

不同林龄长白落叶松人工林碳储量

马 炜¹, 孙玉军^{1,*}, 郭孝玉¹, 巨文珍¹, 穆景森²

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 黑龙江朗乡林业局, 黑龙江铁力 152519)

摘要: 基于 7—41a 长白落叶松人工林样地生物量调查, 探讨了不同发育阶段长白落叶松人工林碳储量的时空变化规律。结果表明: 随林龄的增大, 长白落叶松人工林林木和各器官生物量增加, 树干所占比例增加, 生物量转换因子 (*BEF*)、根茎比 (*R*) 等参数分布正常。林下植被层、倒落木质物层生物量随林龄增大呈增加趋势。群落总碳储量的空间分布序列是: 乔木层 > 倒落木质物层 > 林下植被层。未成林期、幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林群落的碳储分别为 6.585、66.934、90.019、125.103、162.683 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 乔木层碳储量分别为 3.254、58.521、78.086、108.02、138.096 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 倒落木质物层和林下植被层碳储量平均值分别为 10.859、1.988 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。乔木层、倒落木质物层和林下植被层碳储量占总量的平均比率分别为 85.99%、2.17% 和 11.85%。在不同发育阶段群落和乔木层碳储量的年生产力呈先降后升的变化趋势, 中龄林的碳储量累积速率高于幼龄林及成熟林, 碳素年固定量分别为 0.940、3.889、3.615、3.628、3.968 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 乔木层年生产力分别为 0.465、3.39、3.137、3.133、3.368 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。林下植被层年生产力呈“U”形变化, 平均值为 0.079 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。倒落木质物层的年生产力呈线性增长, 平均值为 0.423 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。研究认为长白落叶松人工林群落碳储量随林龄增加的变化规律明显, 碳汇潜力巨大。

关键词: 长白落叶松; 人工林; 林龄; 生物量; 碳储量

Carbon storage of *Larix olgensis* plantation at different stand ages

MA Wei¹, SUN Yujun^{1,*}, GUO Xiaoyu¹, JU Wenzhen¹, MU Jingsen²

1 Ministry of Education Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Langxiang Forestry Bureau, Heilongjiang Province, Tieli 152519, China

Abstract: Forest carbon storage usually increases with stand age. Most studies focus on the carbon storage of arbor layer, however there are few in-depth studies on the allocations for different layers of community varying with stand age. In this paper, biomass has been estimated and carbon storage and immobilization at different ages in *Larix olgensis* plantation have been studied, based on the survey of sample plots in *Larix olgensis* plantation ranging from 7 to 41 years in representative region of Lesser Khingan Mountains (Northeast of China). The methods of allometric dimension analysis and sampling harvest (quadrat or transect sampling method from Forest Inventory and Monitoring, US) were used to investigate the biomass of arbor layer, understory vegetation layer and down woody materials (DWM) layer. Carbon content in different organs of *Larix olgensis* were determined using an ELEMENTAR Vario EL III CN Analyzer. The main results are as follows: (1) The biomass of both arbor layer and organs along with the proportion of stem increased significantly with stand age. For understory vegetation layer and DWM layers, the biomass changed in the same tendency. Fitness of the equations for arbor layer was good, and the change of parameters, such as biomass expansion factor (*BEF*) and root/shoot ratio (*R*) were in normal level. For example, the value of *R* was high in early age and then gradually tended to a steady state. (2) Total carbon storage of community increased with stand age, and is in sequence of arbor, DWM, and understory. At different vegetative stages carbon storage were 6.585 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 66.934 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 90.019 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 124.603 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 162.683 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, for immature, juvenile, middle-aged, near-mature and mature stand respectively. For carbon storage of arbor layer were 3.254 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 58.521 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 78.086 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 108.02 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 138.096 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$. Mean carbon storage of understory and

基金项目: 国家自然科学基金(30940014); 林业公益性行业科研专项经费(200904003-1); 国家林业局 948 项目(2008-4-48); 高等学校博士学科点专项科研基金(20060022009)

收稿日期: 2010-03-07; **修订日期:** 2010-05-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunyj@bjfu.edu.cn

DWM layers were $10.859 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1.863 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The proportions of arbor, DWM and understory layers were 86.10%, 2.04% and 11.86%, differences among the ages became littler gradually with the augmentation in stand age. (3) The dynamic trend of carbon immobilization in different stages enhanced at the very beginning, and then declined. The accumulation rate of carbon storage in middle-aged stand was higher than those at other stages. Carbon immobilization of community were $0.940 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.889 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.615 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.628 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.968 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and that of arbor layer were $0.465 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.137 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.133 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $3.368 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. With the trend appearing as U-shaped line, immobilization in understory layer had a decreasing duration (from 7 a to 19 a) while DWM layer was going up linearly. The mean immobilization for understory and DWM layers were $0.079 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $0.423 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. In conclusion, our study shows that carbon storage and distribution patterns in *Larix olgensis* plantation expressed obvious dynamic variations with stand age. We expected that our in-depth analysis can provide insight into the methods for estimating carbon storage and dynamic change laws in forest community at different ages. It can also be concluded that *Larix olgensis* plantations as an important and widely distributed plantations over northeast China, have huge carbon storage potential in the future.

