

DOI: 10.5846/stxb201407271520

魏亚伟, 周旺明, 周莉, 于大炮, 周永斌, 秦胜金, 代力民. 兴安落叶松天然林碳储量及其碳库分配特征. 生态学报, 2015, 35(1): 0189-0195.

Wei Y W, Zhou W M, Zhou L, Yu D P, Zhou Y B, Qin S J, Dai L M. Carbon storage and its distribution pattern in the natural *Larix gmelinii* forests on Daxing'an mountains. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 0189-0195.

兴安落叶松天然林碳储量及其碳库分配特征

魏亚伟^{1,2}, 周旺明², 周莉², 于大炮², 周永斌¹, 秦胜金¹, 代力民^{2,*}

1 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866

2 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016

摘要:兴安落叶松天然林作为大兴安岭林区的主要植被类型,在森林生态系统碳循环中具有重要的作用。在大兴安岭林区选择不同林龄的兴安落叶松天然林,调查其乔木、灌草、枯落物和土壤,并结合已建立的单木异速生长方程分别计算其碳储量,以期明确该地区碳库动态及其碳库分配特征提供参考。结果表明,兴安落叶松天然林总碳储量随林龄的增加逐渐增大,由幼龄林到过熟林分别为 140.46、186.63、208.64、308.62 和 341.03 MgC/hm²,整体表现为碳汇,这主要与乔木碳储量随林龄的增加逐渐增大有关;乔木碳库的变化范围为 45.44—212.67 MgC/hm²,且其占总碳储量的比例也随林龄的增加逐渐增大,由幼龄林的 32.60%到过熟林的 62.36%;灌草碳储量占总碳储量的比例较小,仅为 0.48%—0.93%;枯落物碳库在过熟林中较多,为 26.11 MgC/hm²,这与过熟林较少的人为干扰有关;土壤碳储量以幼龄林最小,成熟林最高,分别为 78.06 和 131.93 MgC/hm²,但这与我国其他地区天然林相比均较低,这与该地区较浅的土壤发生层有关;土壤碳储量随林龄的变化并不明显,但其占总碳储量的比例却随林龄的增加逐渐减小,由幼龄林的 56.01%减小到过熟林的 29.35%。

关键词:兴安落叶松 (*Larix gmelinii*); 大兴安岭林区; 森林生态系统碳库动态; 林龄; 异速生长方程

Carbon storage and its distribution pattern in the natural *Larix gmelinii* forests on Daxing'an mountains

WEI Yawei^{1,2}, ZHOU Wangming², ZHOU Li², YU Dapao², ZHOU Yongbin¹, QIN Shengjin¹, DAI Limin^{2,*}

1 College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: The natural *Larix gmelinii* forests are the major forest type in the Daxing'an Mountain region of Northeast China. As such they play an important role in forest ecosystem carbon storage and the carbon cycle. Quantifying carbon storage dynamics and distribution patterns of these forests with forest age is of scientific importance in gaining a better understanding of forest ecosystem carbon cycles. This study selected age classes of natural *Larix gmelinii* forests in Daxing'an mountains, including young, mid-aged, premature, mature and over-mature forests, to assess tree, understory, forest floor and soil carbon pools. Tree carbon was estimated through allometric equations that were established for tree species in the Daxing'an mountains. Both understory and forest floor carbon pools were calculated through dry weights multiplied by their carbon contents; and soil carbon pool was obtained via soil organic carbon content multiplied by bulk density and soil profile depth, both of which were obtained from soil profiles. Results showed that total carbon storage of the natural *Larix gmelinii* forests increased with forest age, which was attributed mainly to increased tree carbon storage. Carbon storage levels of 140.46, 186.63, 208.64, 308.62 and 341.03 MgC/hm² were found in young, mid-aged, premature, mature and over-mature forests, respectively; with mature and over-mature forests displaying significantly higher levels than those in young

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAD22B04);林业公益性行业科研专项(201304216);辽宁省博士启动资金(20141063)

