

大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳贮量*

齐光^{1,2} 王庆礼¹ 王新闯^{1,2} 齐麟^{1,2} 王庆伟^{1,2} 叶雨静^{1,2} 代力民^{1**}(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 通过样地调查,研究了大兴安岭林区 10、12、15、26 和 61 年生兴安落叶松人工林中乔木、草本和植被总体碳储量,并以空间代替时间的方法,探讨落叶松人工林生长过程中植被碳库贮量变化. 结果表明: 随林龄的增加,兴安落叶松人工林植被碳库贮量逐渐增加,61 a 时达 $105.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 碳汇作用显著; 15~26 a 兴安落叶松人工林的碳汇能力最强. 其中,树干碳库贮量占乔木碳库总贮量的 54.3%~73.9%, 且随林龄增加,其碳库比率和碳密度增加; 其余器官碳库比率随林龄增加而减小,碳密度则逐渐增加,直至趋于平衡或末期略有减少. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林的轮伐期以 $\geq 60 \text{ a}$ 为宜.

关键词 大兴安岭 兴安落叶松 CO_2 生物量 碳密度 植被碳汇 人工林经营

文章编号 1001-9332(2011)02-0273-07 **中图分类号** Q948 **文献标识码** A

Vegetation carbon storage in *Larix gmelinii* plantations in Great Xing'an Mountains. QI Guang^{1,2}, WANG Qing-li¹, WANG Xin-chuang^{1,2}, QI Lin^{1,2}, WANG Qing-wei^{1,2}, YE Yu-jing^{1,2}, DAI Li-min¹ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(2): 273-279.

Abstract: Through sampling site investigation, this paper studied the carbon storage of arbor, herb, and whole vegetation in 10-, 12-, 15-, 26-, and 61-year old *Larix gmelinii* plantations in Huzhong Forestry Bureau of Great Xing'an Mountains, Northeast China, and 'temporal for spatial' method was employed to approach the variations of the vegetation carbon storage during the growth of the plantations. The results revealed that the vegetation carbon storage in the plantations increased with stand age, and reached $105.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ at age of 61 years, representing a marked role as a carbon sink. The *L. gmelinii* plantations at the ages from 15 to 26 years had the strongest capability in carbon sequestration, in which, the carbon storage in trunk occupied 54.3%–73.9% of the total carbon storage of arbor, and, with the increase of stand age, the trunk's carbon storage to the total carbon storage of arbor as well as the trunk's carbon density increased. As for the other organs, the rate of their carbon storage to the total carbon storage of arbor decreased with stand age, while their carbon density increased first but eventually leveled off or had a slight decrease till at age of 61 years. Based on these results, the rotation age for the *L. gmelinii* plantations in Great Xing'an Mountains would properly be lengthened to at least 60 years.

Key words: Great Xing'an Mountains; *Larix gmelinii*; carbon dioxide; biomass; carbon density; vegetation carbon sink; plantation management.

工业革命以来,人类活动使大气 CO_2 浓度不断上升,21 世纪末将增至 $650 \sim 700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 地球表面气温将相应增加 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[1-2]. 而将大气 CO_2 固持在陆地碳库中成为避免温室效应引发气候灾难的关键. 森林是地球上最大的陆地碳库,约占陆地总碳库

的 46%, 对全球碳循环和碳平衡至关重要. 全球 85% 的陆地生物量集中在森林植被中, 森林植被碳库贮量成为研究森林生态系统向大气吸收和排放 CO_2 的关键因子, 森林植被碳库的准确估算也是揭示“碳失汇”现象的重要前提^[3]. 清洁发展机制 (clean development mechanism, CDM) 的制定, 使森林碳汇与各国的政治和经济利益密切相关^[1]. 目前 CDM 碳汇项目仅限于造林和再造林^[1], 因此急需开

* 国家自然科学基金项目(30800139, 40873067, 30900208)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q1-0501)资助.

** 通讯作者. E-mail: lmdai@iae.ac.cn

2010-08-17 收稿, 2010-11-30 接受.

