

# 思茅松中幼龄人工林的生物量碳密度及其动态变化

李江<sup>1,2</sup>, 邱琼<sup>1</sup>, 朱宏涛<sup>3</sup>, 孟梦<sup>1</sup>, 陈宏伟<sup>1</sup>, 冯弦<sup>1</sup>, 刘永刚<sup>1</sup>, 郭永清<sup>1</sup>, 翟明普<sup>2†</sup>

(1. 云南省林业科学院, 650204, 昆明; 2. 北京林业大学, 100083, 北京; 3. 中科院昆明植物研究所, 650204, 昆明)

**摘要** 通过样地实测生物量和采用重铬酸钾法测定植物碳素含量, 研究了思茅松中幼龄人工林生物量碳密度的分配特征及随林龄的动态变化规律。结果表明: 1) 林龄为 3~5、6~10、11~20 和 21~30 a 思茅松人工林的生物量碳密度分别为 (20.15 ± 3.09)、(27.24 ± 2.25)、(94.89 ± 9.90) 和 147.58 t/hm<sup>2</sup>。随林龄增长, 乔木层、枯落物层和林分的碳密度显著增加, 灌木层和草本层的碳密度有所减少。林分、乔木层和枯落物层的生物量碳密度随林龄的变化用逻辑斯蒂模型可实现良好拟合, 而灌木层和草本层拟合效果差。2) 林龄为 3~5、6~10、11~20 和 26 a 思茅松人工林的年均固碳量分别为 (4.92 ± 0.63)、(3.52 ± 0.25)、(6.44 ± 0.30) 和 5.68 t/(hm<sup>2</sup>·a)。乔木层的年均固碳量与林龄存在显著正相关, 灌木层和草本层的年均固碳量与林龄存在显著负相关, 林分年均固碳量与林龄呈较弱的正相关。乔木层和草本层的年均固碳量与林龄的关系以逻辑斯蒂模型拟合效果较好, 灌木层年均固碳量和林龄关系以 Gauss 模型拟合效果较好, 林分的年均固碳量与林龄的拟合效果差。

**关键词** 思茅松; 中幼龄人工林; 生物量碳密度; 动态

## Biomass carbon density and its dynamics for young and middle aged plantation of *Pinus kesiya* var. *langbianensis*

Li Jiang<sup>1,2</sup>, Qiu Qiong<sup>1</sup>, Zhu Hongtao<sup>3</sup>, Meng Meng<sup>1</sup>, Chen Hongwei<sup>1</sup>, Feng Xuan<sup>1</sup>, Liu Yonggang<sup>1</sup>, Guo Yongqing<sup>1</sup>, Zhai Mingpu<sup>2</sup>

(1. Yunnan Academy of Forestry, 650204, Kunming; 2. Beijing Forestry University, 100083, Beijing; 3. Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 650204, Kunming; China)

**Abstract** Based on biomass data collected from field surveys and plant carbon contents determined in laboratory, biomass carbon density and its dynamics for the young and middle aged plantation of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* were studied. Results showed that: 1) Biomass carbon density for the plantations of age 3–5, 6–10, 11–20 and 26 years were (20.15 ± 3.09), (27.24 ± 2.25), (94.89 ± 9.90) and 147.58 t/hm<sup>2</sup> respectively. Over stand age, biomass carbon density increased significantly for stand, arbor layer and litter layer, while decreased slightly for shrub layer and grass layer. Relations between biomass carbon density and stand age for stand, arbor layer and litter layer could be performed well by a logistic model, while the fitting effects for shrub and grass layer were not satisfied. 2) Mean annual rate of biomass carbon sequestration for the plantations of age 3–5, 6–10, 11–20 and 26 years were (4.92 ± 0.63), (3.52 ± 0.25), (6.44 ± 0.30) and 5.68 t/(hm<sup>2</sup>·a) respectively. The rates were positively related to stand age for arbor layer and stand and negatively related for shrub and grass layers. The relations between the rates and stand age could be well performed by a logistic model for

