 25	0.684 51	0.99	30
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	干 Trunk	0.051 41	0.862 14	0.94	30
	枝 Branch	0.014 63	0.724 58	0.97	30
	叶 Leaf	0.021 24	0.524 78	0.91	30
	皮 Bark	0.057 81	0.442 87	0.92	30
	根 Root	0.026 31	0.686 56	0.95	30
云冷杉林 <i>Picea-Abies</i> forest	干 Trunk	0.322 91	0.679 19	0.97	30
	枝 Branch	0.022 57	0.635 64	0.90	30
	叶 Leaf	0.004 18	0.821 35	0.92	30
	皮 Bark	0.024 21	0.572 15	0.94	30
	根 Root	0.011 54	0.812 34	0.94	30
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	干 Trunk	0.011 75	1.102 52	0.97	30
	枝 Branch	0.010 24	0.805 47	0.97	30
	叶 Leaf	0.013 47	0.649 47	0.90	30
	皮 Bark	0.024 69	0.631 01	0.92	30
	根 Root	0.048 87	0.632 46	0.96	30
蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest	干 Trunk	0.011 97	1.092 48	0.91	30
	枝 Branch	0.008 45	0.894 18	0.90	30
	叶 Leaf	0.006 24	0.828 54	0.91	30
	皮 Bark	0.008 72	0.817 59	0.92	30
	根 Root	0.010 54	0.835 38	0.93	30
山杨林 <i>Populus davidiana</i> forest	干 Trunk	0.235 14	0.853 24	0.93	30
	枝 Branch	0.021 54	0.862 15	0.98	30
	叶 Leaf	0.009 79	0.856 14	0.96	30
	皮 Bark	0.052 23	0.632 17	0.97	30
	根 Root	0.125 87	0.558 74	0.98	30

含碳率的测定采用干烧法。用MultiN/C3000分析仪 (Multi N/C3000, Analytik Jena AG, Jena, Germany)联用HT1500固体模块测定含碳率, 每次测3个平行样, 对测定结果取平均值作为一个样本数, 测量精度为0.01%, 误差为±0.2%。用公式(样品含碳率=样品碳含量/样品干重×100%)计算样品的含碳率。

2 结果和分析

2.1 林分单位面积生物量

林分单位面积生物量主要包括乔木(干、枝、叶、皮和根)、灌木(包括根)、草本(包括根)和凋落物。通过森林生物量的调查得到各龄组不同组分的样本

数,对测定结果进行统计分析,不同林型各组分生物量的测定结果在以下各部分分别进行阐述。

2.1.1 乔木层的胸径与树高

根据乔木每木检尺调查,小兴安岭7种林型各组分每木调查的基础数据见表3。从表3可看出,在小兴安岭7种林型的不同龄组中,平均胸径从大到小的基本排列顺序为:红松林>樟子松林>兴安落叶松林>云冷杉林>白桦林>蒙古栎林>山杨林,其中在幼龄林时平均胸径最小的山杨林仅为5.47 cm,其次是云冷杉林,为7.26 cm,平均胸径最大的红松林达到11.94 cm。在中龄林时平均胸径最小的山杨林只有6.79 cm,平均胸径最大的红松林达到17.66 cm。在近熟林时平均胸径最小的山杨林仅有8.73 cm,平均胸径最大的红松林达到20.48 cm。在成熟

林时平均胸径最小的是白桦林和山杨林,平均胸径最大的云冷杉林达到21.54 cm。总体而言,相同龄组中针叶树种的平均胸径大于阔叶树种的平均胸径。

平均树高从大到小的顺序依次为:红松林>云冷杉林>兴安落叶松林>樟子松林>白桦林>蒙古栎林>山杨林。其中在幼龄林时平均树高最小的是山杨林,仅为5.56 m。其次是蒙古栎林,为5.87 m,平均树高最大的是白桦林,达到10.31 m。在中龄林时平均树高最小的是蒙古栎林,仅为7.15 m,平均树高最大的是红松林,达到16.54 m,其次是樟子松林,达到15.38 m。在近熟林时平均树高最小的是山杨林,仅为9.25 m,平均树高最大的是红松林,达到21.62 m,其次是兴安落叶松林,为17.59 m。在成熟林时平均树高最小的是山杨林,只有10.76 m,平均树高最大

表3 小兴安岭7种林型各组分基础数据调查统计表(平均值±标准偏差)

Table 3 Survey statistics on basic data for seven forest types in the Xiaoxing'an Mountains (mean ± SD)

林型 Forest type	龄组 Age group	平均林龄 Average forest age (a)	平均胸径 Average diameter at breast height (cm)	平均树高 Average tree height (m)
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	幼龄林 Young forest	24.23 ± 2.21	11.94 ± 1.34	9.95 ± 0.97
	中龄林 Middle-aged forest	68.54 ± 7.24	17.66 ± 2.45	16.54 ± 3.74
	近熟林 Near mature forest	109.19 ± 3.26	20.48 ± 2.18	21.62 ± 5.86
	成熟林 Mature forest	123.50 ± 12.34	21.31 ± 5.67	22.46 ± 4.59
兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	幼龄林 Young forest	21.66 ± 1.78	9.46 ± 1.15	9.44 ± 0.91
	中龄林 Middle-aged forest	63.78 ± 10.51	13.51 ± 2.30	12.13 ± 3.48
	近熟林 Near mature forest	84.50 ± 2.96	17.12 ± 6.47	17.59 ± 3.17
	成熟林 Mature forest	135.47 ± 7.28	21.04 ± 6.19	20.27 ± 5.89
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	幼龄林 Young forest	25.48 ± 3.12	9.11 ± 1.62	8.83 ± 1.45
	中龄林 Middle-aged forest	62.53 ± 8.84	16.77 ± 3.57	15.38 ± 2.84
	近熟林 Near mature forest	89.18 ± 4.16	18.91 ± 3.66	17.01 ± 7.11
	成熟林 Mature forest	122.45 ± 10.47	21.31 ± 6.41	19.44 ± 6.97
云冷杉林 <i>Picea-Abies</i> forest	幼龄林 Young forest	29.60 ± 4.15	7.26 ± 1.01	9.77 ± 1.22
	中龄林 Middle-aged forest	68.00 ± 6.74	11.89 ± 1.34	13.03 ± 1.42
	近熟林 Near mature forest	111.97 ± 3.48	16.57 ± 3.59	16.02 ± 3.47
	成熟林 Mature forest	135.46 ± 15.42	21.54 ± 2.49	22.75 ± 5.64
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	幼龄林 Young forest	19.73 ± 3.15	9.55 ± 1.32	10.31 ± 1.46
	中龄林 Middle-aged forest	42.93 ± 5.85	11.63 ± 2.64	13.59 ± 3.69
	近熟林 Near mature forest	56.27 ± 1.42	14.99 ± 4.59	15.03 ± 3.67
	成熟林 Mature forest	74.81 ± 3.00	16.29 ± 5.67	18.04 ± 6.68
蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest	幼龄林 Young forest	23.87 ± 4.25	7.53 ± 0.98	5.87 ± 0.89
	中龄林 Middle-aged forest	48.00 ± 3.33	11.30 ± 1.28	7.15 ± 0.78
	近熟林 Near mature forest	66.59 ± 4.49	14.72 ± 1.94	12.38 ± 2.00
	成熟林 Mature forest	101.42 ± 10.29	17.03 ± 2.37	13.43 ± 2.79
山杨林 <i>Populus davidiana</i> forest	幼龄林 Young forest	8.64 ± 0.54	5.47 ± 0.24	5.56 ± 0.51
	中龄林 Middle-aged forest	13.75 ± 0.48	6.79 ± 0.84	7.84 ± 0.36
	近熟林 Near mature forest	19.53 ± 0.89	8.73 ± 0.74	9.25 ± 0.49
	成熟林 Mature forest	27.61 ± 1.12	11.39 ± 1.37	10.76 ± 0.87

的是云冷杉林, 达22.75 m。总体而言, 相同龄组中, 针叶树种的平均树高>阔叶树种的平均树高。

2.1.2 乔木层单位面积生物量

各林型单位面积乔木层生物量总体上由大到小的排列顺序为: 红松林>云冷杉林>白桦林>兴安落叶松林>樟子松林>山杨林>蒙古栎林(表4)。其中, 在幼龄林时乔木生物量最小的是蒙古栎林, 仅为 $11.46 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其次是兴安落叶松林, 为 $21.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 乔木生物量最大的是红松林, 达到 $40.33 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在中龄林时乔木生物量最小的是蒙古栎林, 只有 $31.48 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 乔木生物量最大的是红松林, 达到 $122.19 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在近熟林时乔木生物量最小的是山杨林, 仅有 $80.36 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 乔木生物量最大的是红松林, 达到 $199.32 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在成熟林时乔木生物量最小的是蒙古栎林和山杨林, 乔木生物量最大的是红松林, 达到 $220.79 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

小兴安岭7种林型乔木层生物量均随着林龄的增长而增加, 但各林型乔木层生物量的生长过程出现消长情况。从林型不同龄组看, 蒙古栎林和兴安落叶松林两种林分的增长速度较快, 蒙古栎林的乔木生物量从幼龄林的 $11.46 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $137.80 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增长到12.02倍; 兴安落叶松林的乔木生物量从幼龄林的 $21.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $191.88 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增长到9.10倍。增长较慢的是白桦林和红松林, 白桦林在幼龄林时已达到 $31.55 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但是成熟林时其生物量仅为 $162.40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 只增长到5.15倍。从林型的各龄组进行分析发现, 蒙古栎林的乔木层生物量在幼龄林为 $11.46 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、中龄林为 $31.48 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和成熟林为 $137.80 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时均为最低, 但其增长速度最快。红松林在各个龄组中生物量均较高。山杨林的乔木层生物量在幼龄林为 $24.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时较高, 但近熟林和成熟林时较低。兴安落叶松林在幼龄林时为 $21.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在成熟林时达到 $191.88 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。白桦林在幼龄林时生物量最高, 为 $31.55 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但在成熟林时生物量表现为较低, 仅有 $162.40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。森林乔木层生物量随着林龄的增长呈不断增加的趋势, 然而各林型乔木层生物量的增长速度并不相同, 在不同的龄组中出现消长的情况, 但总体上是随着林龄的增长其乔木层生物量不断增加。因此在估测计量森林乔木生物量时, 一定要充分考虑林龄因子对生物量的决定性影响, 不能采用某一龄组的林分生物量来替代在不同生长阶段的生