展人工林碳库研究。

大兴安岭林区地处北半球高纬度区域,是对全球气温变化反应最敏感的地区之一^[4]。该地区广泛分布的兴安落叶松人工林是对全球温度变化最敏感的植被类型之一,但目前对该植被类型碳库系统研究的实测数据仍较匮乏^[5-6]。本文以不同林龄兴安落叶松人工林为对象,根据解析木及样地调查数据建立基于胸径的各器官生物量相对生长方程,结合器官含碳率估算兴安落叶松人工林生物量和碳储量,旨在揭示兴安落叶松不同器官及总体生物量碳库时间变化规律,为制定人工林经营管理策略提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于大兴安岭北部的呼中林业局(51° 14' 40"—52° 25' 00" N, 122° 39' 30"—124° 21' 00" E),总面积 770199 hm²。该地区属大陆性季风气候,夏季短暂,冬季漫长,冰冻期长达半年,绝对最低温度达-47.5℃。年均气温 4.7℃,年均降水量 350~500 mm,年均无霜期 85 d。研究区地貌类型为石质中低山山地,坡度平缓,多在 15°以下,平均海拔 812 m。地带性植被类型为寒温性针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为单优势种。主要针叶乔木树种为兴安落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和云杉(*Picea koraiensis*)等,主要阔叶乔木树种为白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)和钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)等。高海拔地带分布有偃松(*Pinus pumila*),构成亚高山特有景观和山地寒温带针叶疏林的林下灌木^[7]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 于 2009 年 8 月进行样地调查,所选样地均为草类落叶松人工林,下坡位,坡度 < 5°,林龄分别为 10、12、15、26 和 61 a。在各研究样地中分别设置 3 个 20 m×20 m 乔木样方,测定每木胸径(DBH),样地概况见表 1。每个乔木样方内分别设置 3 个 1 m×1 m 草本样方,收获全部草本。调查共设置 15 个乔木样方,45 个草本样方。将草本样品带回实验室,置于烘箱中 80℃烘干至恒量,采用重铬酸钾外加热法^[8]测定样品含碳量。由于本文所调查样地类型均为草类落叶松林,林下基本无灌木^[9],故植被碳库由乔木和草本两部分碳库组成。

1.2.2 分析方法 标准地及生物量解析依据文献[10]方法,选择兴安落叶松占 90% 以上,郁闭度

>0.7,近期无人干扰且分布均匀的天然幼、中龄林分作为标准地,共计 28 块标准地。从 28 块标准地中各选一株标准木,伐倒后从基部到梢头每隔 1 m 分段取样,测树干鲜质量;每段两端各取 10 cm 长皮样,称取鲜质量并计算全段树皮鲜质量;枝、叶归类后分别称量。然后对树干、树皮、枝、叶按比例取样,并将样品置 105℃烘箱中干燥至恒量,测样品干质量,以此推算各组分干质量,即为各组分生物量(t·hm⁻²)^[6],这部分数据仅用于兴安落叶松器官相对生长方程的拟合。

将拟合所得兴安落叶松各器官的生物量-胸径相对生长方程,代入本研究 15 个调查样地(表 1)每木胸径,得到兴安落叶松各调查样地器官生物量。在 15 个调查样地生物量基础上,通过大兴安岭北部地区兴安落叶松器官含碳率(干、皮、枝、叶和根的含碳率分别为 0.525、0.525、0.532、0.520 和 0.517^[11])和乔木样方面积求得各器官及乔木碳密度。

实验室测定草本含碳率后,根据草本样方面积计算草本碳密度,乔木和草本碳密度之和即为落叶松林植被碳密度。

1.3 数据处理

所有数据均采用 SPSS 软件进行统计分析,采用回归方法进行方程拟合,并以均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RMSE_r)为指标进行拟合效果验证。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 法比较不同数据组间的差异,显著性水平设定为 α=0.05。

表 1 调查样地概况

Table 1 General status of sampling plantations (n=15)

林龄 Stand age (a)	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均树高 Mean height (m)	密度 Density (ind·hm ⁻²)
10	4.65	3.08	2100
10	4.97	3.28	2300
10	4.85	3.58	2100
12	7.54	6.70	2100
12	7.00	5.92	2200
12	9.03	7.49	2000
15	8.85	6.31	850
15	8.96	7.32	1125
15	9.26	7.60	1075
26	15.14	10.58	1700
26	12.45	10.13	1800
26	13.77	10.81	1800
61	34.84	21.69	315
61	36.38	21.79	275
61	33.45	21.60	324

2 结果与分析

2.1 兴安落叶松人工林各器官相对生长方程

根据大兴安岭地区兴安落叶松 28 株解析木数据, 拟合单木各器官相对生长方程(表 2). R^2 介于 0.956(干)和 0.983(叶)之间, 拟合效果良好.