Key Words: *Larix olgensis*; plantation; stand age; biomass; carbon storage

随着“退耕还林”和“防护林建设”等林业工程的实施,我国人工林面积快速增加,人工林在生物量及 CO_2 吸收和固定等方面的作用越来越得到重视^[1-3]。近十几年来,国内外不同森林类型的生物量碳储量研究取得重大进展^[4-5],但多限于林木和某一林龄下的生物量研究,对群落生物量随林龄变化的积累和分布的综合性系统研究不多见^[6-8]。为此,本研究以东北地区长白落叶松(*Larix olgensis*)人工林为研究对象,从林木个体、群落各层及总体水平上探讨不同发育阶段下人工林群落生物量的时空分布特征和分配规律。这将为长白落叶松人工林群落碳汇功能与林分经营的研究及东北林区森林后备资源的培育提供基础数据和理论参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地位于小兴安岭南麓伊春市东折棱河林场(北纬 $46^{\circ}31'$ — $46^{\circ}49'$ 、东经 $128^{\circ}55'$ — $129^{\circ}15'$),处于黑龙江省中部松嫩平原与小兴安岭过渡的低山丘陵区域,平均坡度 7° ,森林土壤为暗棕壤,土层厚度 30—60 cm,石砾稀少。该区年平均气温 0.36°C 左右,年积温 2050°C ,年降水量 618 mm,相对湿度 68%,年无霜期 100 d,年日照时数 2453 h,属北温带大陆性湿润性季风气候。在植物生长旺季(7、8 月份),选择典型的长白落叶松人工林分设置标准地,根据海拔、坡向、土层厚度等相似的原则实现立地条件的相近。林分经历人工抚育管理及自然稀疏,林龄分布 7—41 a,包括未成林期和幼、中、近熟、成熟 4 个龄级,林分基本特征因子见表 1。长白落叶松人工林林分树种较单一,长白落叶松蓄积量占 90% 以上,为绝对优势树种。林下灌木主要有东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)、金花忍冬(*Lonicera chrysantha*)、刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、小花溲疏(*Deutzia parviflora*)等,平均盖度为 8%。草本主要有白花碎米荠(*Cardamine leucantha*)、蚊子草(*Filipendula palmata*)、苔草(*Carex callitrichos*)、蕨(*Pteridium aquilinum*)、水金凤(*Impatiens noli-tangere*)等,平均盖度为 53%。林下木质物残体(Down Woody Materials, DWM)为针阔叶树种的倒木、大枝、细枝叶等组成的细木质物(Fine Woody Debris, FWD)、粗木质物(Coarse Woody Debris, CWD)和剩余堆积物(Residue Pile, RP)。

1.2 研究方法

采用美国森林资源清查与监测体系(Forest Inventory and Monitoring, FIM)的调查方法^[9-10],在每个整群样地设置 3 个或 4 个子样圆,面积 505.1 — 673.5 m^2 ,对样圆内的样方、样圆和样线进行调查。根据每木调查结果在样地外选出 2—3 株标准木伐倒,共计标准木 18 株,分别利用“分层切割”法、“分层挖掘法”测定地上和地下根系生物量^[7,11]。林下植被层(灌木、草本)以及木质物残体层中细木质物生物量采用“收获法”直接测定,包括 $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本样方 90 个,半径 2.4 m 的灌木样圆 24 个和 5.69 m 的细木质物样线 66 条^[10]。木质

物残体层粗木质物和剩余堆积物均根据两头直径、长度等因子计算的蓄积量来推算生物量^[12-13],其中 14.64m 的粗木质物调查样线 24 条,半径 7.32m 的剩余堆积物样圆 38 个。

将采集的林木等各层器官样品在 105℃烘干,得到干物质重即生物量。单株木根据各器官生物量模型估算各器官和林分生物量,林下植被层和木质物残体层生物量则根据抽样比例进行推算。植物生物量转化为碳量是按照植物干有机物中碳所占的比重。经实验测定,长白落叶松树干、树枝、树叶和树根的平均含碳率分别为:0.5150、0.5212、0.5075 和 0.5332。木质物残体层以及林下植被层碳储量则采用常见的 0.45 的碳转化率^[14]。

表 1 不同林龄长白落叶松人工林林分基本特征及调查因子
Table 1 Basic status of sampling sites of *Larix olgensis* plantation at different ages 样地