物量。

2.1.3 灌木层单位面积生物量

各林型单位面积灌木层生物量总体上由大到小的排列顺序为: 红松林>兴安落叶松林>山杨林>白桦林>樟子松林>云冷杉林>蒙古栎林(表4)。单位面积灌木层生物量排列顺序与乔木层生物量的排列顺序并不相同, 云冷杉林和樟子松林的乔木层生物量相对较大, 但其灌木层生物量较小, 白桦林和山杨林的乔木层生物量相对较小, 但其灌木层生物量较大, 而蒙古栎林不论乔木层还是灌木层生物量均低于其他6种林型, 而红松林不论乔木层还是灌木层生物量均高于其他6种林型。这主要是因为气候类型、立地类型、树种构成以及人为干扰等因素的影响, 导致单位面积灌木层生物量相差较大。

小兴安岭7种林型中有4种林型(云冷杉林、红松林、樟子松林、山杨林)灌木层生物量的变化速率呈现消长情况, 兴安落叶松林和蒙古栎林灌木层生物量随着林龄的增长而呈减少的趋势, 而白桦林灌木层生物量随着林龄的增长而呈增加的趋势。从不同龄组看, 幼龄林灌木层生物量中兴安落叶松林的生物量最大, 达到 $18.66 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 生物量最小的是白桦林, 仅为 $2.45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 中龄林灌木层生物量中红松林的生物量最大, 达到 $12.34 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 生物量最小的是樟子松林, 仅为 $4.37 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 近熟林灌木层生物量中红松林的生物量最大, 达到 $15.24 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 生物量最小的是蒙古栎林, 仅为 $2.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 成熟林灌木层生物量中白桦林的生物量最大, 达到 $12.61 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 生物量最小的是蒙古栎林, 仅为 $1.37 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各林型灌木层生物量随着林龄的增长出现较大波动, 与各林型乔木层生物量的变化规律不同, 灌木层生物量并不随着林龄的增长呈现不断增加的趋势。兴安落叶松林的灌木层生物量从幼龄林的 $18.66 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下降到成熟林的 $2.27 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。蒙古栎林的灌木层生物量从幼龄林的 $8.17 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下降到成熟林的 $1.37 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。樟子松林和山杨林的灌木层生物量均呈下降的趋势, 但中间有波动。红松林在中龄林时, 灌木层单位面积生物量反而上升到 $12.34 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但在近熟林时, 灌木层生物量下降到 $8.24 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此, 在估测森林灌木层生物量时, 一定不要忽略林龄因子对森林灌木层生物量的影响。

表4 小兴安岭7种林型各龄组林分生物量(平均值±标准偏差, t·hm⁻²)
Table 4 Biomass for different stand age groups of seven forest types in Xiaoxing'an Mountains (mean ± SD, t·hm⁻²)

林型 Forest type	龄组 Age group	乔木层 Tree					灌木层 Shrub layer	草本层 Herbaceous layer	凋落物层 Litter layer	林分生物量 Stand biomass
		干 Trunk	枝 Branch	叶 Leaf	皮 Bark	根 Root				
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	幼龄林 Young forest	32.58 ± 3.27	2.66 ± 0.24	1.32 ± 0.21	1.78 ± 0.45	1.98 ± 0.42	10.57 ± 2.16	3.24 ± 0.68	8.99 ± 2.03	63.13 ± 4.26
	中龄林 Middle-aged forest	104.45 ± 11.49	5.87 ± 1.03	3.02 ± 0.57	3.70 ± 0.89	5.15 ± 0.67	12.34 ± 1.85	4.57 ± 0.94	9.54 ± 1.18	148.64 ± 15.68
	近熟林 Near mature forest	173.78 ± 22.37	8.29 ± 1.55	4.35 ± 1.34	5.09 ± 1.32	7.82 ± 1.23	15.24 ± 1.97	5.21 ± 0.86	10.55 ± 1.69	230.32 ± 28.56
	成熟林 Mature forest	193.23 ± 19.57	8.91 ± 1.33	4.69 ± 0.76	5.44 ± 1.42	8.53 ± 1.67	8.24 ± 1.59	5.57 ± 0.74	18.57 ± 2.87	253.17 ± 22.43
兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	幼龄林 Young forest	12.72 ± 1.69	1.43 ± 0.17	0.82 ± 0.37	1.98 ± 0.34	4.16 ± 0.86	18.66 ± 4.19	7.59 ± 1.47	10.21 ± 2.46	57.55 ± 2.85
	中龄林 Middle-aged forest	34.03 ± 4.58	3.89 ± 0.78	1.51 ± 0.56	3.37 ± 0.86	8.04 ± 1.27	9.58 ± 1.51	11.28 ± 1.39	14.59 ± 3.45	86.49 ± 6.97
	近熟林 Near mature forest	80.70 ± 16.74	9.36 ± 1.67	2.59 ± 0.34	6.01 ± 1.26	14.34 ± 2.19	4.24 ± 0.24	8.84 ± 1.75	15.37 ± 3.31	141.44 ± 20.17
	成熟林 Mature forest	142.14 ± 25.67	16.66 ± 3.49	3.68 ± 0.81	8.46 ± 1.78	20.95 ± 2.87	2.27 ± 0.15	3.21 ± 0.67	16.19 ± 3.60	213.55 ± 27.59
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	幼龄林 Young forest	15.17 ± 2.10	1.74 ± 0.24	0.68 ± 0.18	1.07 ± 0.24	2.44 ± 0.37	10.21 ± 1.51	12.67 ± 2.46	3.27 ± 0.59	47.25 ± 2.85
	中龄林 Middle-aged forest	70.11 ± 16.98	6.31 ± 0.97	1.72 ± 0.34	2.36 ± 0.57	8.25 ± 1.28	4.37 ± 0.64	7.97 ± 1.10	5.16 ± 1.00	106.25 ± 19.45
	近熟林 Near mature forest	94.07 ± 13.56	8.07 ± 1.74	2.06 ± 0.38	2.74 ± 0.45	10.43 ± 2.19	7.67 ± 1.27	7.78 ± 1.19	10.27 ± 1.59	143.09 ± 16.51
	成熟林 Mature forest	129.70 ± 19.99	10.58 ± 2.18	2.50 ± 0.51	3.23 ± 0.67	13.46 ± 2.26	6.63 ± 1.67	6.97 ± 0.98	11.94 ± 2.45	185.01 ± 23.34
云杉林 <i>Picea-Abies</i> forest	幼龄林 Young forest	22.43 ± 1.57	1.19 ± 0.28	0.71 ± 0.24	0.86 ± 0.10	1.84 ± 0.26	6.57 ± 1.66	0.41 ± 0.08	11.54 ± 2.16	45.56 ± 2.01
	中龄林 Middle-aged forest	53.31 ± 9.85	2.69 ± 0.31	2.01 ± 0.39	1.79 ± 0.38	5.18 ± 1.01	5.17 ± 1.28	0.23 ± 0.03	15.57 ± 2.85	85.95 ± 12.32
	近熟林 Near mature forest	96.29 ± 10.23	4.67 ± 0.86	4.11 ± 0.85	2.94 ± 0.96	10.52 ± 2.27	9.47 ± 2.94	2.54 ± 0.34	18.37 ± 2.64	148.9 ± 11.25
	成熟林 Mature forest	174.50 ± 30.42	8.15 ± 1.37	8.43 ± 0.64	4.85 ± 1.06	21.41 ± 3.48	3.66 ± 0.31	2.37 ± 0.45	24.27 ± 3.88	247.64 ± 2.37
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	幼龄林 Young forest	22.29 ± 1.46	2.54 ± 0.89	1.15 ± 0.17	1.86 ± 0.57	3.71 ± 0.46	2.45 ± 0.41	5.38 ± 0.76	1.69 ± 0.21	41.07 ± 2.37
	中龄林 Middle-aged forest	46.67 ± 7.56	4.36 ± 0.97	1.78 ± 0.29	2.83 ± 0.45	5.67 ± 1.03	4.67 ± 1.21	6.87 ± 1.27	3.47 ± 0.79	76.33 ± 9.45
	近熟林 Near mature forest	91.27 ± 11.39	7.12 ± 1.46	2.64 ± 0.64	4.16 ± 0.67	8.33 ± 2.18	10.11 ± 2.16	9.57 ± 1.61	9.29 ± 1.64	142.49 ± 14.00
	成熟林 Mature forest	134.09 ± 16.96	9.43 ± 2.01	3.31 ± 0.54	5.18 ± 1.56	10.39 ± 0.29	12.61 ± 2.57	2.14 ± 0.53	10.57 ± 1.57	187.72 ± 19.56
蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest	幼龄林 Young forest	6.82 ± 0.75	1.52 ± 0.34	0.77 ± 0.13	1.01 ± 0.18	1.35 ± 0.27	8.17 ± 1.89	19.33 ± 3.59	15.78 ± 3.59	54.74 ± 11.52
	中龄林 Middle-aged forest	20.53 ± 2.14	3.75 ± 0.84	1.77 ± 0.49	2.30 ± 0.41	3.13 ± 0.26	7.64 ± 1.67	0.58 ± 0.09	2.67 ± 0.44	42.37 ± 5.16
	近熟林 Near mature forest	66.63 ± 16.48	9.83 ± 1.29	4.32 ± 1.04	5.54 ± 0.86	7.71 ± 1.08	2.54 ± 0.49	0.47 ± 0.06	1.33 ± 0.22	98.38 ± 18.23
	成熟林 Mature forest	100.15 ± 17.56	13.72 ± 2.18	5.89 ± 1.15	7.52 ± 1.34	10.53 ± 2.19	1.37 ± 0.35	0.51 ± 0.05	1.64 ± 0.34	141.32 ± 24.56
山杨林 <i>Populus davidiana</i> forest	幼龄林 Young forest	18.47 ± 1.75	1.77 ± 0.19	0.78 ± 0.13	1.32 ± 0.25	2.19 ± 0.52	10.21 ± 2.57	8.28 ± 2.11	1.14 ± 0.12	44.17 ± 2.31
	中龄林 Middle-aged forest	35.81 ± 5.14	3.46 ± 0.61	1.52 ± 0.27	2.16 ± 0.37	3.38 ± 0.49	8.46 ± 1.84	5.37 ± 1.35	3.47 ± 0.68	63.63 ± 6.87
	近熟林 Near mature forest	63.32 ± 8.79	6.15 ± 0.91	2.69 ± 0.61	3.30 ± 0.86	4.91 ± 0.84	4.96 ± 0.78	6.57 ± 1.64	4.75 ± 0.93	96.64 ± 10.34
	成熟林 Mature forest	113.41 ± 16.34	11.08 ± 1.93	4.82 ± 0.49	5.08 ± 1.24	7.20 ± 1.42	9.34 ± 2.47	8.39 ± 2.02	6.34 ± 1.24	165.66 ± 19.46