采用均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RMSE_r)2 个指标对预测值和实测值进行比较, 以验证所得方程的拟合效果(表 3), 两个指标值越小, 说明拟合效果越好. RMSE 值介于 0.00012(叶)和 0.00236(干)之间, 表明方程对树干的拟合效果要差于其他器官.

2.2 不同林龄兴安落叶松人工林乔木生物量

将拟合所得兴安落叶松各器官相对生长方程(表 2)代入本研究 15 个调查样地, 得到不同林龄兴安落叶松人工林乔木生物量. 由图 1 可知, 在兴安落叶松人工林中, 乔木生物量的主体为树干, 其次是根、枝和树皮, 而叶生物量较小. 当林龄 < 26 a 时, 兴安落叶松人工林各器官及乔木总生物量均随林龄增加而增加, 以 15 ~ 26 a 时段的增幅最大; 林龄为 26 ~ 61 a 时, 干、根和乔木生物量仍有所增加, 但是增幅较前一阶段减小; 枝和叶生物量趋于稳定, 而树皮的生物量呈现明显降低趋势.

2.3 不同林龄兴安落叶松人工林乔木碳库贮量

由图 2 可以看出, 兴安落叶松不同器官碳库贮

表 2 兴安落叶松各器官相对生长方程拟合结果
Table 2 Relative growth equations for *Larix gmelinii*

器官 Organ	生物量方程 Growth equation for biomass	R^2
干 Trunk	$0.00003458D^{2.696}$	0.956
皮 Bark	$0.00002310D^{2.038}$	0.955
枝 Branch	$0.00001119D^{2.258}$	0.982
叶 Leaf	$0.000007086D^{2.182}$	0.983
根 Root ^[12]	$0.0000248D^{2.337}$	0.997

D: 胸径 Diameter at breast height (cm).

量时间变化特征与生物量变化相似. 由于各器官的含碳率介于 0.517 ~ 0.532^[11], 器官间变动不大, 各器官碳库大小主要由该器官的生物量决定. 树干是最大生物量载体, 同时也是最大碳存储器官.

林龄 < 26 a 时, 各器官及乔木碳密度都随林龄增加而增加, 增幅最大时段为 15 ~ 26 a, 与器官生物量增幅最大时期相符, 说明中龄阶段的碳汇功能最大. 林龄 26 ~ 61 a 时, 树干碳密度仍有显著增加, 根碳密度趋于稳定, 而枝、叶和树皮的碳密度略有减少.

表 3 拟合效果检验

Table 3 Test of the simulated results

	树干生物量 Trunk biomass	树皮生物量 Bark biomass	枝生物量 Branch biomass	叶生物量 Leaf biomass
均方根误差 RMSE	0.00236	0.00029	0.00026	0.00012
相对均方根 误差 RMSE _r	0.36678	0.26706	0.30696	0.26000