收稿日期:2014-07-27; 修订日期:2014-11-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmdai@iae.ac.cn

and mid-aged forests. Tree carbon storage ranged from 45.44 MgC/hm² in young forests to 212.67 MgC/hm² in over-mature forests. At the same time, the contribution of tree carbon pools to total carbon pools also increased from 32.60% in young forests to 62.36% in over-mature forests. Moreover, both understory carbon pools and forest floor carbon pools displayed increasing patterns with forest ages, rising from 1.29 and 14.58 MgC/hm², respectively, in young forests to 2.15 and 26.11 MgC/hm², respectively, in over-mature forests. This was attributed primarily to the much higher carbon storage levels in over-mature forests, which have historically been disturbed only slightly by human activities in this region. The contribution of understory carbon pool to total carbon pool accounted for only 0.48%—0.93%; while the contribution of forest floor carbon pool to total carbon pool ranged from 7.08%—10.46%, suggesting that forest floor carbon pools also play an important role in carbon sequestration in the Daxing'an mountains. Soil carbon storage ranged from 78.06—131.93 MgC/hm², with highest storage levels in mature forests, and lowest levels in young forests. However, soil carbon storage did not exhibit a rising trend with increasing forest age. Conversely, the contributions of soil carbon pools to total carbon pools decreased significantly with forest age, from a high of 56.01% in young forests to a low of 29.35% in over-mature forests. In addition, both soil organic carbon content and carbon storage level decreased significantly as depth of soil profile increased, with the organic carbon contents of 4.10%—7.41% and carbon storage of 36.40—78.26 MgC/hm² in the top-soil (0—10cm) decreasing to 1.29%—1.59% and 8.96—19.76 MgC/hm², respectively, in the bottom (20—40cm) soil layer. In general, all of those are of scientific importance to estimating and predicting carbon sequestration in forest ecosystems and their overall contributions to the carbon cycle.

Key Words: *Larix gmelinii*; Daxingan'ling; forest ecosystem carbon dynamics; forest age; allometric equation

森林作为陆地生态系统的主体,每年固定的碳约占整个陆地生态系统的 2/3,在全球碳循环和减缓气候变化过程中具有不可替代的作用^[1]。第八次全国森林资源清查资料表明,我国森林面积已达 2.08 亿 hm²,森林覆盖率为 21.63%,其中天然林面积为 1.22 亿 hm²,占全国森林总面积的 58.65%,因此,明确天然林生态系统碳储量及碳库分配特征对更好的了解我国森林生态系统碳库及未来增加我国森林生态系统碳汇均具有重要的意义。

落叶松是寒温带干燥寒冷气候条件下最具代表性的森林植被类型,也是我国代表性的北方森林。其中,兴安落叶松(*Larix gmelini*)作为主要建群树种,属于东西伯利亚南部落叶针叶林沿山地向南的延续部分,是大兴安岭地区的地带性植被,也是寒温带气候条件下形成的气候演替顶级群落;其林分面积大,蓄积量高,其面积和蓄积分别占我国寒温带有林地面积和蓄积量的 55%和 75%,是我国主要的木材生产基地,在我国森林生态系统碳循环中占有重要的地位和作用^[2]。关于兴安落叶松林生物量和碳储量的研究已经进行了很多。如刘世荣等^[3]早在 20 世纪 90 年代就已经对兴安落叶松人工群落生物量与净生产力进行了研究;韩明哲等^[4]随后建立了针对大兴安岭林区兴安落叶松的异速生长方程并对该林区兴安落叶松林的生物量进行了估算;蒋延玲等^[5-6]利用实测数据验证 century 模型并利用该模型模拟兴安落叶松林的碳循环,证明兴安落叶松林是碳汇;齐光等^[7-8]也在林分尺度上分别对兴安落叶松人工林乔木和土壤碳储量进行了估算,得出生物量碳库随林龄的增加逐渐增加,土壤碳库则先减少后增加。然而,关于兴安落叶松天然林生态系统碳库动态,尤其是碳库分配特征的研究却是鲜有报道^[9]。