2.1.4 草本层单位面积生物量

各林型单位面积草本层生物量总体上由大到小的排列顺序为：樟子松林>兴安落叶松林>山杨林>白桦林>蒙古栎林>红松林>云冷杉林(表4)。单位面积草本层生物量排列顺序与乔木层生物量以及灌木层的排列顺序并不相同，一般而言，乔木层和灌木层的生物量较大，由于乔木层与灌木层的遮阴效应，草本较少，因而导致单位面积草本层生物量较小。红松林、白桦林乔木层和灌木层生物量相对较大，其草本层生物量较小；云冷杉林的乔木层生物量相对较大，其草本层生物量相对较小。乔木层的生物量较小，草本层的生物量较大。兴安落叶松林是明亮针叶林，其乔木层和灌木层的遮阴效应并不明显，因而虽然乔木层和灌木层生物量相对较大，但其草本层生物量仍然较大。山杨林、樟子松林乔木层生物量相对较小，其草本层生物量却相对较大。蒙古栎林不论乔木层还是灌木层，生物量均低于其他林型，但其草本层生物量高于红松林和云冷杉林。这主要是因为气候类型、立地类型、林分结构、树种构成以及人为干扰等因子的影响，导致单位面积草本层生物量相差较大。

从不同龄组看，蒙古栎林草本层单位面积生物量从幼龄林的 $19.33 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下降到近熟林的 $0.47 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，缩小到原来的2.43%。樟子松林草本层单位面积生物量从幼龄林的 $12.67 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下降到近熟林的 $6.97 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，缩小到原来的55.01%。而云冷杉林草本层单位面积生物量从幼龄林的 $0.41 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上升到成熟林的 $2.37 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，增加了5.78倍。同时红松林草本层单位面积生物量从幼龄林的 $3.24 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上升到成熟林的 $5.57 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，增加了1.72倍。幼龄林中单位面积草本层生物量，蒙古栎林中的最大，达到 $19.33 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，生物量最小的是云冷杉林，仅为 $0.41 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，两者相差 $18.92 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；中龄林单位面积草本层生物量兴安落叶松林的最大，达到 $11.28 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，最小的是云冷杉林，仅为 $0.23 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；近熟林单位面积草本层生物量白桦林的最大，达到 $9.57 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，最小的是蒙古栎林，仅为 $0.47 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；成熟林单位面积草本层生物量山杨林的最大，达到 $8.39 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，最小的是蒙古栎林，仅为 $0.51 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各林型草本层生物量随着林龄的增长，不同林型草本层生物量变化与各林型乔木层生物量的变化规律相反，单位面积草本层生物量总体上呈不断下降的趋势，但红松林和云冷杉

林却呈不断上升的趋势。研究发现草本层生物量的消长与林型的郁闭度变化密切相关，在幼龄林时，乔木层的郁闭度较低，随着林龄的增长，郁闭度提高，在成熟林时其郁闭度下降，从而影响了单位面积草本层生物量。

2.1.5 凋落物层单位面积生物量

各林型单位面积凋落物层生物量总体上由大到小的排列顺序为：云冷杉林>兴安落叶松林>红松林>樟子松林>白桦林>蒙古栎林>山杨林(表4)。单位面积凋落物层生物量排列顺序与乔木层生物量、灌木层生物量以及草本层生物量的排列顺序均不相同，一般而言，林分随着林龄的增加，尤其是伴随着乔木层或灌木层的生物量增大，凋落物层的来源不断丰富，因而导致凋落物层随着林龄的增长生物量呈增加的趋势，然而蒙古栎林凋落物层生物量却随着林龄的增加呈减少的趋势，这是由蒙古栎林特殊的林分条件决定的，导致凋落物变化的原因还有林分特征、气候类型、立地类型、树种构成以及人为干扰等因子的影响，从而造成较大的异质性和复杂性，进而造成单位面积生物量变化规律的差异。

从不同龄组看，幼龄林单位面积凋落物生物量蒙古栎林的最大，达到 $15.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，最小的是山杨林，仅为 $1.14 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；中龄林单位面积凋落物生物量云冷杉林的最大，达到 $15.57 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，最小的是蒙古栎林，仅为 $2.67 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；近熟林单位面积凋落物生物量云冷杉林的生物量最大，达到 $18.37 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，最小的是蒙古栎林，仅为 $1.33 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；成熟林单位面积凋落物生物量云冷杉林的最大，达到 $24.27 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，最小的是蒙古栎林，仅为 $1.64 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中白桦林单位面积凋落物层生物量从幼龄林的 $1.69 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $10.57 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，增加到原来的6.25倍。山杨林单位面积凋落物层生物量从幼龄林的 $1.14 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $6.34 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，增加到原来的5.56倍。而针叶林樟子松林单位面积凋落物层生物量从幼龄林的 $3.27 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $11.94 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，增幅较为平缓。然而阔叶林蒙古栎林单位面积凋落物层生物量从幼龄林到成熟林不但未增加，反而下降，蒙古栎林的单位面积凋落物层生物量从幼龄林的 $15.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 减少到成熟林的 $1.64 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

从以上各林型不同龄组生物量的变化趋势可知，一般林型单位面积凋落物层生物量均随着林龄的增长而增加，而蒙古栎林的单位面积凋落物层生

物量则随着林龄的增长而减少。由于小兴安岭地处北温带针阔混交林区, 气候寒冷干燥, 凋落物较难分解腐殖化, 因而单位面积凋落物层生物量积累较多, 尤其是针叶林(云冷杉林、兴安落叶松林、红松林和樟子松林)在气候寒冷干燥的条件下更难分解, 从而导致随着林龄的增长其凋落物生物量增长较快。

2.1.6 各林型林分单位面积生物量

总体上看, 各林型单位面积生物量由大到小的排列顺序为: 红松林>云冷杉林>兴安落叶松林>樟子松林>白桦林>山杨林>蒙古栎林(表4)。各林型之间单位面积生物量差异显著($p < 0.05$)。红松林不同龄组中幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单位面积生物量分别为 63.13、148.64、230.32 和 253.17 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到成熟林增长了 4.01 倍; 云冷杉林不同龄组中幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单位面积生物量分别为 45.56、85.95、148.90 和 247.64 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到成熟林增长较快达到了 5.44 倍; 兴安落叶松林不同龄组中幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单位面积生物量分别为 57.55、86.49、141.44 和 213.55 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到成熟林增长了 3.71 倍; 白桦林不同龄组幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单位面积生物量分别为 41.07、76.33、142.49 和 187.72 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到成熟林增长了 4.57 倍; 樟子松林不同龄组中幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单位面积生物量分别为 47.25、106.25、143.09 和 185.01 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到成熟林增长了 3.92 倍; 蒙古栎林不同龄组中幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单位面积生物量分别为 54.74、42.37、98.38 和 141.32 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到成熟林只增长了 2.58 倍, 增长较慢; 山杨林不同龄组中幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的单位面积生物量分别为 44.17、63.63、96.64 和 165.66 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到成熟林增长了 3.75 倍。

从不同林型的龄组上进行分析, 在幼龄林中单位面积生物量由大到小的排列顺序为: 红松林>兴安落叶松林>蒙古栎林>樟子松林>云冷杉林>山杨林>白桦林; 在中龄林中单位面积生物量由大到小的排列顺序为: 红松林>樟子松林>兴安落叶松林>云冷杉林>白桦林>山杨林>蒙古栎林; 在近熟林中单位面积生物量由大到小的排列顺序为: 红松林>云冷杉林>樟子松林>白桦林>兴安落叶松林>蒙古

栎林>山杨林; 在成熟林中单位面积生物量由大到小的排列顺序为: 红松林>云冷杉林>兴安落叶松林>白桦林>樟子松林>山杨林>蒙古栎林。总体上看, 7 种林型单位面积生物量均随着林龄的增长而增加, 但各林型的增长速度不同。其中云冷杉林的增长速度最快, 白桦林各龄组的单位面积生物量虽然相对较少, 但增长速度较快, 从幼龄林的 41.07 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 187.72 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增加到原来的 4.57 倍; 蒙古栎林虽然在幼龄林时单位面积生物量达到 54.74 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但直到成熟林时仅为 141.32 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 只增加到原来的 2.58 倍, 增长速率较慢; 山杨林从幼龄林单位面积生物量的 44.17 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 165.66 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 仅增加到原来的 3.75 倍, 该林型在不同龄组的单位面积生物量相对较少。从以上分析可知, 作为小兴安岭地带性植被的优势树种红松所构成的红松林, 成熟林时林分单位面积生物量最高达到 253.17 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。红松林不同龄组中的单位面积生物量均高于其他林型, 充分体现了红松在小兴安岭的地带性植被特征。

2.2 不同林型生物量含碳率

红松林乔木层各组分的含碳率在 48.57%—51.87% 之间变化(表5)。其中树干的含碳率相对较高, 叶的含碳率最低, 各组分含碳率由高到低依次为干>枝>根>皮>叶。兴安落叶松林乔木层各组分的含碳率在 48.76%—53.81% 之间变化。其中树干的含碳率相对较高, 叶的含碳率最低, 各组分含碳率由高到低依次为干>枝>根>皮>叶。樟子松林乔木层各组分的含碳率在 48.11%—50.79% 之间变化。其中树干的含碳率相对较高, 叶的含碳率最低, 各组分含碳率由高到低依次为干>枝>根>皮>叶。云冷杉林乔木层各组分的含碳率在 49.49%—53.19% 之间变化。其中树干的含碳率相对较高, 叶的含碳率最低, 各组分含碳率由高到低依次为干>枝>根>皮>叶。白桦林乔木层各组分的含碳率在 43.87%—47.57% 之间变化。其中树干的含碳率相对较高, 叶的含碳率最低, 各组分含碳率由高到低依次排列顺序为干>枝>根>皮>叶。蒙古栎林乔木层各组分的含碳率在 45.47%—49.28% 之间变化。其中树干的含碳率相对较高, 叶的含碳率最低, 各组分含碳率由高到低依次排列顺序为干>枝>根>皮>叶。山杨林乔木层各组分的含碳率在 44.03%—46.54% 之间变化。其中树干的含碳率相对较高, 叶子的含碳率最低, 各组分含碳率由高