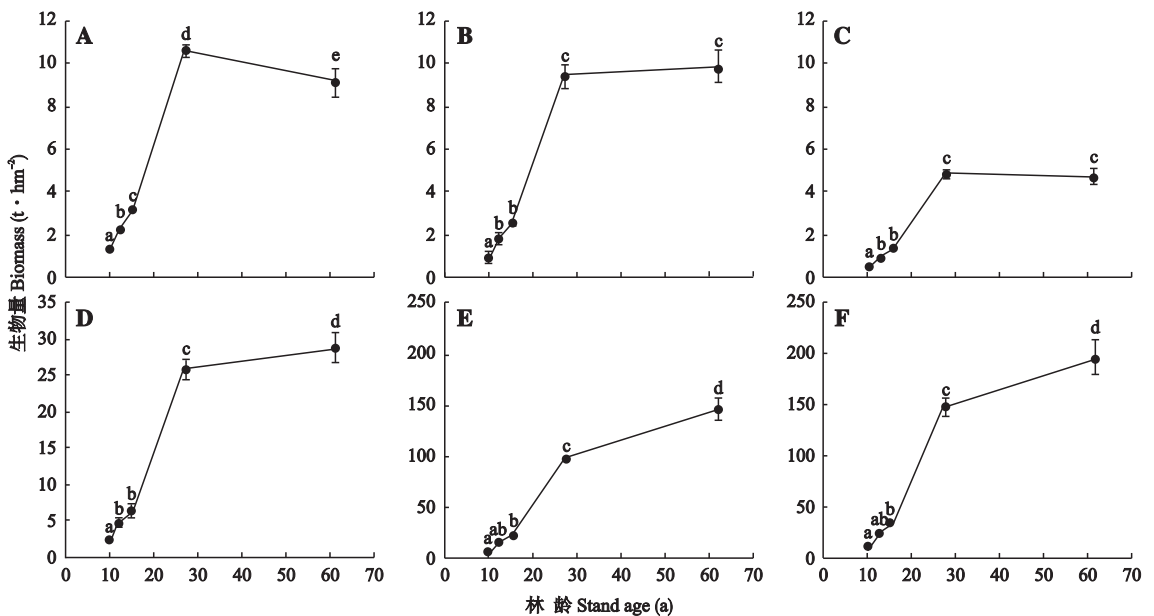


图 1 不同林龄兴安落叶松各器官生物量

Fig. 1 Organic biomass of *Larix gmelinii* at different stand ages (mean±SD).

A: 树皮 Bark; B: 枝 Branch; C: 叶 Leaf; D: 根 Root; E: 树干 Trunk; F: 乔木 Arbor. 不同小写字母表示林龄间差异显著 Different lower case letters indicated significant difference among stand ages. 下同 The same below.

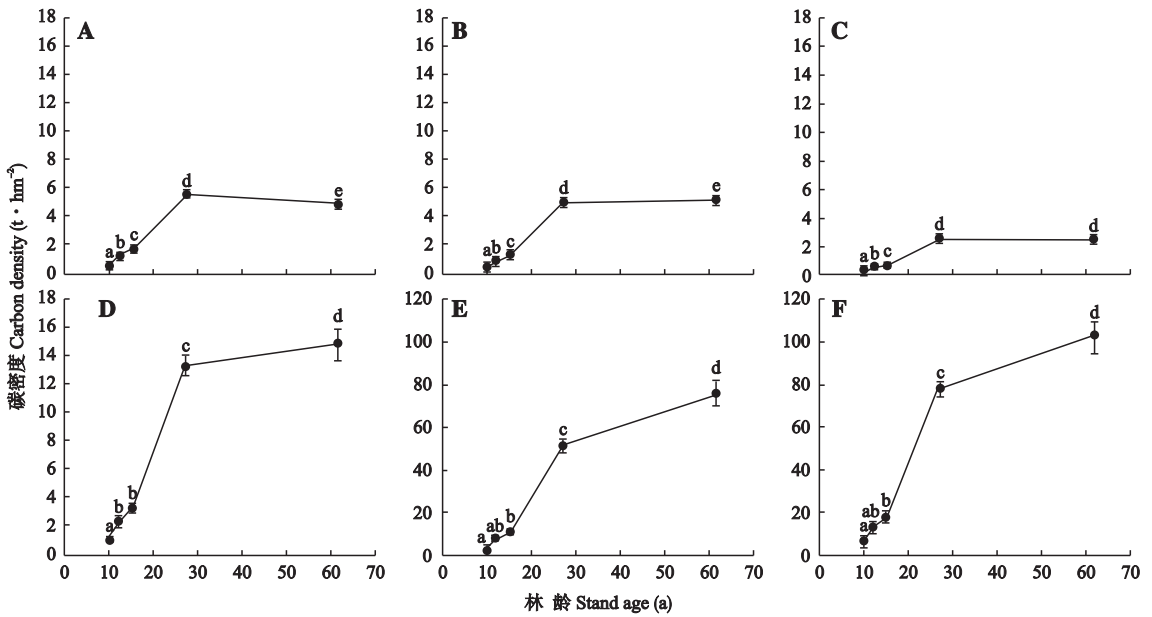


图2 不同林龄兴安落叶松各器官碳库贮量

Fig. 2 Organic carbon pools of *Larix gmelinii* at different stand ages (mean±SD).

以15个调查样方生物量为基础,通过各器官含碳率得到兴安落叶松器官生物量碳分配比率(表4)。由表4可以看出,兴安落叶松各器官碳库占乔木总体碳库的比率随林龄而变化。人工林成熟过程中,乔木碳分配逐渐向树干集中,不同林龄树干碳库占乔木碳库的比率差异显著;其他器官碳库比率随林龄增加而降低,除林龄12和15 a时树皮、枝、叶和根的碳库比率差异不显著外,其余时段差异均显著。

2.4 兴安落叶松人工林植被碳库贮量

由表5可以看出,兴安落叶松人工林乔木碳库和植被碳库都随林龄增加而增加,具有明显的碳汇作用。其中,林龄15~26 a阶段,乔木和植被碳库7年间分别增加3.45和3.31倍;而26~61 a阶段,二