大兴安岭林区地处北半球高纬度地区,是对全球气候变化响应最为敏感的地区之一^[10]。本研究以该林区的兴安落叶松天然林为对象,通过实地调查,并利用空间代替时间的方法来研究林龄与兴安落叶松天然林碳库及其分配特征的关系,明确兴安落叶松天然林生长过程中(幼龄林到过熟林)碳源/汇的变化规律,以期为更好的了解我国森林生态系统碳库储量及未来增加森林生态系统碳汇提供科学参考。

1 研究地点和研究方法

1.1 研究区概括

研究区位于大兴安岭北部的呼中林业局和西南部的根河林业局,属寒温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季短暂多雨,年降雨量为 350—500mm,多集中在每年 7—8 月,达 85%—90%;研究区地貌类型属石质中低山山地,坡度平缓,多在 15°以下,平均海拔 812m;研究区地带性植被类型为寒温带针叶林,以兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 为单优势种,此外主要乔木树种还包括樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、云杉 (*Picea koraiensis*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 和山杨 (*Populus davidiana*) 等;大兴安岭林区的土壤以棕色针叶林土为主,主要分布在海拔 500—1000m 的地区,同时也伴有暗棕壤、灰色森林土、草甸土、沼泽土和冲积土等^[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

于 2011 年的 7 月—9 月分别在大兴安岭的呼中林区和根河林区设置样地,主要针对该地区的兴安落叶松天然林,包括幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林,样地面积均为 20m×20m,调查其中的乔木,记录其树种、胸径、树高、存活状态等;并在样地内随机设置 3 个 2m×2m 的小样方,调查样方内所有的灌木和草本,记录其种类、数量等,并取部分样品分别进行称重;同时,设置 3 个 1m×1m 的小样方,收集样方内所有的地表枯落物,称重,并取部分样品带回室内烘干,并进行含水量和有机碳的测定(重铬酸钾外加热法)。土壤样品的采集采用挖土壤剖面法,每个样地挖取 2 个土壤剖面,最大深度为 1m,深度不足 1m 的按实际深度进行分层取样(大兴安岭林区由于常年的低温、积水、及地表较厚的枯落物层,导致该地区土壤发生层较浅,平均深度仅为 40cm),包括 0—10cm、10—20cm、20—40cm、40—60cm 和 60—100cm,其中 0—10cm 采用多点混合采样法,以减少表层土壤的空间变异性;挑出土壤混合样中的根系和石砾,带回实验室风干处理,进行土壤有机碳的测定(重铬酸钾外加热法);同时取每层土壤的环刀土样,进行土壤容重的测定。

样地林龄的确定根据样地主林层植被信息并结合当地林业局的林相资料及其他相关资料;样地采取随机选择,每个样地至少 3 个重复,且不在同一林班,共设置样地 42 块,样地详细情况见表 1。

表 1 样地的林分密度、平均胸径及数量

Table 1 Stand density, mean diameter at DBH and No. of plots of the natural *Larix gmelinii* forest (Mean±Se)

林龄 Forest age	林分密度 Stand density/(株/hm ²)	平均胸径 Mean diameter/cm	样地数 No. of plots	林龄范围 Forest age/a
幼龄林 Young forest	3125±464	9.88±0.54	8	<40
中龄林 Mid-aged forest	2123±140	12.80±0.31	13	41—80
近熟林 Pre-mature forest	1416±146	18.40±1.10	11	81—100
成熟林 Mature forest	1394±301	20.54±2.21	5	101—140
过熟林 Over-mature forest	1606±212	30.23±0.62	5	>140