表5 小兴安岭7种林型不同龄组的林分生物量含碳率(平均值±标准偏差, %)
Table 5 Biomass carbon content in different stand age groups of seven forest types in Xiaoxing'an Mountains (mean ± SD, %)

林型 Forest type	龄组 Age group	乔木层 Tree layer					灌木层 Shrub layer	草本层 Herbaceous layer	凋落物层 Litter layer
		干 Trunk	枝 Branch	叶 Leaf	皮 Bark	根 Root			
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	幼龄林 Young forest	50.17 ± 0.83	50.06 ± 1.25	48.57 ± 1.22	49.76 ± 1.08	50.01 ± 0.80	50.05 ± 1.27	46.27 ± 1.07	49.01 ± 1.29
	中龄林 Middle-aged forest	50.59 ± 1.10	50.57 ± 1.06	48.98 ± 1.44	50.27 ± 0.99	50.14 ± 0.97	50.24 ± 1.28	45.11 ± 1.02	49.47 ± 1.07
	近熟林 Near mature forest	51.75 ± 1.12	50.87 ± 1.08	50.24 ± 0.99	51.59 ± 1.13	50.47 ± 1.03	50.96 ± 1.05	46.25 ± 1.08	50.45 ± 0.97
	成熟林 Mature forest	51.87 ± 1.01	50.74 ± 1.04	50.49 ± 0.94	51.71 ± 0.89	50.57 ± 1.03	50.87 ± 0.83	46.14 ± 1.07	49.63 ± 1.19
	幼龄林 Young forest	52.45 ± 1.00	51.78 ± 1.02	48.76 ± 1.13	50.89 ± 1.25	50.67 ± 1.21	49.87 ± 1.15	46.18 ± 0.94	50.33 ± 1.41
兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	中龄林 Middle-aged forest	53.62 ± 1.22	51.98 ± 1.03	48.58 ± 1.01	50.99 ± 1.01	51.44 ± 0.98	49.99 ± 0.75	46.49 ± 0.90	49.98 ± 1.12
	近熟林 Near mature forest	53.79 ± 0.86	52.11 ± 0.81	49.27 ± 1.05	51.17 ± 0.93	51.47 ± 1.13	50.76 ± 0.97	47.27 ± 1.23	50.76 ± 0.93
	成熟林 Mature forest	53.81 ± 0.61	52.47 ± 0.88	49.96 ± 0.76	51.37 ± 1.07	52.00 ± 0.82	50.48 ± 0.92	46.49 ± 0.99	51.54 ± 1.03
	幼龄林 Young forest	49.18 ± 1.06	48.68 ± 0.89	48.11 ± 1.06	49.11 ± 0.91	49.87 ± 0.89	50.10 ± 0.74	46.00 ± 0.97	45.59 ± 0.91
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	中龄林 Middle-aged forest	49.25 ± 0.75	49.38 ± 0.71	48.15 ± 0.45	49.47 ± 0.55	49.28 ± 0.34	50.12 ± 0.68	46.85 ± 0.96	45.57 ± 0.71
	近熟林 Near mature forest	50.37 ± 0.82	49.87 ± 0.71	47.58 ± 0.78	49.00 ± 0.85	49.67 ± 0.83	49.19 ± 0.74	46.75 ± 0.89	46.79 ± 0.88
	成熟林 Mature forest	50.79 ± 0.85	49.24 ± 0.73	48.57 ± 0.87	49.18 ± 0.69	49.29 ± 0.77	49.00 ± 1.20	47.57 ± 0.74	46.47 ± 0.88
	幼龄林 Young forest	51.37 ± 0.90	51.44 ± 0.60	49.49 ± 1.06	50.70 ± 0.93	51.21 ± 0.87	50.04 ± 0.83	46.17 ± 0.73	50.17 ± 0.76
云冷杉林 <i>Picea-Abies</i> forest	中龄林 Middle-aged forest	51.74 ± 0.91	51.63 ± 0.98	49.75 ± 0.96	50.78 ± 0.93	51.75 ± 0.95	50.25 ± 0.72	47.57 ± 0.71	50.57 ± 0.90
	近熟林 Near mature forest	52.49 ± 0.94	51.55 ± 0.92	50.00 ± 0.75	51.87 ± 1.01	52.59 ± 0.92	51.24 ± 0.72	46.49 ± 0.81	51.49 ± 0.90
	成熟林 Mature forest	53.19 ± 1.18	51.89 ± 0.96	50.76 ± 1.04	51.15 ± 0.71	52.74 ± 0.81	51.25 ± 1.03	45.47 ± 0.64	50.47 ± 0.98
	幼龄林 Young forest	46.54 ± 0.95	45.49 ± 0.49	43.87 ± 0.58	44.17 ± 0.57	45.27 ± 0.64	46.67 ± 0.71	44.32 ± 0.74	44.17 ± 0.48
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	中龄林 Middle-aged forest	46.87 ± 0.90	45.74 ± 0.69	44.03 ± 0.51	45.87 ± 0.89	45.63 ± 0.62	46.78 ± 0.54	44.63 ± 0.96	44.75 ± 0.58
	近熟林 Near mature forest	47.38 ± 0.83	45.97 ± 0.86	44.75 ± 0.78	45.33 ± 0.84	45.14 ± 0.91	46.38 ± 0.66	44.99 ± 0.75	45.87 ± 0.63
	成熟林 Mature forest	47.57 ± 0.88	46.48 ± 0.95	44.87 ± 0.64	44.98 ± 0.78	46.13 ± 0.80	47.17 ± 0.81	44.45 ± 1.09	45.94 ± 0.72
	幼龄林 Young forest	47.14 ± 1.07	46.64 ± 0.58	45.47 ± 0.75	46.17 ± 0.79	46.56 ± 0.93	47.11 ± 0.68	45.19 ± 0.59	44.48 ± 0.71
蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest	中龄林 Middle-aged forest	47.87 ± 0.60	46.75 ± 0.65	46.97 ± 0.67	46.29 ± 0.82	46.74 ± 0.81	47.47 ± 1.02	44.78 ± 0.79	44.27 ± 0.86
	近熟林 Near mature forest	48.79 ± 1.05	47.45 ± 0.38	46.57 ± 0.63	47.74 ± 0.45	46.87 ± 0.63	47.51 ± 0.85	45.75 ± 0.50	45.07 ± 0.48
	成熟林 Mature forest	49.28 ± 0.87	47.67 ± 0.66	46.78 ± 0.81	47.34 ± 0.36	47.78 ± 0.85	47.59 ± 1.34	44.89 ± 0.63	45.48 ± 0.34
	幼龄林 Young forest	44.71 ± 0.75	45.22 ± 0.50	44.03 ± 0.51	44.67 ± 1.02	45.15 ± 0.54	45.48 ± 0.46	44.04 ± 0.42	44.15 ± 0.72
山杨林 <i>Populus davidiana</i> forest	中龄林 Middle-aged forest	45.14 ± 0.77	45.26 ± 0.83	44.11 ± 0.49	45.17 ± 0.51	45.75 ± 0.49	45.87 ± 0.60	44.24 ± 0.79	44.34 ± 0.67
	近熟林 Near mature forest	45.17 ± 0.73	45.79 ± 0.59	44.26 ± 0.61	45.85 ± 0.61	45.15 ± 0.89	45.47 ± 0.51	45.06 ± 0.73	44.27 ± 0.79
	成熟林 Mature forest	46.54 ± 0.83	46.27 ± 0.55	45.09 ± 0.58	45.89 ± 0.70	45.24 ± 0.57	45.63 ± 0.44	44.85 ± 0.85	44.97 ± 0.55

到低依次为干>枝>根>皮>叶。

从林型各组分看, 各组分生物量的含碳率从高到低依次为乔木层>灌木层>凋落物层>草本层。从不同林型的乔木树种的形态来看, 其含碳率的排序是针叶林>阔叶林。从不同林型之间的乔木层含碳率来看, 兴安落叶松林>云冷杉林>红松林>樟子松林>蒙古栎林>白桦林>山杨林。从龄组上看, 乔木层树干的生物量含碳率基本是随着林龄的增加而变大, 其含碳率的增幅排序是山杨林>云冷杉林>樟子松林>红松林>兴安落叶松林>蒙古栎林>白桦林, 但增幅并不相同, 山杨林在幼龄林时乔木层含碳率较低, 仅为44.71%, 成熟林时乔木层含碳率仅为46.54%, 乔木层枝的含碳率变化规律与树干的变化

规律相同, 其含碳率亦随着林龄的增加而变大, 但各乔木层枝的含碳率增幅均不大。各林型乔木层叶的含碳率变化规律与乔木干的变化趋势相同, 乔木层皮的含碳率亦随着林龄的增加总体上呈现上升趋势, 乔木根的含碳率随着林龄的增加也在总体上呈现增加趋势。

许多学者对生物量与碳储量进行换算时, 未通过实际生物量的测定数据进行计算, 而是借鉴其他学者的相关数据, 或者采用均一化的生物量含碳量进行估算。如目前国际上对各种树种常采用50%的含碳率来计量生物量的碳储量(Dixon & Krankina, 1993; Neary *et al.*, 1999; Isaev *et al.*, 2002; González-Pérez *et al.*, 2004), IPCC (2006)报告中亦提到森林生

物量的含碳率为0.47或0.50, 林下植被的含碳率是0.45, 木质物残体是0.37。国内外研究者也大多采用50%作为所有树种的平均含碳率, 而对非木质部分的凋落物、草本等通常采用45%的平均含碳率(Amiro *et al.*, 2003)。中国有些学者直接采用45%的平均含碳率值来计算碳储量(王效科等, 2001; 赵敏和周广胜, 2004; 胡海清等, 2012d)。从表4中可知, 不同林型、同一林型不同组分以及不同龄组之间均存在差异。通过测定各林型不同龄组各组分的生物量含碳率可知, 各林型中的木质部分(乔木、灌木)的含碳率比较接近50%, 而非木质部分(草本、凋落物)的含碳率比较接近45%。在林分水平上, 针叶林的含碳率高于阔叶林的含碳率, 其中兴安落叶松林的含碳率最高, 其次为云冷杉林, 含碳率最低的是山杨林。