者35年仅增加0.35和0.36倍。我国北方26年生落叶松人工林正处于中龄阶段,生长旺盛,碳库贮量增加迅速。落叶松的碳成熟龄通常在47 a左右^[13],推断林龄47~61 a时,乔木的碳库增速极其缓慢。

草本碳密度初期较高($0.79 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),随着林龄增加而降低,林龄26 a时降至最低($0.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),林龄61 a时又略有回升($0.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。多重比较结果显示,这种差异主要存在于10 a和26 a的兴安落叶松人工林中。

图3为不同林龄兴安落叶松人工林植被年均碳累积。随林龄增加,其年均累积碳量增加,26 a时达到峰值($2.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),随后开始降低。另外,乔木年均碳累积量最大增幅出现在林龄15~26 a阶段(图2),随后开始下降,但是60 a时的年均碳累积量仍大于10~15 a阶段。

表4 兴安落叶松各器官碳库比率

Table 4 Rate of organ carbon storages to arbor carbon pool of *Larix gmelinii* (mean±SD, %)

林龄 Stand age (a)	干 Trunk	皮 Bark	枝 Branch	叶 Leaf	根 Root
10	54.3±0.3a	11.9±0.2a	8.5±0.1a	4.6±0.0a	20.8±0.1a
12	61.0±0.1b	9.0±0.0b	7.3±0.0b	3.8±0.0b	18.9±0.0b
15	59.7±1.1c	9.6±0.4b	7.5±0.2b	4.0±0.1b	19.3±0.4b
26	66.0±0.6d	7.2±0.2c	6.4±0.1c	3.2±0.1c	17.2±0.2c
61	73.9±0.6e	4.6±0.1d	5.0±0.0d	2.3±0.2d	14.2±0.5d

同列不同小写字母表示林龄间差异显著 Different lower case letters in the same column indicated significant difference among different stand ages. 下同 The same below.

表5 不同林龄兴安落叶松人工林植被碳贮量

Table 5 Biomass carbon pool of *Larix gmelinii* plantations at different stand ages (mean±SD, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

林龄 Stand age (a)	乔木 Arbor	草本 Herb	植被 Vegetation
10	5.91±0.73a	0.79±0.25a	6.69±0.73a
12	12.81±2.05b	0.43±0.23ab	13.24±2.27b
15	17.47±2.03c	0.60±0.19bc	18.06±1.88b
26	77.67±3.90d	0.15±0.04c	77.82±3.89c
61	105.20±4.49e	0.49±0.07abc	105.69±4.56d

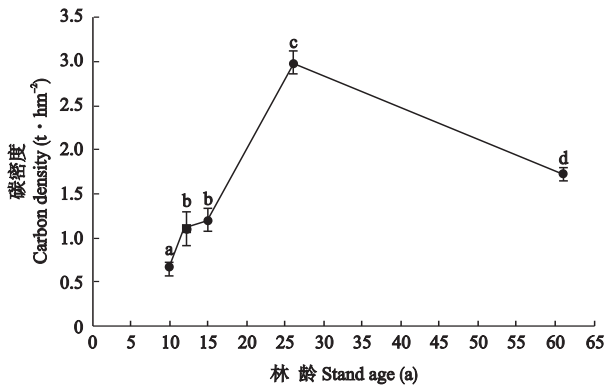


图3 兴安落叶松人工林植被年均碳累积

Fig. 3 Annual vegetation carbon accumulation of *Larix gmelinii* plantations (mean±SD).

3 讨 论

3.1 兴安落叶松人工林植被生物量及碳库特征

3.1.1 乔木生物量 目前对森林植被碳汇的估算普遍采用先测定植被生物量,再乘以生物量中碳元素含量的方法,因此生物量成为研究森林植被碳汇的关键因子^[14].常用的生物量估算方法主要有平均生物量法和生物量扩展因子法.由于实际调查时样方设置多选用优等立地,平均生物量法推算的结果普遍偏大,而生物量扩展因子法的结果普遍偏小^[15].本文基于调查样方内的每木胸径计算每木生物量,累加得到样方生物量.此方法较平均生物量法和生物量扩展因子法更切合样地实际.国内对东北地区落叶松人工林乔木生物量的研究集中于幼中龄(20~40 a)时期,生物量在 27.28~142.36 t·hm⁻²^[6,16-18].本研究 10~61 a 兴安落叶松人工林乔木生物量为 11.27~200.67 t·hm⁻²,幼龄林碳储量略低于以往结果,可能由研究区域和立地类型的差异引起.