1.2.2 植被碳储量的计算

本研究中植被碳储量包括乔木、灌草及枯落物碳储量。乔木碳储量的计算采用韩明哲和周晓峰^[4]建立的大兴安岭林区的落叶松的异速生长方程,并参照大兴安岭林区落叶松各器官的含碳率^[12]进行计算;灌草碳储量的计算首先根据东北林区灌木和草本的干湿物质的比率求出其干重^[13],然后根据生物量-碳储量转换系数(0.5)计算其碳储量;枯落物碳储量的计算根据枯落物的干重(由枯落物的鲜重和含水量计算所得)乘以其含碳量所得。

1.2.3 土壤碳储量的计算

土壤有机碳碳储量的计算:

$$SOC = \sum_{i=1}^n SOC_i \times BD_i \times H_i \times (1 - R_i/100)$$

式中, SOC 为土壤剖面总有机碳储量 (MgC/hm^2), SOC_i 为第 i 层土壤有机碳含量 (%), BD_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3), H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm), R_i 为第 i 层土壤 $> 2 \text{ mm}$ 砾石的百分含量 (%).

1.3 数据处理

文中所有数据均采用各处理结果的平均值; 林龄对植被碳储量和土壤碳储量的影响、及不同深度土壤碳储量之间的差异均采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD), 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$, 数据分析软件为 SPSS 16.0.

2 结果分析

2.1 兴安落叶松天然林碳储量随林龄的变化

兴安落叶松天然林乔木碳储量随林龄的增加逐渐增大 (表 2), 且各龄组间的差异均达显著水平, 其中过熟林乔木碳储量高达 $212.67 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 分别是成熟林、近熟林、中龄林和幼龄林的 1.43、2.02、2.96 和 4.68 倍。灌草碳储量和枯落物碳储量均以过熟林最大, 分别为 2.15 和 $26.11 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 幼龄林最小, 分别为 1.29 和 $14.58 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 且总体均随林龄增加呈逐渐增大的趋势, 但枯落物碳储量均显著高于灌草碳储量 (表 2)。土壤碳储量以成熟林最大, 为 $131.93 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 幼龄林最小, 为 $78.06 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 但各龄组间均无显著差异 (表 2)。兴安落叶松天然林总碳储量的变化趋势与乔木碳储量相似, 随林龄的增加逐渐增大, 过熟林和成熟林显著高于近熟林、中龄林和幼龄林, 其中, 过熟林高达 $341.02 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 而幼龄林仅为 $139.38 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ (表 2)。

表 2 兴安落叶松天然林各组分碳储量及总碳储量

Table 2 Total carbon storages and its distribution in different components of the natural *Larix gmelinii* forest (Mean \pm Se)

林龄 Forest age	碳储量 Carbon storage/(MgC/hm^2)				
	乔木 Tree	灌草 Understory	枯落物 Litter	土壤 Soil	总 Total
幼龄林 Young forest	45.44 \pm 5.90e	1.29 \pm 0.13b	14.58 \pm 2.23b	78.06 \pm 16.45a	139.38 \pm 15.85c
中龄林 Mid-aged forest	71.96 \pm 4.68d	1.45 \pm 0.17ab	19.00 \pm 2.23ab	94.22 \pm 13.29a	186.63 \pm 13.11bc
近熟林 Pre-mature forest	105.41 \pm 5.13c	1.47 \pm 0.25ab	14.77 \pm 1.59b	86.98 \pm 16.77a	208.64 \pm 18.29b
成熟林 Mature forest	148.80 \pm 18.59b	1.46 \pm 0.35ab	22.72 \pm 3.78a	131.93 \pm 13.58a	304.91 \pm 20.15a
过熟林 Over-mature forest	212.67 \pm 31.47a	2.15 \pm 0.25a	26.11 \pm 1.87a	100.10 \pm 38.36a	341.02 \pm 68.38a