2.3 不同林型林分生物量碳密度

林分生物量碳密度是单位面积森林生物碳储量。小兴安岭7种典型森林生态系统林分生物量碳密度见表6。从表6可知, 乔木层的生物量碳密度一般随着林龄的增加而增大, 但各林型的增长幅度相差较大。红松林、兴安落叶松林、樟子松林、云冷杉林、白桦林、蒙古栎林和山杨林各乔木层的生物量碳密度从幼龄林到成熟林分别增加到5.65%、9.36%、7.76%、8.30%、5.28%、12.52%和5.98%, 其中增长速度较快的是蒙古栎林和兴安落叶松林, 增长速率较慢的是白桦林。在不同林型下, 灌木层的生物量碳密度随林龄的变化差异较大, 大多数林型表现为随林龄的增加生物量反而下降, 其中下降较快的是兴安落叶松林, 减少到原来的12.90%, 蒙古栎林、樟子松林、云冷杉林和红松林均表现为下降趋势, 但白桦林表现为上升趋势, 从幼龄林到成熟林增加到5.22倍, 而山杨林表现为波动趋势, 从幼龄林到近熟林表现为下降趋势, 但在成熟林又表现为上升趋势。

单位面积草本层生物量碳密度受乔木层以及灌木层的影响较大, 从表6可知乔木层和灌木层的生物量碳密度较大时, 其单位面积草本层生物量碳密度反而较少, 草本层的生物量碳密度总体上随着林龄的增加而减少, 其中蒙古栎林生物量碳密度的下降幅度较大, 缩小到幼龄林的2.63%, 而红松林和云冷杉林草本层的生物量碳密度从幼龄林到成熟林有不断增加的趋势。各林型凋落物层的生

物量碳密度随着林龄的变化相对其他组分较大。幼龄林时蒙古栎林的单位面积生物量碳密度最高达到 $7.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 生物量碳密度最小的是山杨林, 仅为 $0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 而到中龄林时云冷杉林的生物量碳密度最高达到 $7.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 生物量碳密度最小的是蒙古栎林, 仅为 $1.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 从幼龄林到中龄林, 蒙古栎林的单位面积生物量碳密度由最高变成最低。近熟林时云冷杉林的生物量碳密度最大达到 $9.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 生物量碳密度最低的是蒙古栎林, 仅为 $0.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 成熟林时云冷杉林的生物量碳密度还是最高, 达到 $12.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 生物量碳密度最低的是蒙古栎林, 仅为 $0.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。凋落物层的生物量碳密度随着林龄增加而增长, 但蒙古栎林随着林龄增加而减少。

林分生物量碳密度由林分生物量与生物量含碳率决定。从表6中可看出小兴安岭7种典型林型不同龄组的森林生物量碳密度。其中红松林单位面积生物量碳密度从幼龄林的 $31.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $130.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。兴安落叶松林单位面积生物量碳密度从幼龄林的 $28.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $113.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。樟子松林单位面积生物量碳密度从幼龄林的 $22.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $92.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增加到4.06倍。云冷杉林单位面积生物量碳密度从幼龄林的 $23.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 到成熟林的 $130.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增加到5.64倍。白桦林单位面积生物量碳密度从幼龄林的 $18.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $88.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增加到4.71倍。蒙古栎林单位面积生物量碳密度从幼龄林的 $25.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $68.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增加到2.76倍。山杨林单位面积生物量碳密度从幼龄林的 $19.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $76.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增加到3.87倍。从幼龄林到成熟林单位面积生物量碳密度增幅由大到小为: 云冷杉林>白桦林>红松林>樟子松林>兴安落叶松林>山杨林>蒙古栎林。其中, 增加幅度最快的是云冷杉林, 增加幅度最慢的是蒙古栎林。

2.4 不同林型林分年固碳量

结合表3中采样的平均林龄和表6中小兴安岭7种林型不同龄组的林分生物量碳密度, 根据公式(2)计算小兴安岭7种林型不同龄组林分的年固碳量(图1)。7种林型不同龄组(幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)林分年固碳量在 $0.4\text{--}2.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。其中山杨林各林龄的林分年固碳量较高, 在成熟林时达到 $2.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在幼龄林时为 $2.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 而蒙古栎林各

表6 小兴安岭7种林型不同龄组的林分生物量碳密度(平均值±标准偏差, t·hm⁻²)
Table 6 Forest stand biomass carbon density in different stand age groups of seven forest types in Xiaoxing'an Mountains (mean ± SD, t·hm⁻²)

林型 Forest type	龄组 Age	乔木层 Tree layer					灌木层 Shrub layer	草本层 Herbaceous layer	凋落物层 Litter layer	林分碳密度 Forest stand carbon density	
		干 Trunk	枝 Branch	叶 Leaf	皮 Bark	根 Root					小计 Total
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	幼龄林 Young forest	16.4 ± 3.59	1.3 ± 0.27	0.6 ± 0.23	0.9 ± 0.47	1.0 ± 0.45	20.2 ± 3.63	5.3 ± 2.19	1.5 ± 0.70	4.4 ± 2.07	31.4 ± 4.31
	中龄林 Middle-aged forest	52.8 ± 11.89	3.0 ± 1.11	1.5 ± 0.58	1.9 ± 0.91	2.6 ± 0.70	61.7 ± 13.94	6.2 ± 1.90	2.1 ± 0.96	4.7 ± 1.21	74.7 ± 15.75
	近熟林 Near mature forest	89.9 ± 23.48	4.2 ± 1.64	2.2 ± 1.38	2.6 ± 1.36	4.0 ± 1.27	102.9 ± 26.58	7.8 ± 2.02	2.4 ± 0.89	5.3 ± 1.75	118.4 ± 29.15
	成熟林 Mature forest	100.2 ± 20.26	4.5 ± 1.40	2.4 ± 0.80	2.8 ± 1.47	4.3 ± 1.71	114.2 ± 21.76	4.2 ± 1.71	2.6 ± 0.77	9.2 ± 2.89	130.2 ± 23.10
兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	幼龄林 Young forest	6.7 ± 1.86	0.7 ± 0.19	0.4 ± 0.38	1.0 ± 0.35	2.1 ± 0.89	10.9 ± 2.54	9.3 ± 4.22	3.5 ± 1.49	5.1 ± 2.49	28.9 ± 2.98
	中龄林 Middle-aged forest	18.3 ± 4.67	2.0 ± 0.85	0.7 ± 0.59	1.8 ± 0.89	4.1 ± 1.30	27.0 ± 5.51	4.8 ± 1.56	5.2 ± 1.42	7.3 ± 3.48	44.3 ± 7.51
	近熟林 Near mature forest	43.4 ± 17.36	4.9 ± 1.74	1.3 ± 0.36	3.1 ± 1.30	7.4 ± 2.25	60.0 ± 18.87	2.2 ± 0.29	4.2 ± 1.77	7.8 ± 3.36	74.2 ± 20.69
	成熟林 Mature forest	76.5 ± 27.19	8.7 ± 3.89	1.8 ± 0.85	4.4 ± 1.81	10.9 ± 2.92	102.3 ± 25.97	1.2 ± 0.17	1.5 ± 0.69	8.3 ± 3.65	113.3 ± 27.86
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	幼龄林 Young forest	7.5 ± 2.56	0.9 ± 0.27	0.3 ± 0.20	0.5 ± 0.28	1.2 ± 0.41	10.4 ± 2.57	5.1 ± 1.53	5.8 ± 2.48	1.5 ± 0.61	22.8 ± 3.15
	中龄林 Middle-aged forest	34.5 ± 17.69	3.1 ± 1.08	0.8 ± 0.39	1.2 ± 0.60	4.1 ± 1.32	43.7 ± 17.36	2.2 ± 0.68	3.7 ± 1.12	2.4 ± 1.03	52.0 ± 20.37
	近熟林 Near mature forest	47.4 ± 14.68	4.0 ± 1.87	1.0 ± 0.41	1.3 ± 0.48	5.2 ± 2.22	58.9 ± 14.86	3.8 ± 1.29	3.6 ± 1.21	4.8 ± 1.62	71.1 ± 16.85
	成熟林 Mature forest	65.9 ± 20.45	5.2 ± 2.58	1.2 ± 0.55	1.6 ± 0.71	6.6 ± 2.29	80.5 ± 20.37	3.3 ± 1.70	3.3 ± 1.00	5.6 ± 2.48	92.6 ± 23.89
云冷杉林 <i>Picea-Abies</i> forest	幼龄林 Young forest	11.5 ± 1.63	0.6 ± 0.36	0.4 ± 0.28	0.4 ± 0.12	0.9 ± 0.28	13.9 ± 1.94	3.3 ± 1.69	0.2 ± 0.12	5.8 ± 2.18	23.1 ± 2.67
	中龄林 Middle-aged forest	27.6 ± 9.99	1.4 ± 0.36	1.0 ± 0.42	0.9 ± 0.41	2.7 ± 1.06	33.6 ± 10.96	2.6 ± 1.31	0.1 ± 0.06	7.9 ± 2.91	44.1 ± 12.86
	近熟林 Near mature forest	50.5 ± 10.54	2.4 ± 0.91	2.1 ± 0.88	1.5 ± 0.98	5.5 ± 2.32	62.1 ± 11.51	4.9 ± 2.97	1.2 ± 0.37	9.5 ± 2.67	77.6 ± 11.97
	成熟林 Mature forest	92.8 ± 30.87	4.2 ± 1.42	4.3 ± 0.67	2.5 ± 1.09	11.3 ± 3.52	115.1 ± 31.49	1.9 ± 0.36	1.1 ± 0.48	12.3 ± 3.98	130.3 ± 33.56
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> forest	幼龄林 Young forest	10.4 ± 1.58	1.2 ± 0.92	0.5 ± 0.20	0.8 ± 0.60	1.7 ± 0.48	14.5 ± 2.33	1.1 ± 0.44	2.4 ± 0.79	0.8 ± 0.23	18.8 ± 2.88
	中龄林 Middle-aged forest	21.9 ± 7.88	2.0 ± 0.99	0.8 ± 0.32	1.3 ± 0.47	2.6 ± 1.05	28.5 ± 8.49	2.2 ± 1.27	3.1 ± 1.30	1.6 ± 0.83	35.3 ± 10.47
	近熟林 Near mature forest	43.2 ± 11.54	3.3 ± 1.50	1.2 ± 0.66	1.9 ± 0.69	3.8 ± 2.19	53.3 ± 12.87	4.7 ± 2.18	4.3 ± 1.64	4.3 ± 1.69	66.6 ± 14.85
	成熟林 Mature forest	63.8 ± 17.25	4.4 ± 2.06	1.5 ± 0.57	2.3 ± 1.58	4.8 ± 0.31	76.8 ± 18.16	6.0 ± 2.59	1.0 ± 0.58	4.9 ± 1.59	88.5 ± 20.37
蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest	幼龄林 Young forest	3.2 ± 0.84	0.7 ± 0.40	0.4 ± 0.16	0.5 ± 0.20	0.6 ± 0.30	5.4 ± 1.34	3.9 ± 1.92	8.7 ± 3.62	7.0 ± 3.62	25.0 ± 12.69
	中龄林 Middle-aged forest	9.8 ± 2.19	1.8 ± 0.88	0.8 ± 0.52	1.1 ± 0.44	1.5 ± 0.27	14.9 ± 2.87	3.6 ± 1.69	0.3 ± 0.10	1.2 ± 0.47	20.0 ± 6.16
	近熟林 Near mature forest	32.5 ± 16.87	4.7 ± 1.31	2.0 ± 1.07	2.6 ± 0.88	3.6 ± 1.11	45.4 ± 17.76	1.2 ± 0.52	0.2 ± 0.07	0.6 ± 0.25	47.5 ± 19.42
	成熟林 Mature forest	49.4 ± 17.94	6.5 ± 2.22	2.8 ± 1.18	3.6 ± 1.36	5.0 ± 2.24	67.2 ± 19.86	0.7 ± 0.38	0.2 ± 0.07	0.8 ± 0.38	68.9 ± 25.26
山杨林 <i>Populus davidiana</i> forest	幼龄林 Young forest	8.3 ± 1.76	0.8 ± 0.20	0.3 ± 0.16	0.6 ± 0.26	1.0 ± 0.55	11.0 ± 1.99	4.6 ± 2.59	3.7 ± 2.14	0.5 ± 0.15	19.8 ± 2.58
	中龄林 Middle-aged forest	16.2 ± 5.19	1.6 ± 0.67	0.7 ± 0.30	1.0 ± 0.38	1.6 ± 0.52	20.9 ± 6.58	3.9 ± 1.87	2.4 ± 1.37	1.5 ± 0.70	28.7 ± 7.19
	近熟林 Near mature forest	28.7 ± 9.42	2.8 ± 0.94	1.2 ± 0.63	1.5 ± 0.91	2.2 ± 0.88	36.3 ± 9.64	2.3 ± 0.82	3.0 ± 1.68	2.1 ± 0.95	43.7 ± 11.75
	成熟林 Mature forest	52.8 ± 16.83	5.1 ± 1.98	2.2 ± 0.51	2.3 ± 1.25	3.3 ± 1.46	65.7 ± 17.87	4.3 ± 2.51	3.8 ± 2.05	2.9 ± 1.26	76.6 ± 20.45