样地 Plot No.	林龄 Age /a	海拔 Altitude /m	坡度 Slope degree /(°)	坡向 Aspect /(°)	坡位 Slope position	土层厚度 Soil depth /cm	平均胸径 DBH /cm	平均树高 Height /m	林分密度 Density /(株·hm ⁻²)	郁闭度 Crown density
1	7	300	9	SW60	Lower	40	3.0	3.0	1663	0.16
2	15	308	7	SE62	Bottom	45	11.5	12.4	1623	0.65
3	19	296	7	SW30	Middle	46	12.7	13.9	1560	0.76
4	23	354	10	SW6	Bottom	45	15.2	15.8	1352	0.83
5	27	304	5.5	SE39	Lower	43	15.8	16	1114	0.80
6	32	376	6	SE15	Upper	40	16.1	16.3	936	0.75
7	37	383	6	SW58	Upper	37	16.6	17.2	783	0.73
8	41	309	9	SE75	Lower	55	27.4	26.3	520	0.57

2 结果与分析

2.1 不同林龄林木生物量及其分配

2.1.1 林木各器官生物量及其分配

从表 2 可见,长白落叶松人工林单株木和各器官生物量均随林龄增大而增加,体现了该树种具有的速生特性。不同年龄林木各器官生物量大小的排序明显,7 年生未郁闭林为树叶>干材>树枝>根系>树皮>枯枝,15、19、23、27 年生为干材>根系>树皮>活枝>树叶>枯枝,32 年生和 37 年生为干材>活枝>树皮>根系>树叶>枯枝,41 年生为干材>活枝>根系>树皮>树叶>枯枝。从生物量分配而言,树干所占比例增

表 2 不同林龄长白落叶松各器官生物量及分配
Table 2 Component-specific biomass of *Larix olgensis* at different ages

指标 Item	组分 Component	林龄 Age/a								平均 Mean
		7	15	19	23	27	32	37	41	
生物量 /(kg·hm ⁻²) Biomass	干材	0.796	24.143	42.563	49.264	62.643	81.646	139.888	307.0	88.493
	树皮	0.197	5.517	8.649	9.028	9.057	11.102	19.354	35.411	12.289
	活枝	0.564	3.038	8.032	11.443	13.658	35.586	36.968	42.852	19.018
	死枝	0.003	3.117	4.337	5.179	11.074	9.195	5.171	3.627	5.213
	叶	1.055	3.573	4.185	4.69	4.77	10.071	11.965	14.252	6.820
	根系	0.562	6.891	10.12	12.451	12.745	16.102	27.646	63.809	18.791
	合计	3.177	46.279	77.886	92.055	113.947	163.702	240.992	466.951	150.624
分配比/% Ratio	干材	25.06	52.17	54.65	53.52	54.98	49.87	58.05	65.75	51.75
	树皮	6.20	11.92	11.10	9.81	7.95	6.78	8.03	7.58	8.67
	活枝	17.75	6.56	10.31	12.43	11.99	21.74	15.34	9.18	13.16
	死枝	0.09	6.74	5.57	5.63	9.72	5.62	2.15	0.78	4.54
	叶	33.21	7.72	5.37	5.09	4.19	6.15	4.96	3.05	8.72
	根系	17.69	14.89	12.99	13.53	11.19	9.84	11.47	13.67	13.16

加的趋势最明显,由 25.06% 上升到 65.75%。树叶随年龄的增大而减小的趋势最明显,由 33.21% 下降到 3.05%,这与落叶松叶同小枝一起脱落而减少了叶生物量积累的生长习性有关。活树枝和死枝的比例呈减小趋势,树皮比例则保持在 8.16% 左右,根系比例减小后稳定在 12.48% 左右。可见,长白落叶松各器官生物量的变化主要是因为长白落叶松林 7—41a 中自身的生长发育,以及随着自然稀疏和人工抚育产生林分郁闭变化的影响。

2.1.2 林分生物量及分配

结合样地调查资料和样木生物量数据,以胸径和树高组合因子 D^2H 为自变量,拟合并筛选得到适用于 7—41a 统一的生物量回归方程(表 3)。从相关系数和标准差等方面分析,所得到方程对生物量估算的效果较理想。应用生物量方程计算林分各组分生物量,结果表明:长白落叶松平均单株木生物量达 129.753 kg,其中树干、树冠及根系平均生物量为 84.74、16.105、28.909 kg。从表 4 可知,虽然随林龄增大林分密度减少,但乔木层生物量稳步增加,41 年生为 $242.815 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别是 15、23 年生和 32 年生的 3.23、1.95 和 1.58 倍。地上部分生物量所占比例在 80% 以上,其中树干所占比例最高,达 56% 以上,41 年生时占全株生物量的 73.33%。树冠生物量在林分郁闭后于 32a 达到峰值 $51.341 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,以 7 年生未成林期所占比例 51.05% 为最大,41 年生成熟林比例 13.01% 最小。根系生物量以 7 年生平均木单株所占比例最大,然后随林龄的增加而减少。可见,长白落叶松在 15—41a 间为干材期,树干逐渐占据生物量主导地位。同时人工抚育达到林木径级变化幅度减小、平均胸径和生物量变大的预期效果。