以往研究表明,幼中龄林乔木各器官生物量随林龄增加而增加^[19],这与本研究兴安落叶松 15~26 a 器官生物量变化特征相一致.我国人工林多处于幼中龄阶段,缺乏幼中龄林与成、过熟林器官生物量时间变化特征的对比研究^[12,20].本研究中,10~26 a 幼中龄林与 61 a 过熟林器官生物量时间变化特征可以为这方面的研究提供借鉴.落叶松为喜阳树种,生长过程中将大部分生物量分配给树干,以促进高生长,从而获得更多光照^[21].本研究与前人研究结果相符^[12].落叶松人工林各器官生物量最初均随林龄增加而增加,但是林龄为 26~61 a 阶段,除树干和根生物量仍增加外,枝和叶生物量趋于稳定,

而树皮的生物量则明显降低.这是因为幼树将大部分生物量分配到树干和根,以获得更多光照和营养,实现快速生长;随林龄增加,树木将更多生物量分配到干,限制其余器官生物量^[22].落叶松逐年落叶、落皮的特性也可能导致叶和皮生物量下降.本研究兴安落叶松人工林根部生物量比枝、叶高,与以往研究中绝大多数树种的情况相反^[23].兴安落叶松根的碳贮量高于枝、叶或树皮,原因可能有两点:一是兴安落叶松生长较缓慢,导致树种根部碳贮量高于枝叶^[23];二是本研究中的兴安落叶松人工林分布于高纬度地区,气候寒冷、生长季短,从而导致生长更加缓慢.

3.1.2 植被碳贮量 如果采用相同的含碳率,各器官碳贮量大小及变化特征必然与生物量大小和变化特征完全一致.国内外相关研究中植被含碳率常采用 0.45 或 0.50^[24-26],但我国针叶树平均含碳率大多高于 0.5^[27].部分文献采用东北地区落叶松含碳率 0.52^[6,28]为生物量碳转换系数.而本文以大兴安岭北部地区兴安落叶松的器官含碳率为依据,分别计算各器官以及乔木碳库,所得结果更具针对性和准确性.本研究针对不同器官采用不同含碳率,所得器官碳库大小及变化特征与生物量并不完全一致,主要表现为林龄 26~61 a 阶段,枝和叶的生物量趋于稳定,而碳贮量却略有减少(图 1 和图 2).各器官碳贮量占乔木碳贮量的比率进一步表明,兴安落叶松人工林成熟过程中,乔木碳库有向树干集中的趋势(表 4).

本研究中草本碳贮量仅有 0.15~0.79 t·hm⁻²,呈现最初随林龄增加而减少,后期又增加的趋势(表 5),这是因为草本植物受森林光照条件的强烈影响.造林初期乔木郁闭度低,草本生长旺盛;郁闭度随林龄增加而增加,林下层光照强度逐渐变弱,草本生长受抑制;到达过熟林阶段,由于乔木自疏和择伐使林下层光照强度增加,草本生长条件改善,碳贮量也随之增加.

我国东北地区植被碳贮量平均值在 42.07~93.19 t·hm⁻²^[15,29],此平均值在本文研究结果(6.69~105.69 t·hm⁻²)之间,可见大兴安岭落叶松人工林植被碳贮量变动幅度较大,应严格根据林龄设置样地以便准确估算.植被碳贮量总体呈现随林龄增加而增加的趋势,与乔木碳贮量的变化相一致.东北地区长白落叶松(*L. olgensis*)和日本落叶松(*L. kaempferi*)人工林在 25 a 时年均碳累积量分别为 1.9 和 3.1 t·hm⁻²^[13].本研究兴安落叶松 26 a

时年均碳累积量为 $3.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 3), 固碳能力接近日本落叶松的水平. 由于东北地区落叶松人工林多为短期丰产林或工业用材林, 轮伐期一般不超过 40 a, 使得以往对落叶松人工林碳贮量的研究多限于 40 a 之内^[13]. 本研究对 61 a 兴安落叶松人工林碳贮量的分析在年龄梯度上为相关研究提供借鉴.

3.2 兴安落叶松人工林碳贮量与合理经营的关系

已有研究认为, 我国东北地区的森林具有“碳汇”作用^[5,30]. 本研究中, 10 ~ 61 a 间兴安落叶松人工林植被碳贮量随林龄而增加, 61 a 时增加至 $200.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 碳汇作用显著.