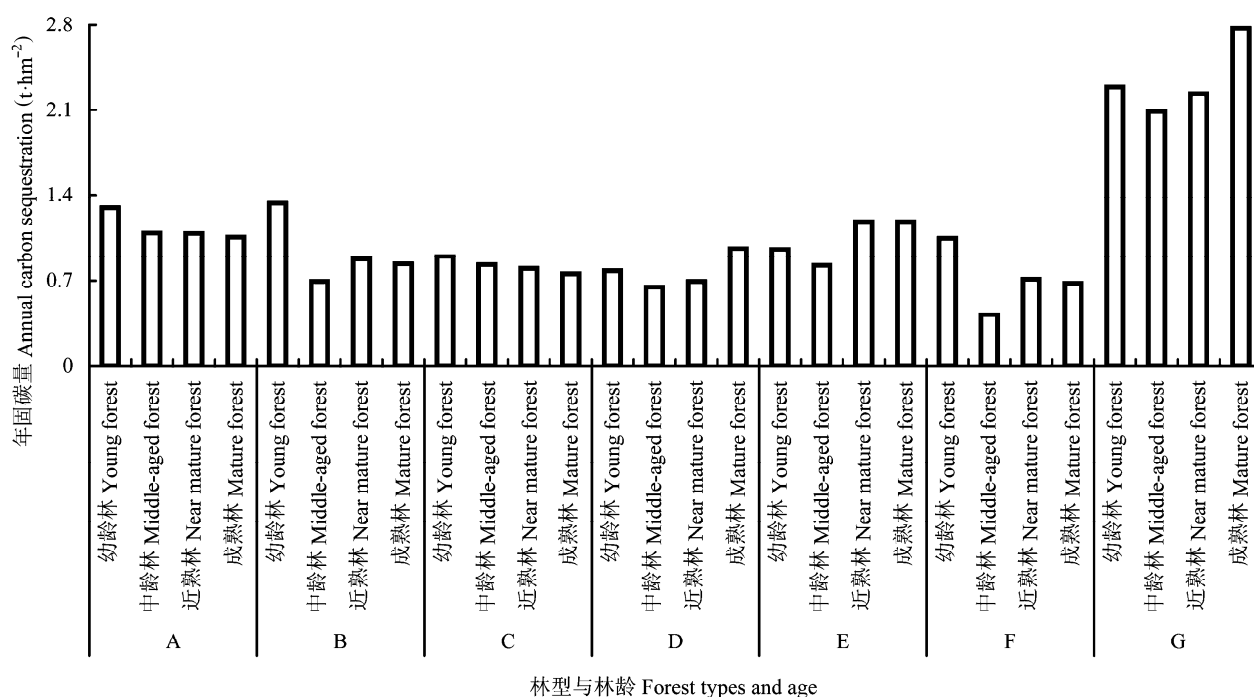


图1 小兴安岭7种林型不同龄组林分年固碳量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。A, 红松林; B, 兴安落叶松林; C, 樟子松林; D, 云冷杉林; E, 白桦林; F, 蒙古栎林; G, 山杨林。

Fig. 1 Annual biomass carbon sequestration in different stand age groups of seven forest types in the Xiaoxing'an Mountains ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$). A, *Pinus koraiensis* forests; B, *Larix gmelinii* forest; C, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest; D, *Picea-Abies* forest; E, *Betula platyphylla* forest; F, *Quercus mongolica* forest; G, *Populus davidiana* forest.

林龄的林分年固碳量较低,特别是在中龄林时仅为 $0.4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,在成熟林时为 $0.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。7种林型不同林龄组之间年固碳量差异较大,但在幼龄林时均表现为有较高的年固碳量,尤其是山杨林在幼龄林时年固碳量达 $2.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为兴安落叶松林在幼龄林时年固碳量为 $1.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。相对而言,中龄林年固碳量较低,蒙古栎林在中龄林时仅为 $0.4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为兴安落叶松林年固碳量为 $0.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,在近熟林中表现为有较高年固碳量的是山杨林,年固碳量达 $2.2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为白桦林,年固碳量为 $1.2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,年固碳量较低的是云冷杉林,仅为 $0.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为蒙古栎林,年固碳量为 $0.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,在成熟林中表现为有较高年固碳量的是山杨林,达 $2.8 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为白桦林 ($1.2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),年固碳量较低的是蒙古栎林,仅为 $0.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为樟子松林 ($0.8 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

3 结论和讨论

黑龙江省小兴安岭是我国典型的北温带针阔混交林分布区,该区植被储存的碳量,在区域碳循环与碳平衡中发挥着重要作用。研究发现小兴安岭7

种典型林型不同龄组的林分生物量碳密度均随着林龄(幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)的增长而增加,但不同林型的生物量碳汇功能存在差异($p < 0.05$),同一种林型在不同林龄的生物量碳密度增幅差异也较大。林分年固碳量范围在 $0.4\text{--}2.8 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间。小兴安岭不同林型从幼龄林到成熟林的乔木层生物量碳密度增长速率为蒙古栎林>兴安落叶松林>云冷杉林>樟子松林>山杨林>红松林>白桦林。7种林型中幼龄林生物量碳密度为红松林>兴安落叶松林>蒙古栎林>云冷杉林>樟子松林>山杨林>白桦林;7种林型中中龄林生物量碳密度为红松林>樟子松林>兴安落叶松林>云冷杉林>白桦林>山杨林>蒙古栎林;7种林型中近熟林生物量碳密度为红松林>云冷杉林>兴安落叶松林>樟子松林>白桦林>蒙古栎林>山杨林;7种林型中成熟林生物量碳密度为云冷杉林>红松林>兴安落叶松林>樟子松林>白桦林>山杨林>蒙古栎林。红松林在各龄组中其林分生物量碳密度均较高,而山杨林和蒙古栎林的林分生物量碳密度均较低。红松林、兴安落叶松林、樟子松林和蒙古栎林在幼龄林时林分年

固碳量较高, 其他林型在成熟林时林分年固碳量较高。

3.1 小兴安岭森林林分碳密度与变化趋势

小兴安岭各林型森林林分碳密度从幼龄林到成熟林均呈现不断增长的趋势, 尤其是云冷杉林和白桦林林分生物量碳密度增长最快, 增幅分别达到5.63%和4.71%, 增幅较慢的蒙古栎林和山杨林, 增幅分别是2.76%和3.87%。其中蒙古栎林和兴安落叶松林乔木层生物量碳密度增长最快, 增幅分别达到12.52%和9.36%, 增幅较慢的红松林和白桦林, 增幅分别是5.65%和5.28%。小兴安岭森林林分生物量碳密度从幼龄林的 $18.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到成熟林的 $130.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增加到原来的6.93倍。该区域植被生物量碳密度高于全国植被生物量碳密度(方精云等, 1996; 王绍强等, 1999; 周玉荣等, 2000; 王效科等, 2001; Liu *et al.*, 2012), 亦高于中国其他地区的植被生物量碳密度(魏文俊等, 2007; 黄从德等, 2008; 叶金盛和余光辉, 2010; 张明阳等, 2013), 与大兴安岭和黑龙江省森林植被生物量碳密度值均较为接近(焦燕和胡海清, 2005; 胡海清等, 2012a)。