表 3 长白落叶松人工林生物量估算方程

Table 3 Regression equations for *Larix olgensis* plantation

组分 Component	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Coefficient of determination	标准差 SD Standard Deviation	显著性 Sig. Significance
树干 Trunk	$W = -0.539 + 187.793(D^2H)$	0.998	4.639	0.000
树冠 Crown	$W = -3.033 + 102.027(D^2H) - 36.716(D^2H)^2$	0.862	9.990	0.007
树根 Root	$W = 1.099 + 30.051(D^2H) + 2.289(D^2H)^2$	0.999	0.817	0.000
地上 Abg	$W = 17.765 + 279.31(D^2H) - 96.104(D^2H)^2$	0.968	13.268	0.000
单株木 Tree	$W = 12.083 + 254.556(D^2H)$	0.988	17.709	0.000

表 4 不同林龄落叶松林分各组分生物量及分配比率

Table 4 Biomass and allocation proportion of components of *Larix olgensis* at different ages

指标 Item	组分 Component	林龄 Age/a								平均 Mean
		7	15	19	23	27	32	37	41	
生物量 $/(t \cdot \text{hm}^{-2})$ Biomass	树干	1.651	48.138	79.891	78.811	79.874	86.812	124.686	178.054	84.740
	树冠	2.697	15.789	25.824	28.814	32.865	51.341	42.363	31.580	28.909
	树根	0.935	11.184	15.787	16.834	14.198	15.071	21.647	33.181	16.105
	地上	4.349	63.927	105.715	107.625	112.739	138.154	167.050	209.634	113.649
	合计	5.283	75.111	121.502	124.458	126.937	153.225	188.697	242.815	129.753
分配比/% Ratio	树干	31.26	64.09	65.76	63.32	62.92	56.65	66.08	73.32	65.31
	树冠	51.05	21.02	21.25	23.15	25.89	33.51	22.45	13.01	22.28
	树根	17.69	14.89	12.99	13.53	11.19	9.84	11.47	13.67	12.41
	地上	82.31	85.11	87.01	86.47	88.81	90.16	88.53	86.33	87.59

2.1.3 生物量估算参数值

如图 1 所示,长白落叶松生物量转换因子(BEF)在 0.4129—0.6130 之间变动,随林龄增大而变大。根径比(R)在 0.5660—0.1736 之间变动,随林龄增加而趋于稳定。根冠比(Root/Crown, R/C)在 0.2936—1.0507 之间变动,随林龄而起伏变化。林木非同化器官(干、枝、根)与光合作用器官(叶)比(non-assimilating/

assimilation organs, C/F) 在 11.9524—31.7639 之间变动,随林龄增加而变大。 BEF 、 R 、 R/C 及 G/F 平均值(剔除 7 年生各项参数值)分别为 0.5236、0.1936、0.5672 和 19.6056,与其它落叶松研究结果较一致^[10,15]。

2.2 不同发育阶段林下生物量及其分配

2.2.1 林下植被层

随林龄增长长白山落叶松林林下灌木生物量呈持续增大的趋势,草本层则先降后升^[16]。从表 5 可知,7、15 年生林处于造林初期,灌木极少,草本种类多且长势好,所占比例高于 90%,林下植被生物量分别为 4.838 $t \cdot hm^{-2}$ 和 2.237 $t \cdot hm^{-2}$ 。此后二者比例逐渐稳定,在 72.65% 和 27.35% 左右,林下植被生物量在 19 年生林分的最少,为 2.063 $t \cdot hm^{-2}$,随后开始增加,至 41a 已高达 11.352 $t \cdot hm^{-2}$ 。林下植被层生物量呈先降后升的变化趋势,虽然自身储量少,却直观反映了林分郁闭度的变化和人工抚育的影响^[17]。

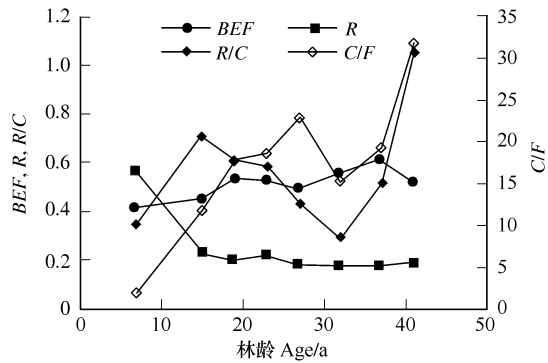


图1 不同林龄长白落叶松的 BEF 、根径比、根冠比、非同化和光合作用器官比

Fig.1 BEF , R , R/C , C/F for *Larix olgensis* at different ages

表 5 不同林龄落叶松人工林林下植被层生物量及分配

Table 5 Biomass and allocation proportion of shrub and herb of <i>Larix olgensis</i> stand at different ages										
指标 Item	林下植被层 Understory	林龄 Age/a								平均 Mean
		7	15	19	23	27	32	37	41	
生物量 /($t \cdot hm^{-2}$)	灌木层	0.029	0.210	1.383	1.901	2.909	3.038	4.925	9.206	2.950
	草本层	4.808	2.027	0.680	0.815	1.025	1.359	1.663	2.147	1.816
Biomass	合计	4.838	2.237	2.063	2.715	3.934	4.397	6.588	11.352	4.418
分配比/%	灌木层	0.61	9.38	67.04	69.98	73.94	69.09	74.76	81.09	61.90
	草本层	99.39	90.62	32.96	30.02	26.06	30.91	25.24	18.91	38.10