收稿日期: 2010-11-11 修回日期: 2011-02-10

项目名称: 云南省应用基础研究“云南森林碳储量测算和林业碳汇潜力研究”(2007C240M); 云南省技术创新人才培养计划(2008PY085); 国家科技支撑计划“亚热带山地造林固碳技术研究”(2008BAD95B09), “小桐子人工林碳汇功能研究”(2007BAD32B02-08)

第一作者简介: 李江(1972—), 男, 博士研究生, 副研究员。主要研究方向: 森林培育与林业碳汇。E-mail: lijianlyht@yahoo.com.cn

† 责任作者简介: 翟明普(1942—), 男, 教授。主要研究方向: 干旱区造林, 混交林理论与技术, 混农林业。E-mail: zhmp@bjfu.edu.cn

arbor and grass layer, and by a Gauss model for shrub layer, while the fitting effects for the relation for stand were not satisfied.

**Key words** *Pinus kesiya* var. *langbianensis*; young and middle aged plantation; biomass carbon density; dynamics

森林作为陆地生态系统的主体,不仅维护着区域生态环境,而且在调节全球碳平衡、减缓大气中温室气体浓度上升以及维护全球气候系统等方面具有不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。思茅松(*Pinus kesiya* Royle ex Gord. var. *langbianensis*)是我国亚热带西南部山地的代表种,集中分布于云南南部景谷、思茅、普洱等地<sup>[3-4]</sup>。因用途广泛,生长迅速,思茅松近年来已成为云南重要的人工造林树种,但关于思茅松人工林碳汇能力的相关研究少见报道。

笔者于2008年在思茅松集中分布区的4个县市(景洪、思茅、景谷和镇沅)调查了林龄为3~26a的30块思茅松人工林样地,实测了36株思茅松样株生物量,测定了思茅松、主要灌木树种、草本和枯落物的碳含量,基于实测数据,研究了思茅松人工林生物量碳密度的分配及其动态变化,旨在为减少思茅松人工林碳储量估算的不确定性和开展思茅松碳汇造林提供科学依据。

## 1 研究区自然概况

调查样地位于E100°29'~101°05', N 22°24'~24°01', 思茅松林区,分属云南省景洪、思茅、景谷和镇沅4个县市,海拔915~1800m。本区属南亚热带高原季风型气候,四季不明显但干湿季分明,降雨量1100~1650mm,雨季(5—10月)降雨量占全年85%以上。地带性土壤为红壤和赤红壤,造林前植被为季风常绿阔叶林或思茅松天然林。样地林分起源为人工植袋苗造林,造林后3年每年人工砍除灌木和杂草1~2次,所有林分没有进行过间伐。人工林内除思茅松外的乔木幼树有:红木荷(*Schima wallichii*)、水锦树(*Wendlandia tinctoria*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)、云南黄杞(*Engelhardtia spicata*)、红椴(*Anneslea fragrans*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)、短刺栲(*Castanopsis echidnocarpa*)、石栎(*Lithocarpus* spp.)和银柴(*Aporosa* spp.)等。人工林内灌木有锈毛杜茎山(*Measa permolli*)、艾胶树(*Glochidion lanceolarium*)、密花树(*Rapanea nerrifolia*)和地桃花(*Urena lobata*)等。林下草本植物有白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、紫茎泽兰(*Ageratina*

*adenophora*)、姜科山姜属(*Alpinia* spp.)和密序野古草(*Arundinella hookeri*)等<sup>[5]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与标准株调查

分别于云南景洪、思茅、景谷和镇沅选取林龄为3~26a的思茅松典型人工林分,设立30m×30m的临时样地30块。每样地伐取标准木1~2株,共取36株,标准木地上部分树干连同枝、叶、果实,采用分层切割法测定生物量并取样测定含碳率,地下部分根系采用挖掘法测定生物量并取样测定含碳率。在样地内四个边角和中央设立5个2m×2m样方,连根挖出林下灌木(含思茅松以外的乔木幼树),称鲜质量并取样用于测定含水率和含碳率。另于样地内随机布设5个1m×1m样方,样方内收集枯落物后连根挖出全部草本,分别称鲜质量后取样用于测定含水率和含碳率,更详细的调查方法请参考笔者已发表的文章<sup>[6-7]</sup>。