研究发现, 无论是针叶林还是阔叶林, 所有林型的林分生物量碳密度均随着林龄的增长呈不同程度的增加趋势, 但不同林型的增长趋势存在差异, 同一种林型在不同林龄的生物量碳密度增幅差异也较大, 这与许多研究结果相一致(刘国华等, 2000; 王效科和冯宗炜, 2000; 王效科等, 2001; 魏文俊等, 2007)。目前小兴安岭的幼龄林、中龄林和近熟林的森林面积占89.51% (胡海清等, 2013a), 随着林龄的增加, 森林林分生物量碳密度亦在逐渐增大。该区森林类型生物量碳储量具有相同的年龄分布特征, 处于幼龄、中龄和近熟3种演替阶段的森林生物量碳储量所占比例较大。因此, 小兴安岭的森林植被生物量碳储量将处于持续增长之中, 固碳能力将会不断增加, 小兴安岭森林的固碳能力正处于一种持续增长的状态, 是一个潜在的巨大碳库。

3.2 小兴安岭年固碳量及森林碳汇功能变化趋势

小兴安岭林分年固碳量在 $0.4\text{--}2.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 与许多研究结果(张明阳等, 2013; 焦燕和胡海清, 2005; Liu *et al.*, 2012)相比, 该区年固碳量较大。广西西北部植被年固碳量为 $0.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (张明阳等, 2013); 江西省植被年固碳量为 $0.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (魏文俊等, 2007); 广东省植被年固碳量为 $0.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (叶金

盛和余光辉, 2010); 四川省及重庆地区植被年固碳量为 $0.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (黄从德等, 2008)。尤其是小兴安岭目前林分质量比较差, 幼龄林和中龄林所占的比重较大, 若能对现有林分加以更好地抚育和管理, 该区森林植被仍具有较大的碳汇潜力, 碳汇功能可望进一步增强。小兴安岭林区是北温带针阔混交林森林的典型分布区, 是我国重要的生态屏障。提高小兴安岭森林生态系统 CO_2 固定能力是发挥该区主体生态功能的根本途径, 对保障松嫩平原的生态安全具有重要和独特的意义。

根据小兴安岭7种典型林型生物量实际测量数据, 通过大量野外调查和采样, 将7种林型分龄组分别对乔木层、林下的灌木层、草本层和凋落物层各组分的单位面积生物量、含碳率和生物量碳密度进行测定和计量估算, 并从林分水平上, 采用分龄组的方法, 计量估算了生物量碳密度, 这对进一步完善森林林分生物量计量模型方法, 进一步量化各计量参数, 并为全球变化研究中碳平衡测算提供基础数据等均有重要意义。有关研究表明, 生长旺盛期的中幼龄林固碳能力较强, 成熟林的固碳量达到最大值, 且新增固碳能力几乎为0 (Dixon *et al.*, 1994; 刘国华等, 2000; Zhou *et al.*, 2006)。森林新增的生物量促进生物碳汇的增长, 原有的森林蓄积量是过去已固定碳汇的一部分(王效科和冯宗炜, 2000; 方精云和陈安平, 2001; 李斌等, 2013)。因此, 从增强固碳能力方面讲, 森林的生长量比总蓄积量显得更重要。郝婷婷和李顺龙(2006)的研究发现该区现有幼龄林和中龄林地面积、蓄积分别占用材林的83.17%和75.13%, 这些数据可以说明, 小兴安岭的林分目前正处于幼龄林和中龄林, 因而林分固碳能力比较强, 林分固碳潜力较大。连续多年, 该区森林蓄积和森林面积一直处于增长状态, 森林碳汇容量也相应地处于内涵和外延同时增长的状态。森林蓄积稳步增加, 表明森林生物碳汇容量的绝对增长。

3.3 不同林龄生物量碳汇功能的变化及碳汇潜力预测

由于小兴安岭林区的森林资源从20世纪60年代起就开始进行大规模开发, 而且由于对木材的过度依赖, 森林资源破坏严重, 林分结构发生较大变化, 作为小兴安岭地带性植被类型的原始阔叶红松林不复存在, 取而代之的是以次生林和人工林为主, 近熟林和成熟林亦遭到破坏, 目前留下的基本是幼龄

林和中龄林, 所以许多对小兴安岭森林生物量及生物量碳密度的研究主要集中于幼龄林和中龄林(孙玉军等, 2007)。通过研究 7 种典型林型不同林龄的生物量碳储量发现: 相同林型各组分随着林龄的增长, 其生物量碳密度均表现为较明显的递增规律, 尤其是从幼龄林过渡到近熟林阶段, 单位面积生物量碳密度增长较快。本文的研究结果可为森林经营管理及碳汇功能评价提供参考。从森林植物的生长大周期看, 生长速度都有一个共同规律, 即开始生长时速度较慢, 而后逐渐加快达到最高点, 然后又减慢, 最后停止生产。本文研究的 7 种典型林型在生物量碳密度增长速度上均表现为“慢—快—慢”的“S”形生长规律。根据第八次森林资源调查资料可知, 小兴安岭林区主要林型大多处在幼龄林和中龄林, 生长速度上表现为“慢—快”的过程, 因此森林植被的碳储潜力巨大, 采取科学有效的森林生态系统管理措施, 如对现有森林更好地抚育和经营管理, 加强森林防火工作, 促进森林生态系统的健康发展, 对增加森林碳汇功能具有重要意义。

3.4 不同林型生物量碳汇功能的潜力差异

近年来研究发现小兴安岭 7 种典型林型均发挥着碳汇作用, 但是从整体上看, 小兴安岭林区固碳能力还不强, 单位面积的碳密度低于我国平均水平 $86.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (刘国华等, 2000)。应通过科学经营, 挖掘潜力, 促使小兴安岭地区的森林生态系统在全球碳循环中发挥更大的作用。本研究发现, 不同林型的生物量碳汇功能存在差异。研究发现 7 种林型不同龄组(幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)林分年固碳量分别为: 红松林 1.30、1.09、1.08 和 $1.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 兴安落叶松林 1.33、0.69、0.88 和 $0.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 樟子松林 0.90、0.83、0.80 和 $0.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 云冷杉林 0.78、0.65、0.69 和 $0.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 白桦林 0.95、0.82、1.18 和 $1.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 蒙古栎林 1.05、0.42、0.71 和 $0.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 山杨林 2.29、2.09、2.24 和 $2.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。总体而言, 虽然小兴安岭不同林型的生物量碳汇表现为持续增长的趋势, 但增幅较小。随着“三北”防护林工程和重点地区速生丰产用材林基地建设工程的快速实施, 以及小兴安岭生态功能区建设的大力推进, 小兴安岭林区的碳汇量呈增长趋势。刘国华等(2000)研究发现, 虽然人工林林龄较短, 但森林质量较高, 具有较强的碳吸收能力, 因此我国森林生物碳汇的主要贡献来自人工林。近年来, 小兴安岭林区人工林的

比重不断增加, 其森林生物碳储量不断增长, 但在营造人工林时, 并没有较好地发挥该区的地带性植被类型红松的较强碳汇功能, 尤其在小兴安岭北部地区以及火烧等干扰较为明显的地区, 白桦林和山杨林所占比重较大。因此, 为进一步增强森林生物碳汇强度, 以达到通过造林、再造林和科学的森林经营管理活动来缓解大气 CO_2 浓度增加的目标, 应当对地带性植被类型红松进行科学合理的经营管理, 充分发挥林型的强碳汇功能; 同时要加强对森林生物量碳密度的计量估算研究, 为进一步定量评价森林碳汇对区域碳平衡及生态环境的影响, 以及有效地实施森林生态系统管理提供参考依据。

3.5 气候变化对生物量碳密度的影响

气候变化是不可否认的事实(IPCC, 2000)。世界各国为应对气候变化, 减少 CO_2 的排放, 减缓温室效应, 非常关注全球的碳源碳汇问题。森林生态系统作为重要的碳汇, 许多学者对世界各地不同区域的森林生态系统各林型生物碳储量及碳汇功能开展了大量研究。近年来, 学者们研究发现, 北半球的中高纬度地区生态系统是重要碳库, 是“迷失的碳汇”的重要固定场所(Keeling *et al.*, 1996), 同时亦是气候变化的敏感地区。我国小兴安岭林区地处高纬度地区, 属于北温带针阔混交林区, 加强研究该区主要林型的生物碳储量、碳密度、固碳量及碳汇潜力, 基于碳汇功能研究进一步对森林生物量碳储量进行定量化研究, 对“迷失的碳汇”研究以及全球 CO_2 浓度研究具有重要意义。森林生态系统对温室效应的影响研究是全球气候变化研究的主要内容。本文开展的生物量碳密度研究, 有利于进一步量化森林生态系统碳动态对大气 CO_2 的碳源汇的影响。研究发现, 我国森林生物碳储量水平地带分布主要表现为东部区域生物碳储量随纬度升高而下降的趋势(王绍强等, 1999)。然而小兴安岭林区位于我国东北的北温带针阔混交林区, 本研究发现该区单位面积的生物量碳密度较高。黑龙江省小兴安岭北温带针阔混交林区地带性植被多为原生林, 种群的密度较大, 因而该林区植被固碳能力较强。红松林是小兴安岭林区地带性植被类型, 基于 CENTURY 模型模拟的该林型碳收支表明, 落叶松林是一个重要的碳汇, 每年净吸收碳 $2.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (蒋延玲和周广胜, 2001)。随着气候变化的进一步加剧, 应对小兴安岭林区的森林生态系统进行科学合理的管理, 实施有效的碳

增汇措施。

本文未研究土壤碳库,因此在计量整个森林生态系统的固碳能力时,并没有包括土壤碳库。许多研究认为森林生态系统碳库包括生物量碳库和土壤碳库,而且土壤碳储量是生物量碳储量的数倍 (Schlesinger, 1990; 王洪岩等, 2012; 魏书精, 2013), 因此,在今后的森林生态系统碳汇潜力与固碳能力研究中,应加强林分土壤固碳能力与固碳潜力的研究。

基金项目 黑龙江省博士后基金(LBH-Z13012)、广西自然科学基金(2014GXNSFBA118108)、国家公益性行业科研重大专项(201404402)、国家科技支撑计划项目(2011BAD37B01)、国家自然科学基金(51208244和31070544)、黑龙江省科技攻关重点项目(GA09B201-06)和国家重点基础研究发展计划(2011CB403203)、林业公益性行业科研专项(2010-04003-6)。