同列不同字母表示各龄组间差异达显著水平

2.2 兴安落叶松天然林土壤有机碳含量和碳储量的垂直变化

由图 1 可知, 土壤有机碳含量和碳储量均随土壤深度的增加逐渐减少; 其中, 土壤有机碳含量在表层 0—10cm 和 10—20cm 的变化范围分别为 4.10%—7.41% 和 1.95%—5.00%, 且随林龄的增加有逐渐增大的趋势; 20—40cm 土壤有机碳含量的变化范围较小, 仅为 1.29%—1.59%, 在各龄组间的变化也不明显。土壤碳储量在表层 0—10cm 和 10—20cm 均以成熟林最大, 分别为 78.26 和 $36.40 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 幼龄林最小, 分别为 43.13 和 $23.05 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 底层 20—40cm 土壤碳储量较小, 仅为 8.96— $19.76 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 且各龄组间均无显著差异。

2.3 兴安落叶松天然林碳库分配特征

兴安落叶松天然林中, 乔木碳储量和土壤碳储量占总碳储量的比例最大, 分别为 32.60%—62.36% 和 29.35%—56.01%, 其中, 乔木碳储量占总碳储量的比例随林龄的增加逐渐增大, 而土壤碳储量占总碳储量的比例则随林龄的增加逐渐减小; 灌草碳储量占总碳储量的比例较小, 仅为 0.63%—0.93%, 而枯落物碳储量占总碳储量的比例则多达 7.08%—10.46%, 二者也均随林龄的增加逐渐减小 (图 2)。

此外, 兴安落叶松天然林中土壤碳储量与乔木碳储量的比值也随林龄的增加逐渐减小, 由幼龄林的 1.72 到过熟林的 0.47 (图 2)。

3 讨论

3.1 研究结果的不确定性

本研究通过实地调查并结合单木异速生长方程, 在样地尺度上比较系统的完成了对兴安落叶松天然林乔

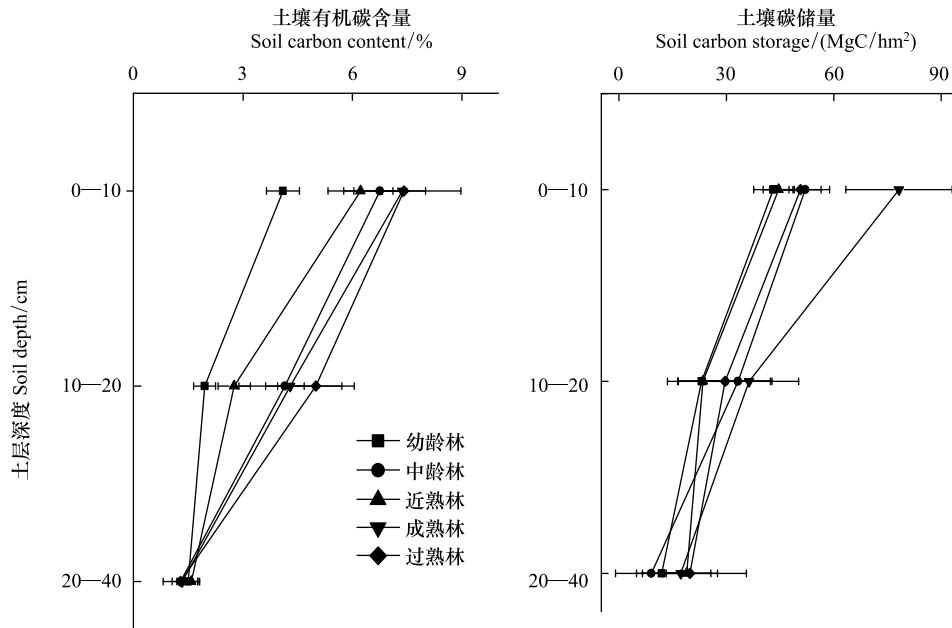


图 1 兴安落叶松天然林土壤有机碳含量和碳储量随林龄的变化

Fig.1 Varied in soil organic carbon content and carbon storage with stand age in natural *Larix gmelinii* forest