2.2.3 木质物残体层

研究认为木质物残体层生物量与乔木层关系紧密,一般随林龄增大而增加,有利于减缓地力衰退,并促进森林碳库向土壤碳库的转化^[18]。从表 6 可见,细木质物生物量最大,平均 19.014 $t \cdot hm^{-2}$,但所占比率则逐渐减小,平均为 78.79%。剩余堆积物生物量较少,平均 4.869 $t \cdot hm^{-2}$,所占比率也逐渐增加,平均达到 20.18%。此外,倒木等粗木质物生物量最少,平均仅 0.248 $t \cdot hm^{-2}$,平均比率约 1%。在 7a 未成林期木质物生物量较少,15—41a 间稳步增长,41a 达到 43.286 $t \cdot hm^{-2}$,约为乔木层生物量 1/3。由于气候及其它生态因子限制,研究发现木质物残体层分解和转化速度慢,现存量可观。

表 6 不同林龄长白落叶松人工林木质物残体层生物量及分配

Table 6 Biomass and allocation of FWD,CWD and residue pile in <i>Larix olgensis</i> plantation stand										
指标 Item	木质物残体 DWM	林龄 Age/a								平均 Mean
		7	15	19	23	27	32	37	41	
生物量 /($t \cdot hm^{-2}$)	细木质物	5.285	14.498	16.419	18.021	18.849	24.276	26.083	28.679	19.014
	粗木质物	0.000	0.030	0.061	0.094	0.143	0.247	0.401	1.011	0.248
Biomass	剩余堆积物	0.059	0.275	1.809	4.094	5.189	6.033	7.896	13.596	4.869
	合计	5.344	14.803	18.288	22.209	24.181	30.556	34.380	43.286	24.131
分配比/%	细木质物	98.89	97.95	89.78	81.14	77.95	79.45	75.87	66.25	78.79
	粗木质物	0.00	0.20	0.33	0.42	0.59	0.81	1.17	2.34	1.03
Ratio	剩余堆积物	1.11	1.85	9.89	18.43	21.46	19.74	22.97	31.41	20.18

2.3 群落碳储量分布及生产力

2.3.1 群落碳储量时空分布格局

结合生物量数据及含碳率计算,可得到长白落叶松人工林碳储量。从图2可见,7年生未成林地碳储量低,之后持续增长,41年生成熟林群落和乔木层碳储量达到最大值 $138.096 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $162.683 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。群落及乔木层碳储量在近成熟期增长加快,整体呈“S”形特点。在7—41a间,木质物残体层碳储量呈线性增加($R^2 = 0.9719, P < 0.001$),在41a达到最大值 $19.479 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;林下植被层碳储量呈二次曲线增长($R^2 = 0.9567, P < 0.001$),23—41a间增速大于7—23a,在41a达到最大值 $5.108 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。研究表明,长白落叶松人工林在未成林期、幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的群落平均碳储量为6.585、66.934、90.019、125.103、 $162.683 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,乔木层碳储量为3.254、58.521、78.086、108.02、 $138.096 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。群落碳储量与林龄正相关($R^2 = 0.9138, P < 0.001, n = 8$),平均值为 $91.672 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,空间分布序列是:乔木层>倒落木质物层>林下植被层,乔木是群落中最大的生产者。

从图3所示碳储量分配结构来看,15—41年生林分各层碳储量所占比例无较大波动,而7年生未成林地与郁闭林分差异较大。乔木层、木质物残体层和林下植被层碳储量所占的平均比率分别为85.99%、11.85%和2.17%,与国内相关研究结果相似^[19-20]。其中,乔木层碳储量分别相当于木质物层和林下植被层的7.25、39.65倍,占据主导地位,直接反映了人工林群落有机物质生产与积累的水平。而林下植被层碳储量比例明显偏小,反映了人为干扰的影响,也体现了人工林群落生物多样性的不稳定性。此外,木质物残体层作为森林碳库和土壤碳库之间重要的过渡层次,在群落碳储量中不可忽视。