以往人工林经营主要以获取木材为主要目的, 较少兼顾生态效益. 东北地区每年因过度采伐和毁林导致 $0.021 \sim 0.023 \text{ Pg C}$ 的碳库损失, 使东北陆地总体表现为碳源^[31]. 在温室效应加剧的背景下, 人工林碳库兼备着重要的生态效益和经济潜力. 这向传统森林经营理念和经营方式提出新的挑战.

采伐方式和轮伐期是森林经营过程中影响碳贮量的两个重要方面, 有关如何确定合理的采伐方式和轮伐期来增加兴安落叶松人工林碳贮量的研究目前仍较匮乏. 为充分发挥大兴安岭地区落叶松人工林固碳潜力, 建议在森林经营管理时应当注意以下两点:

1) 采用“茎干伐”, 林地内保留采伐剩余物. 树干是乔木生物量的主体, 也是落叶松人工林林产品中最具经济效益的乔木器官. 本研究中兴安落叶松人工林植被碳库以乔木碳库为主, 主要碳储存器官为树干. 就经济利益而言, 树干是采伐作业中必需的林产品. 但是经济价值较低的枝、皮、叶、根等其他器官碳贮量占乔木总体碳贮量的 $26.1\% \sim 45.7\%$ (表 4), 其生态固碳效益远远大于经济效益. 因此在选择采伐方式时, 应采取只采伐树干的“茎干伐”措施, 将采伐剩余物保留在林地内, 通过枯落物碳库逐步进入土壤碳库, 达到长期固定碳的目的.

2) 制定有利于发挥固碳潜力的合理轮伐期. 根据我国兴安落叶松速生丰产林的专业标准^[32], 该地区兴安落叶松人工林轮伐期为 30 ~ 40 a. 由于本研究缺乏林龄 30 ~ 40 a 的样地数据, 难以确定该时期兴安落叶松人工林植被碳库的具体变化特征. 本研究结果证明中龄阶段落叶松碳汇功能最大(图 2), 但是从年均碳累积量(图 3)可知, 60 a 时该地区兴安落叶松人工林植被年均碳累积速率仍保持较高水平, 且明显大于 15 a 之前的累积速率, 固碳效益依旧明显. 而兴安落叶松人工林成熟过程中, 乔木生物

量和碳贮量出现向树干集中的趋势(表 4), 说明树干在 60 a 时依旧可以累积较多的生物量, 保持较高的经济效益. 鉴于此, 建议将轮伐期延长至 60 a, 在保证经济利益的前提下, 充分发挥兴安落叶松人工林的固碳潜力.

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 945-958
- [2] Wang Q-L (王庆礼), Chen G (陈高), Dai L-M (代力民), et al. Ecosystem Health—Theory and Application. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2007 (in Chinese)
- [3] Liu G-H (刘国华), Fu B-J (傅伯杰), Fang J-Y (方精云). Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(5): 733-740 (in Chinese)
- [4] Dai LM, Wu G, Zhao JZ, et al. Carbon cycling of alpine tundra ecosystems on Changbai Mountain and its comparison with arctic tundra. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, **45**: 903-910
- [5] Wang S-Q (王绍强), Zhou C-H (周成虎), Liu J-Y (刘纪远), et al. Simulation analyses of terrestrial carbon cycle balance model in Northeast China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2001, **56**(4): 390-400 (in Chinese)
- [6] Sun Y-J (孙玉军), Zhang J (张俊), Han A-H (韩爱惠), et al. Biomass and carbon pool of *Larix gmelinii* young and middle age forest in Xing'an Mountains Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(5): 1756-1762 (in Chinese)
- [7] Liu Z-H (刘志华), Chang Y (常禹), Chen H-W (陈宏伟), et al. Spatial pattern of land surface dead combustible fuel load in Huzhong forest area in Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 487-493 (in Chinese)
- [8] Goyal S, Chander K, Mundra M, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **29**: 196-200
- [9] Yu B (玉宝), Wu J-S-G-L (乌吉斯古楞), Wang B-T (王百田), et al. Study on the distribution pattern characteristics of different stand structures in *Larix gmelinii* natural forest. *Forest Research* (林业科学研究), 2010, **23**(1): 83-88 (in Chinese)
- [10] Liu Z-G (刘志刚), Ma Q-Y (马钦彦), Pan X-L (潘向丽). A study on the biomass and productivity of the natural *Larix gmelinii* forests. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1994, **16**(4): 328-337 (in Chinese)