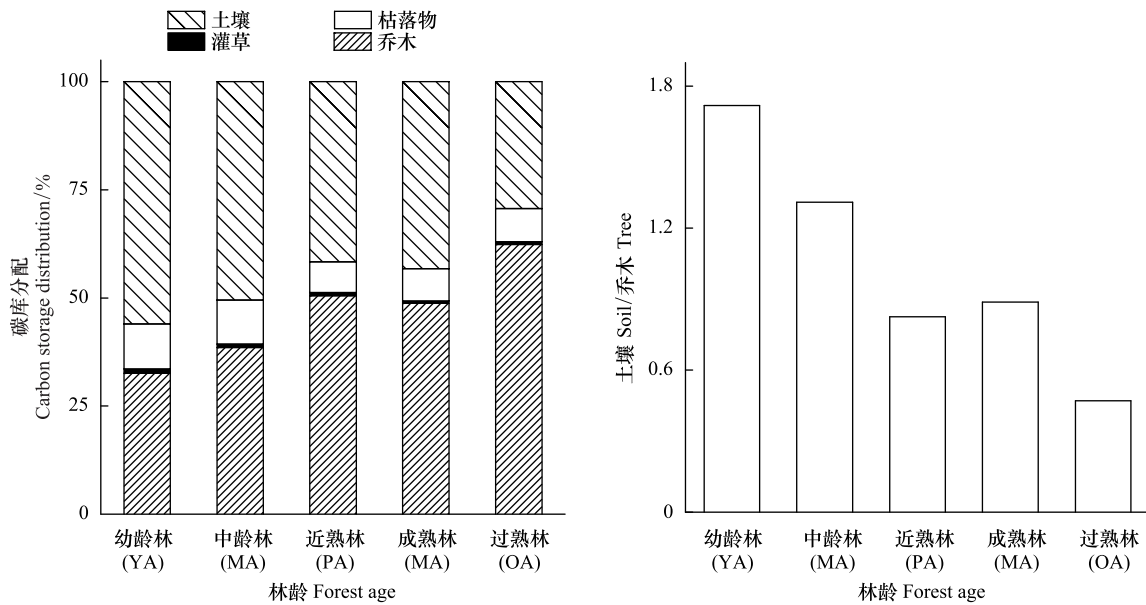


图 2 兴安落叶松天然林碳库分配特征及土壤碳储量与乔木碳储量的比值

Fig.2 Carbon storage distribution patterns in the natural *Larix gmelinii* forest and the values for soil carbon storage and tree carbon storage

木、灌草、枯落物和土壤碳储量的估算,而且乔木和枯落物的含碳率均参照各器官的实测含碳率,这在很大程度上提高了森林生态系统碳储量的估算精度;关于兴安落叶松天然林土壤碳储量的估算,本研究采用挖土壤剖面法,而大兴安岭林区的土壤发生层较浅,且石砾较多,这给本研究中土壤碳储量的估算带来了一定的不确定性。此外,关于野外调查过程中样地的选择也存在一定的主观性,这均成为制约碳储量估算结果精确性的不确定因素。

3.2 林龄对兴安落叶松天然林碳储量及碳库分配特征的影响

研究表明,林龄是影响森林生态系统碳储量积累的主导因子之一^[14]。本研究中,兴安落叶松天然林总碳

储量随林龄的增加逐渐增大,这与以往的研究结果相似^[9, 14],这主要与该林区乔木碳储量随林龄的增加逐渐增大有关(表 1);乔木碳储量作为森林生态系统中重要的组成部分,其所占总碳储量的比例也随林龄的增加逐渐增大(32.60%—62.36%,图 2),这进一步表明林龄在森林乔木碳储量积累过程中的重要作用。齐光等^[7]对大兴安岭林区的兴安落叶松人工林进行研究,也得出乔木碳储量随林龄的增加逐渐增大,为 5.91—105.20 MgC/hm²,这与本研究中兴安落叶松中龄林和近熟林相似;然而,相同林龄下,兴安落叶松天然林乔木碳储量却小于人工林。