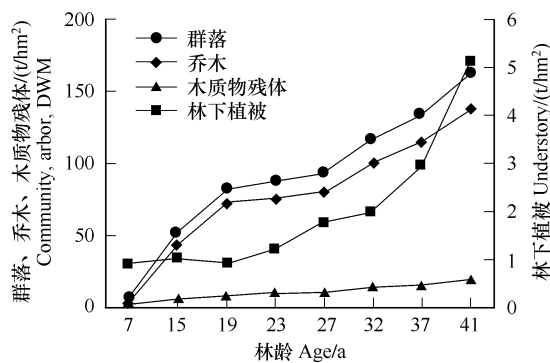


图2 不同林龄群落和各层次碳储量动态变化

Fig. 2 Carbon storage of community and layer

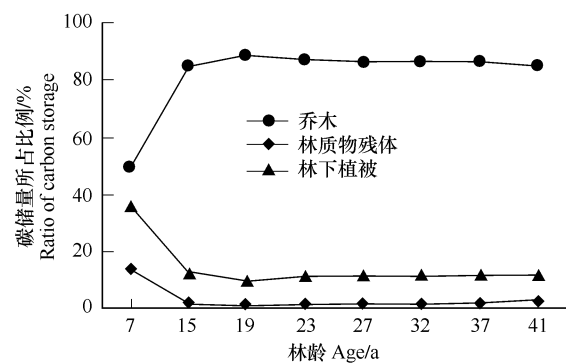


图3 不同林龄群落各层次碳储量所占比例

Fig. 3 Proportions of carbon storage to each layer

2.3.2 群落碳素年固定量

由图4可见,群落碳素年固定量随林龄起伏变化明显,幼中龄林及成熟林生高于未成林地及近熟林,平均值为 $3.396 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。乔木层碳素年固定量平均值为 $2.894 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,7—23a由于光热充足且林木竞争不激烈,生产力较高;此后林木竞争加剧导致枯损,生产力在23—37a间处于低缓水平;在37—41a间抚育及自疏加快了林木生长,生产力逐步回升。林下植被层碳素年固定量平均为 $0.079 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,在未成林和低林分密度的成熟林阶段较高,在15—37a受到乔木树冠抑制碳素年固定量趋于平稳,呈“U”形变化规律。木质物残体层碳素年固定量平均值为 $0.423 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,在7a最小,15—37a无显著变化,在41a达到最大值 $0.475 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

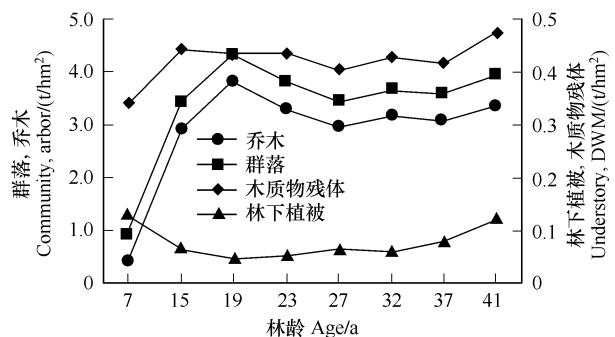


图4 不同林龄群落各层次碳素年固定量

Fig. 4 Carbon immobilization of layers

3 讨论

与其它落叶松林相比,长白落叶松人工林群落生物量碳储量及碳素年固定量与长白落叶松天然林^[21]相当,低于日本落叶松人工林^[22]和兴安落叶松天然林^[11],且远高于华北落叶松^[23]。与国内其它类似研究相比,长白落叶松人工林群落碳储量要低于杉木^[24]、马尾松^[25]、及楠木^[19]等南方针阔叶树种人工林及暖温带落叶阔叶林^[26],接近于杉木-火力楠混交林^[27],高于北方柏树人工林^[28]、阔叶红松人工林^[29]和马尾松-杉木混交林^[30]。足以可见该地区长白落叶松人工林具有速生特性,碳储量潜力巨大。

研究表明,林龄是影响长白落叶松林木及群落碳储量积累的主导因子之一。在群落碳储量的时间分布序列中,未成林地和郁闭林分存在明显差异。7年生未成林地处在幼树-草丛阶段,碳储量的增加主要依靠幼木和草本层生长。15—27a 中龄林为碳储量增长迅速期,且持续较长一段时间,是林分管理的关键阶段。27—41a 成近熟林由于枯损率较高,林分结构及碳储量处于较低水平,应加强抚育管理。合理的经营保证了增长速度大于衰老和死亡的减少速度,成熟林表现出较高的碳储水平。研究还发现自然稀疏和人工抚育管理促进林木生长,林分碳储量并未随林分密度下降而减小。此外,因为成熟林和过熟林资料不足,尚未知碳储量是否随林龄增加而趋向稳定、是否完全遵从“S”形曲线变化。