- [11] Yan P (闫 平), Gao S-C (高述超), Liu D-J (刘德晶). The comparative study about the carbon storage of vegetation and soil in three types of *Larix gmelinii* forests. *Forest Resources Management* (林业资源管理), 2008(3): 77-81 (in Chinese)
- [12] Mei L (梅 莉), Zhang Z-W (张卓文), Gu J-C (谷加存), et al. Carbon and nitrogen storages and allocation in tree layers of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(8): 1791-1796 (in Chinese)
- [13] Yin M-F (殷鸣放), Zhao L (赵 林), Chen X-F (陈晓非), et al. Carbon storage maturity age of *Larix olgensis* and *L. kaempferi*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(12): 2567-2571 (in Chinese)
- [14] Cheng T-R (程堂仁), Feng Q (冯 菁), Ma Q-Y (马钦彦), et al. Carbon pool and allocation of forest vegetations in Xiaolong Mountains, Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(1): 33-43 (in Chinese)
- [15] Fang JY, Chen AP, Peng CH, et al. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China Between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320-2322
- [16] Liu S-R (刘世荣), Chai Y-X (柴一新), Cai T-J (蔡体久), et al. Study on biomass and net primary productivity of Dahurian larch plantation. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 1990, **18**(2): 40-46 (in Chinese)
- [17] Zhang J (张 俊). Study on Community Structure, Biomass and Carbon Storage of *Larix gmelinii* Plantation. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2008 (in Chinese)
- [18] Yang Y-L (杨玉林), Gao J-B (高俊波), Cao F (曹飞), et al. Effects of tending felling on larch growth. *Jilin Forestry Science and Technology* (吉林林业科技), 2003, **32**(5): 21-24 (in Chinese)
- [19] Zhang L (张 林), Huang Y (黄 永), Luo T-X (罗天祥), et al. Age effects on stand biomass allocations to different components; A case study in forests of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (中国科学院研究生院学报), 2005, **22**(2): 170-178 (in Chinese)
- [20] Mu C-C (牟长城), Wan S-C (万书成), Su P (苏平), et al. Biomass distribution patterns of *Alnus hirsuta* and *Betula platyphylla*-swamp ecotone communities in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(2): 2211-2216 (in Chinese)
- [21] Givnish TJ. Adaptive significance of evergreen vs. deciduous leaves: Solving the triple paradox. *Silva Fennica*, 2002, **36**: 703-743
- [22] Kozlowski TT, Kramer PJ, Pallardy SG. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. New York: Academic Press, 1991
- [23] Wright IJ, Westoby M. Cross-species relationships between seedling relative growth rate, nitrogen productivity and root vs leaf function in 28 Australian woody species. *Functional Ecology*, 2000, **14**: 97-107
- [24] Fang J-Y (方精云), Liu G-H (刘国华), Xu C-L (徐崇龄). Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1996, **16**(5): 497-508 (in Chinese)
- [25] Fang JY, Guo ZD, Piao SL, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**: 1341-1350
- [26] Wang X-K (王效科), Feng Z-W (冯宗炜), Ouyang Z-Y (欧阳志云). Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(1): 13-16 (in Chinese)
- [27] Ma Q-Y (马钦彦), Chen X-L (陈遐林), Wang J (王娟), et al. Carbon content rate in constructive species of main forest types in Northern China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2002, **24**(5/6): 96-100 (in Chinese)
- [28] Wang X-J (王雪军), Huang G-S (黄国胜), Sun Y-J (孙玉军), et al. Forest carbon storage and dynamics in Liaoning Province from 1984 to 2000. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(10): 4757-4764 (in Chinese)
- [29] Xu X-L (徐新良), Cao M-K (曹明奎), Li K-R (李克让). Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2007, **26**(6): 1-10 (in Chinese)
- [30] Zhao J-F (赵俊芳), Yan X-D (延晓冬), Jia G-S (贾根锁). Simulation of carbon stocks of forest ecosystems in Northeast China from 1981 to 2002. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(2): 241-249 (in Chinese)
- [31] Piao SL, Fang JY, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, **458**: 1009-1013
- [32] Chen X-Q (陈效群), Zhong C-Q (仲崇琪), Qi W-J (戚维江), et al. Fast growing and high yield plantation of Olga Bay Larch (*Larix olgensis*) and Dahurian Larch (*Larix gmelini*). China, ZB B 64002-1986. 1986-9-6 (in Chinese)

作者简介 齐 光,男,1983年生,博士研究生。主要从事森林生态与森林碳汇研究。E-mail: qiguang594@163.com

责任编辑 李凤琴