兴安落叶松天然林中灌草和枯落物碳储量随林龄的增加总体均呈逐渐增大的趋势,这主要与过熟林中较高的灌草和枯落物碳储量有关;调查过程中发现,大兴安岭林区兴安落叶松天然过熟林的分布也仅存在自然保护区内,这进一步表明人为干扰对灌草和枯落物碳储量的影响,而无人干扰的情况下更有利于灌草和枯落物碳库的积累^[9, 15]。灌草碳储量占总碳储量的比例较小,仅为 0.63%—0.93%(图 2),而枯落物占总碳储量的比例则多达 7.08%—10.46%(图 2),这也证明了枯落物碳库在北方针叶林区的重要作用^[16]。

林龄是影响土壤有机碳积累的重要因素^[17-18],然而关于林龄对土壤碳储量的影响至今仍没有统一的结论。如陈立新等^[19]对长白山和小兴安岭地区的落叶松人工林土壤有机碳储量进行研究,得出长白山地区土壤碳储量落叶松幼龄林大于中龄林,而小兴安岭地区则相反,即幼龄林小于中龄林;王洪君等^[20]和齐光等^[8]研究均得出落叶松人工林土壤碳储量总体随林龄的增加逐渐增大;自然状态下,土壤有机碳随林龄的增加也逐渐增多^[21-22]。而本研究中,土壤碳储量随林龄的变化却不明显(表 2),这与研究区的土壤发育状况(土层较浅、石砾较多)以及较多的人为干扰活动有关^[17, 23];相反,土壤碳库占总碳库的比例却随林龄的增加逐渐降低,进一步证明大兴安岭林区土壤碳库较大的稳定性。

此外,兴安落叶松天然林中土壤碳储量与乔木碳储量的比值为 0.47—1.72,这与以往的研究结果相比较低;李克让等^[24]对我国各森林类型进行研究得出土壤储量与植被碳储量的比值变化范围为 0.91—4.22,王新闻等^[25]对吉林省的森林碳储量的估算结果得出土壤与植被碳储量的比值为 2.53—7.76,均高于全国平均水平;这不仅与本研究中大兴安岭林区较浅的土壤发生层有关^[8, 17],也与样地尺度上较高的乔木生物量碳储量有关^[26]。

3.3 兴安落叶松天然林的固碳潜力

大量研究已表明,我国森林生态系统近 30 年来主要表现为碳汇,主要与我国人工林面积的增加及天然林的恢复有关^[27-29],而天然林保护工程的实施在这一过程中也起了重要的作用^[30-32]。本研究采用以空间代时间的方法来探讨林龄对兴安落叶松天然林碳储量的影响,结果发现森林总碳储量的增加主要与乔木碳储量有关,土壤碳储量比较稳定,随林龄的变化并不明显,这说明该地区森林生态系统的固碳潜力主要与乔木碳储量有关;因此,加强对该地区森林生态系统的管理,尤其是乔木碳库的管理,对未来增加该地区的森林碳汇具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Johnston C A, Groffman P, Breshears D D, Cardon Z G, Currie W, Emanue W, Gaudinski J, Jackson R B, Lajtha K, Nadelhoffer K, Nelson D Jr, Post W M, Retallack G, Wielopolski L. Carbon cycling in soil. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(10): 522-528.
- [2] 王玉辉,周广胜,蒋延玲,杨正宇. 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式. *植物生态学报*, 2001, 25(4): 420-425.
- [3] 刘世荣,柴一新,蔡体久,彭长辉. 兴安落叶松人工群落生物量与净初级生产力的研究. *东北林业大学学报*, 1990, 18(2): 40-46.
- [4] 韩明哲,周晓峰. 兴安落叶松—白桦林生态系统生物量和净初级生产力的研究//国家林业部科技司. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 1994: 451-458.
- [5] 蒋延玲,周广胜. 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 481-484.
- [6] 蒋延玲,周广胜. 兴安落叶松林碳平衡及管理活动影响研究. *植物生态学报*, 2002, 26(3): 317-322.
- [7] 齐光,王庆礼,王新闻,齐麟,王庆伟,叶雨静,代力民. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳储量. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 273-279.