4 结论

长白落叶松单株生物量随林龄增加而增大,平均为 $129.753 \text{ kg} \cdot \text{株}^{-1}$,分配序列为:干材 > 活枝 > 根系 > 树皮 > 树叶 > 枯枝,树干所占比例达 58.75%。树干、地上部分和单株木等组分生物量可用估算方程进行拟合。研究得到计量参数 BEF 、 R 、 R/C 及 C/F 值分别为 0.5236、0.1936、0.5672 和 19.6056。同时,长白落叶松人工林群落碳储量随林龄增加而增大,平均 $91.547 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,空间分布序列是:乔木层 > 木质物残体层 > 林下植被层,各层碳储量为 78.825 、 $10.859 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.863 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,所占比例为 86.10%、11.86% 和 2.04%。此外,群落碳素年固定量为 $3.396 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,乔木层、林下植被层和木质物残体层平均为 2.894 、 0.079 、 $0.423 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。总之,人工林群落中生物量碳储量变化受立地、气候等多种因素影响,机理复杂,不同林龄人工林碳储量的动态变化规律有待深入研究。

References:

- [1] Feng R F, Yang W Q, Zhang J. Artificial forest management for global change mitigation. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 3870-3877.
- [2] Chen X G, Zhang Y P, Zhan H. Biomass Carbon Sequestration Potential of Trees under the Grain for Green Programs in Yunnan Province. *Scientia Silvae Sinica*, 2008, 44(5): 24-30.
- [3] Jia Z B. Six major changes of forest in China. [2009, 12, 28]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/72/content-200718.html>. 2009, 11, 18.
- [4] Fang J Y, Chen A P. Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in Science (291:2320-2322) by Fang et al. (2001). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 243-249.
- [5] Ma Z Q, Liu, Q J, Xu W J, Li X R, Liu Y C. Carbon storage of artificial forest in Qianyanzhou, Jiangxi Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(11): 1-7.
- [6] Duan A G, Zhang J G, He C Y, Tong Z S. Study on the change laws of biomass of Chinese Fir plantations. *Forest Research*, 2005, 18(2): 125-132.
- [7] Qin W M, He B, Yu H G, Chen W J. Biomass productivity of Acacia mangium Plantations of different age classes. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(1): 22-24.
- [8] Dong J R. Dynamics of Carbon Storage in the Woody Biomass of Northern Forests. Boston: Boston University, 2002.
- [9] Paul C V D. Forest inventory estimation with mapped plots. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(2): 493-497.
- [10] U. S. Forest Service. Forest Inventory and Analysis National Core Field Guide-version 4.0. [2008, 05, 12.]. <http://www.fia.fs.fed.us/library/field-guides-methods-proc>. October, 2007.
- [11] Sun Y J, Zhang J, Han A H, Wang X J, Wang X J. Biomass and carbon pool of *Larix gmelini* young and middle age forest in Xing'an Mountains Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1756-1762.

- [12] Martin R C, Juan J A, Juan C A, Cecilia A P. Coarse woody debris biomass in successional and primary temperate forests in Chiloé Island, Chile. *Forest Ecology and Management*, 2002, 164(1): 265-275.
- [13] David C C, Linda S H. Estimating down deadwood from FIA forest inventory variables in Maine. *Environmental Pollution*, 2002, 116(1001): 525-530.
- [14] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme // Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. eds. Hayama: IPCC/IGES, Japan, 2006
- [15] Luo Y J, Zhang X Q, Hou Z H, Yu P T, Zhu J H. Biomass carbon accounting factors of *Larix forest* in China based on literature data. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1111-1118.
- [16] Tan W M, He B, Qin S Y. Biomass and productivity in *Acacia crassiparpa* Plantation. *Journal of Northwest Forestry*, 2008, 23(2): 17-20.
- [17] Lin K M, Hong W, Yu X S, Huang B L. The dynamic characteristics and forecasting models of biomass of undergrowth plant in Chinese Fir plantation. *Scientia silvae Sinicae*, 2001, 37(S1): 99-105
- [18] Hudiburg T, Law B, Turner D P, Campbell J, Donato D, Duane M. Carbon dynamics of Oregon and Northern California forests and potential land-based carbon storage. *Ecological Applications*, 2009, 19(1): 163-180.
- [19] Ma M D, Jiang H, Liu Y J. Biomass, Carbon Content, Carbon Storage and Their Vertical Distribution of *Phoebe bournei* Artificial Stand. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(3): 34-39.
- [20] Wu P F, Zhu B, Liu S R, Wang X G. Carbon storage and its allocation in mixed alder-cypress plantations at different age stages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1419-1424.
- [21] Wu G, Feng Z W. Study on the biomass of *Larix* spp. Forest community in the frigid-temperate zone and the temperate zone of China. *Journal of Northeast Forestry University*, 1995, 23(1): 95-101.
- [22] Shen Z K, Lu S P, Ai X R. Study on biomass and productivity of *Larix Kaempferi* plantation. *Journal of Hubei Institute For Nationalities*, 2005, 23(3): 289-292.
- [23] Du H M, Wang C, Gao H Z. Carbon-sink function of artificial *Larix principis-rupprechtii* plantation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 756-759.
- [24] Yang Y S, Chen G S, Wang Y X, Xie J S, Yang S H, Zhong X F. Carbon storage and allocation in *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata* Plantations in Subtropical China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(10): 43-47.
- [25] Ding G J, Wang P C. Study on change laws of biomass and productivity of masson pine forest plantation II. Biomass and productivity of stand at different ages. *Forest Research*, 2001, 15(1): 54-60.
- [26] Sang W G, Su H X, Chen L Z. Coupling biomass and energy in warm temperate deciduous broad-leaved Oak (*Quercus liaotungensis*) forest ecosystem. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(S1): 88-92.
- [27] Huang Y, Feng Z W, Wang S L, Feng Z Z, Zhang H X, Xu Y R. C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese-fir, *Michelia macclurei* and their mixture. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [28] Bi J, Ma Z W, Xu Y L, Wang Z Y, Liu C H, Wang Y Z. The Community structure and biomass of the artificial *Platycladus orientalis*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2000, 28(1): 13-15.
- [29] Liu Q, Wang J B. Biologic productivity of broad-leaved Korean pine artificial forests. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32(2): 13-15.
- [30] Kang B, Liu S R, Zhang G J, Chang J G, Wen Y G, Ma J M, Hao W F. Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest ecosystem in Daqingshan, Guangxi of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1320-1329.