致谢 伊春市防火办公室在野外实验中给予大力帮助,在此表示感谢。

参考文献

- Adams JM, Piovesan G (2002). Uncertainties in the role of land vegetation in the carbon cycle. *Chemosphere*, 49, 805–819.
- Amiro BD, MacPherson JJ, Desjardins RL, Chen JM, Liu J (2003). Post-fire carbon dioxide fluxes in the western Canadian boreal forest: Evidence from towers, aircraft and remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 115, 91–107.
- Blackstone NW (1987). Allometry and relative growth: Pattern and process in evolutionary studies. *Systematic Zoology*, 36, 76–78.
- Dixon RK, Solomon AM, Brown S, Houghton RA, Trexler MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185–190.
- Dixon RK, Krankina ON (1993). Forest fires in Russia: Carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 700–705.
- Fang JY, Chen AP (2001). Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 43, 967–973. (in Chinese with English abstract) [方精云, 陈安平 (2001). 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 43, 967–973.]
- Fang JY, Liu GH, Xu SL (1996). Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 16, 497–508. (in Chinese with English abstract) [方精云, 刘国华, 徐嵩龄 (1996). 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 16, 497–508.]
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010*. Viale delle Terme di Caracalla, FAO, Rome.
- Foley JA (1995). An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus*, 47, 310–319.
- González-Pérez JA, González-Vila FJ, Almendros G, Knicker H (2004). The effect of fire on soil organic matter: A review. *Environment International*, 30, 855–870.
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (2010). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, New York.
- Houghton RA (2005). Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11, 945–958.
- Hu HQ, Luo BZ, Wei SJ, Wei SW, Sun L, Wen ZM (2013a). Estimation of carbonaceous gases emission from forest fires in Xiao Xing'an Mountains of Northeast China in 1953–2011. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 3065–3076. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 魏书威, 孙龙, 文正敏 (2013a). 1953–2011年小兴安岭森林火灾含碳气体排放的估算. *应用生态学报*, 24, 3065–3076.]
- Hu HQ, Wei SJ, Sun L (2012a). Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 629–644. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 魏书精, 孙龙 (2012a). 1965–2010年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究. *植物生态学报*, 36, 629–644.]
- Hu HQ, Wei SJ, Sun L (2012b). Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 5373–5386. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 魏书精, 孙龙 (2012b). 大兴安岭2001–2010年森林火灾碳排放的计量估算. *生态学报*, 32, 5373–5386.]
- Hu HQ, Wei SJ, Jin S, Sun L (2012c). Measurement model of carbon emission from forest fire: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 1423–1434. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 魏书精, 金森, 孙龙 (2012c). 森林火灾碳排放计量模型研究进展. *应用生态学报*, 23, 1423–1434.]
- Hu HQ, Wei SJ, Sun L (2012d). Estimating carbon emissions from forest fires in 2010 from huzhong of Daxing'anling Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, 48(10), 109–119. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 魏书精, 孙龙 (2012d). 大兴安岭呼中区2010年森林火灾碳排放的计量估算. *林业科学*, 48(10), 109–119.]
- Hu HQ, Wei SJ, Sun L, Wang MY (2013b). Interaction among climate change, fire disturbance and ecosystem carbon cycle. *Arid Land Geography*, 36, 57–75. (in Chinese with English abstract) [胡海清, 魏书精, 孙龙, 王明玉

- (2013b). 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. 干旱区地理, 36, 57–75.]
- Huang CD, Zhang J, Yang WQ, Tang X, Zhao AJ (2008). Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 966–975. (in Chinese with English abstract) [黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖 (2008). 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 28, 966–975.]
- Huxley JS (1932). *Problems of Relative Growth*. Dial Press, New York. 1–9.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000). Land use, land-use change, and forestry. In: Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ eds. *A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006). Agriculture, forestry and other land use. In: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K eds. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan.
- Isaev AS, Korovin GN, Bartalev SA, Ershov DV, Janetos A, Kasischke ES, Shugart HH, French NHF, Orlick BE, Murphy TL (2002). Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions. *Climatic Change*, 55, 235–249.
- Jiao Y, Hu HQ (2005). Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Heilongjiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16, 2248–2252. (in Chinese with English abstract) [焦燕, 胡海清 (2005). 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化. 应用生态学报, 16, 2248–2252.]
- Jiang YL, Zhou GS (2001). Carbon equilibrium in *Larix gmelinii* forest and impact of global change on it. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12, 481–484. (in Chinese with English abstract) [蒋延玲, 周广胜 (2001). 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究. 应用生态学报, 12, 481–484.]
- Keeling CD, Chin JFS, Whorf TP (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 382, 146–149.
- King AW, Emanuel WR, Wullschlegel SD, Post WM (1995). In search of the missing carbon sink: A model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO₂. *Tellus*, 47, 501–519.
- Kolchugina TP, Vinson TS (1993). Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biomes in the Former Soviet Union. *Water, Air, & Soil Pollution*, 70, 207–221.
- Kurz WA, Webb TM, McNamee PJ, Apps MJ (1993). The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase I. *Simulation*, 61, 139–144.
- Li B, Fang X, Xiang WH, Tian DL (2013). Carbon storage, carbon density, and carbon sequestration potential of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(3), 25–32. (in Chinese with English abstract) [李斌, 方晰, 项文化, 田大伦 (2013). 湖南省杉木林植被碳贮量、碳密度及碳吸存潜力. 林业科学, 49(3), 25–32.]
- Li HK, Lei YC, Zeng WS (2011). Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(7), 7–12. (in Chinese with English abstract) [李海奎, 雷渊才, 曾伟生 (2011). 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. 林业科学, 47(7), 7–12.]
- Liu GH, Fu BJ, Fang JY (2000). Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 733–740. (in Chinese with English abstract) [刘国华, 傅伯杰, 方精云 (2000). 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 20, 733–740.]
- Liu YC, Yu GR, Wang QF, Zhang YJ (2012). Huge carbon sequestration potential in global forests. *Journal of Resources and Ecology*, 3, 193–201.
- Neary DG, Klopatek CC, DeBano LF, Ffolliott PF (1999). Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 122, 51–71.
- Schlesinger WH (1990). Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348, 232–234.
- Sun L, Lu JY, Wei SJ, Wu C, Hu HQ (2013). Research progress of forest fuel load estimation methods. *Forest Engineering*, 29(2), 26–31, 37. (in Chinese with English abstract) [孙龙, 鲁佳宇, 魏书精, 武超, 胡海清 (2013). 森林可燃物载量估测方法研究进展. 森林工程, 29(2), 26–31, 37.]
- Sun YJ, Zhang J, Han AH, Wang XJ, Wang XJ (2007). Biomass and carbon pool of *Larix gmelinii* young and middle age forest in Xing'an Mountains Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 1756–1762. (in Chinese with English abstract) [孙玉军, 张俊, 韩爱惠, 王雪军, 王新杰 (2007). 兴安落叶松(*Larix gmelinii*)幼中龄林的生物量与碳汇功能. 生态学报, 27, 1756–1762.]
- Tumer DP, Koepper GJ, Harmon ME, Lee JJ (1995). A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecological Applications*, 5, 421–436.
- Vloedveld M, Leemans R (1993). Quantifying feedback processes in the response of the terrestrial carbon cycle to global change: The modeling approach of image-2. *Water, Air, & Soil Pollution*, 70, 615–628.
- Wang HY, Wang WJ, Qiu L, Su DX, An J, Zheng GY, Zu YG (2012). Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 32,

- 833–843. (in Chinese with English abstract) [王洪岩, 王文杰, 邱岭, 苏冬雪, 安静, 郑广宇, 祖元刚 (2012). 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异. *生态学报*, 32, 833–843.]
- Wang SQ, Zhou CH, Luo CW (1999). Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. *Progress in Geography*, 18, 238–244. (in Chinese with English abstract) [王绍强, 周成虎, 罗承文 (1999). 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. *地理科学进展*, 18, 238–244.]
- Wang XK, Feng ZW (2000). The potential to sequester atmospheric carbon through forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Ecology*, 19(4), 72–74. (in Chinese with English abstract) [王效科, 冯宗炜 (2000). 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力. *生态学杂志*, 19(4), 72–74.]
- Wang XK, Feng ZW, Ouyang ZY (2001). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12, 13–16. (in Chinese with English abstract) [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云 (2001). 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报*, 12, 13–16.]
- Wei SJ (2013). *Quantitative Evaluation Methods of Carbon Emissions from Forest Fires in Heilongjiang Province, China*. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. 1–10. (in Chinese with English abstract) [魏书精 (2013). 黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法研究. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨. 1–10.]
- Wei WJ, Wang B, Li SN, Ma XQ, Sun JJ, Chen FJ (2007). Carbon storage and density of tree stratum in forests in Jiangxi Province. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 29, 767–772. (in Chinese with English abstract) [魏文俊, 王兵, 李少宁, 马向前, 孙建军, 陈方建 (2007). 江西省森林植被乔木层碳储量与碳密度研究. *江西农业大学学报*, 29, 767–772.]
- World Meteorological Organization (2011). *WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2011*. World Meteorological Organization, Geneva. 1–4.
- Xi TT, Li SL (2006). Analysis of forestry carbon mitigation potential in Heilongjiang Province. *Problems of Forestry Economics*, 26, 519–522, 526. (in Chinese with English abstract) [郝婷婷, 李顺龙 (2006). 黑龙江省森林碳汇潜力分析. *林业经济问题*, 26, 519–522, 526.]
- Xu XL, Cao MK, Li KR (2007). Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography*, 26(6), 1–10. (in Chinese with English abstract) [徐新良, 曹明奎, 李克让 (2007). 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 26(6), 1–10.]
- Ye JS, She GH (2010). Forest carbon dynamics in Guangdong Province. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 34(4), 7–12. (in Chinese with English abstract) [叶金盛, 余光辉 (2010). 广东省森林植被碳储量动态研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 34(4), 7–12.]
- Zhang MY, Luo WJ, Liu HY, Zhang CH, Yue YM, Wang KL (2013). Spatial distribution and change of vegetation carbon in Northwest Guangxi, China on the basis of vegetation inventory data. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 5067–5077. (in Chinese with English abstract) [张明阳, 罗为检, 刘会玉, 章春华, 岳跃民, 王克林 (2013). 基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征. *生态学报*, 33, 5067–5077.]
- Zhao M, Zhou GS (2004). Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 24, 50–54. (in Chinese with English abstract) [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, 50–54.]
- Zhou GY, Liu SG, Li ZA, Zhang DQ, Tang XL, Zhou CY, Yan JH, Mo JM (2006). Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 314, 1417.
- Zhou YR, Yu ZL, Zhao SD (2000). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 24, 518–522. (in Chinese with English abstract) [周玉荣, 于振良, 赵士洞 (2000). 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 24, 518–522.]

责任编辑: 白 娥 责任编辑: 王 葳