- [8] 齐光, 王庆礼, 王新闯, 于大炮, 周莉, 周旺明, 彭舜磊, 代力民. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林土壤有机碳贮量. 应用生态学报, 2013, 24(1): 10-16.
- [9] Wei Y W, Li M H, Chen H, Lewis B J, Yu D P, Zhou L, Zhou W M, Fang X M, Zhao W, Dai L M. Variation in carbon storage and its distribution by stand age and forest type in boreal and temperate forests in northeastern China. PLoS One, 2013, 8(8): e72201, doi: 10.1371/journal.pone.0072201.
- [10] Dai L M, Wu G, Zhao J Z, Kong H M, Shao G F, Deng H B. Carbon cycling of alpine tundra ecosystems on Changbai Mountain and its comparison with arctic tundra. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 45(10): 903-910.
- [11] 肖笃宁, 苏文贵. 大兴安岭北部地区的森林土壤及其生产特性. 生态学杂志, 1988, 7(增刊): 42-47.
- [12] 闫平, 高述超, 刘德晶. 兴安落叶松林 3 个类型生物及土壤碳储量比较研究. 林业资源管理, 2008, 3: 77-81.
- [13] 邢艳秋. 基于 RS 和 GIS 东北天然林区域森林生物量及碳贮量估测研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [14] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. Global Change Biology, 2004, 10(12): 2052-2077.
- [15] Yanai R D, Currie W S, Goodale C L. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. Ecosystems, 2003, 6(3): 197-212.
- [16] 张新平, 王襄平, 朱彪, 宗占江, 彭长辉, 方精云. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1031-1040.
- [17] 魏亚伟, 于大炮, 王清君, 周莉, 周旺明, 方向民, 谷晓萍, 代力民. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3333-3340.
- [18] Martin J L, Gower S T, Plaut J, Holmes B. Carbon pools in a boreal mixedwood logging chronosequence. Global Change Biology, 2005, 11(11): 1883-1894.
- [19] 陈立新, 陈祥伟, 段文标. 落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究. 应用生态学报, 1998, 9(6): 581-586.
- [20] 王洪君, 官芳, 郑宝仁, 陈德祥, 马玲. 落叶松人工林的土壤理化性质. 东北林业大学学报, 1997, 25(3): 75-79.
- [21] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较. 植物生态学报, 2004, 28(5): 657-664.
- [22] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, Wang J X. Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in China. Plant and Soil, 2011, 347(1/2): 243-253.
- [23] Butnor J R, Johnsen K H, Sanchez F G, Nelson C D. Impacts of pine species, stump removal, cultivation, and fertilization on soil properties half a century after planting. Canadian Journal of Forest Research, 2012, 42(4): 675-685.
- [24] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(1): 72-80.
- [25] 王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2013-2020.
- [26] 赵敏, 周广胜. 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, 2004, 24(1): 50-54.
- [27] Pan Y D, Luo T X, Birdsy R, Hom J, Melillo J. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests- effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. Climatic Change, 2004, 67(2/3): 211-236.
- [28] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S P, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [29] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [30] 胡会峰, 刘国华. 中国天然林保护工程的固碳能力估算. 生态学报, 2006, 26(1): 291-296.
- [31] 魏亚伟, 周旺明, 于大炮, 周莉, 方向民, 赵伟, 包也, 孟莹莹, 代力民. 我国东北天然林保护工程区森林植被碳储量研究. 生态学报, 2014, 34(20): 5696-5705.
- [32] Wei Y W, Yu D P, Lewis B J, Zhou L, Zhou W M, Fang X M, Zhao W, Wu S N, Dai L M. Forest carbon storage and tree carbon pool dynamics under natural forest protection program in northeastern China. Chinese Geographical Science, 2014, 24(4): 397-405.