参考文献:

- [1] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓. *生态学报*, 2006, 26(1): 3870-3877.
- [2] 陈先刚, 张一平, 詹卉. 云南退耕还林工程林木生物质碳汇潜力. *林业科学*, 2008, 44(5): 24-30.
- [3] 贾治邦. 全国森林资源呈现六大变化. [2009, 12, 28]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/72content-200718.html>. 2009, 11, 18.
- [4] 方精云, 陈安平. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文 (Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [5] 马泽清, 刘琪璟, 徐雯佳, 李轩然, 刘迎春. 江西千烟洲人工林生态系统的碳蓄积特征. *林业科学*, 2007, 43(11): 01-07.
- [6] 段爱国, 张建国, 何彩云, 童书振. 杉木人工林生物量变化规律的研究. *林业科学研究*, 2005, 18(2): 125-132.
- [7] 秦武明, 何斌, 余浩光, 陈文军. 马占相思人工林不同年龄阶段的生物生产力. *东北林业大学学报*, 2007, 35(1): 22-24.
- [11] 孙玉军, 张俊, 韩爱惠, 王雪军, 王新杰. 兴安落叶松 (*Larix gmelini*) 幼龄林的生物量与碳汇功能. *生态学报*, 2007, 27(5): 1756-1762.

- [15] 罗云建,张小全,侯振宏,于澎涛,朱建华. 我国落叶松林生物量碳计量参数的初步研究. 植物生态学报,2007,31(6):1111-1118.
- [16] 秦武明,何斌,覃世赢. 厚荚相思人工林生物量和生产力的研究. 西北林学院学报,2008,23(2):17-20.
- [17] 林开敏,洪伟,俞新妥,黄宝龙. 杉木人工林林下植物生物量的动态特征和预测模型. 林业科学,2001,37(S1):99-105.
- [19] 马明东,江洪,刘跃建. 楠木人工林生态系统生物量、碳含量、碳贮量及其分布. 林业科学,2008,44(3):34-39.
- [20] 吴鹏飞,朱波,刘世荣,王小国. 不同林龄桉-柏混交林生态系统的碳储量及其分配. 应用生态学报,2008,19(7):1419-1424.
- [21] 吴刚,冯宗炜. 中国寒温带、温带落叶松林群落生物量的研究概述. 东北林业大学学报,1995,23(1):95-101.
- [22] 沈作奎,鲁胜平,艾训儒. 日本落叶松人工林生物量及生产力的研究. 2005, 湖北民族学院学报(自然科学版), 2005,23(3):289-292.
- [23] 杜红梅;王超;高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究. 中国生态农业学报,2009,17(4):756-759.
- [24] 杨玉盛,陈光水,王义祥,谢锦升,杨少红,钟美芳. 格氏栲人工林和杉木人工林碳库及分配. 林业科学,2006,42(10):43-47.
- [25] 丁贵杰,王鹏程. 马尾松人工林生物量及生产力变化规律研究 II. 不同林龄生物量及生产力. 林业科学研究,2001,15(1):54-60.
- [26] 桑卫国,苏宏新,陈灵芝. 东灵山暖温带落叶阔叶林生物量和能量密度研究. 植物生态学报,2002,26(增刊):88-92.
- [27] 黄宇,冯宗炜,汪思龙,冯兆忠,张红星,徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报,2005,25(12):3146-3154.
- [28] 毕君,马增旺,许云龙,王志彦,刘朝华,王彦芝. 人工侧柏群落结构及生物量. 东北林业大学学报,2000,28(1):13-15.
- [29] 刘强,王金波. 阔叶红松人工林群落的生物生产力. 东北林业大学学报,2004,32(2):13-15.
- [30] 康冰,刘世荣,张广军,常建国,温远光,马姜明,郝文芳. 广西大青山亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征. 生态学报,2006,26(5):1320-1329.