### 2.2 样地生物量的测算

根据标准木的实测生物量资料和相对生长方程 $W = a(d^2h)^b$ 建立生物量 $W$ (kg)与胸径 $d$ (cm)和树高 $h$ (m)的回归方程<sup>[6]</sup>,式中 $a$ 和 $b$ 为与林分相关的常数,以此估算样地内乔木生物量。根据样方调查的生物量数据和样方面积换算灌木层生物量(含思茅松以外的乔木幼树)、草本层生物量和枯落物层现存量。

### 2.3 植物含碳率测定

思茅松分主干、松枝、树皮、树根和针叶从标准株取样,共取样36株,采用重铬酸钾硫酸氧化法对所有植物样品的含碳率进行分析,采用生物量加权平均法分别计算思茅松含碳率<sup>[7]</sup>。对思茅松人工林样地中出现频率高、生物量比例大的15个灌木树种(含思茅松以外的乔木幼树),分地上部分和地下部分取样,采用重铬酸钾硫酸氧化法对植物样品含碳率进行分析,取15个树种地上和地下部分含碳率的算术平均值为思茅松人工林灌木层的地上和地下部分的平均含碳率。于每块调查的思茅松人工林样地中,分地上部分和地下部分各取草本混合样品500g,枯落物样品500g,共30个重复,采用重铬酸

钾硫酸氧化法对样品的含碳率进行分析,取测定值的算术平均值作为草本地上部分、地下部分和枯落物的平均含碳率。

#### 2.4 生物量碳密度、年均固碳量和碳密度比例的计算方法

将思茅松人工林各层(乔木、灌木、草本和枯落物)的单位面积生物量与相应的含碳率相乘获得该层的碳密度,各层碳密度之和相加得到人工林的生物量碳密度,样地生物量碳密度除以相应林龄得到年均人工林的年均固碳量。林分各层的碳密度占全林分生物量碳密度的比值即为各层的生物量碳密度比例。

#### 2.5 数据分析

采用 Excel 和 DPS 软件计算思茅松人工林各层的生物量碳密度和平均年固碳量,分析林分生物量碳密度和年均固碳量与林龄的相关关系并进行多种函数关系的回归模拟。

### 3 结果与分析

#### 3.1 思茅松人工林各层的含碳率

从表 1 可知,思茅松人工林内植物的含碳率最高的是思茅松地上部分(48.10% ± 0.27%),最低为草本地下部分(38.06% ± 0.83%)。思茅松人工林各层的含碳率都低于广泛使用的植物含碳率缺省值(50%),也较华北地区的一些针叶树种低,如华北落叶松(*Larix principisrupprechtii*)(51.58%)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)(51.18%)、油松(*Pinus tabulaeformis*)50.30%、侧柏(*Platycladus orientalis*)(50.53%)<sup>[8]</sup>;与四川地区一些树种相较,思茅松比马尾松(*Pinus massoniana*)含碳率(50.97%)低、但与杉木(*Cunninghamia lanceolata*)含碳率(48.20%)接近,高于云南松(*Pinus yunnanensis*)的含碳率(46.55%)<sup>[9]</sup>。思茅松含碳率略低于其他针叶树种的原因除树种本身差异外,参试思茅松年龄较小可能是一个重要因素。

表 1 思茅松人工林各层的含碳率

Tab. 1 Carbon contents of forest layers of the *Pinus Kesiya* var. *langbianensis* plantation

林分植被层	含碳率/%	样本数
思茅松地上部分	48.10 ± 0.27a	36
思茅松地下部分	46.79 ± 0.33a	36
灌木地上部分	44.19 ± 0.30b	30
灌木地下部分	42.91 ± 0.34bc	30
草本地地上部分	41.58 ± 0.42c	30
草本地地下部分	38.06 ± 0.83d	30
枯落物	43.92 ± 0.58b	30

注:1)碳密度后标注字母表示在 0.05 水平上的差异显著性;2)表中数据为均值 ± 标准误,下同。

#### 3.2 思茅松人工林的碳密度结构

如表 2 所示,思茅松人工林的碳密度随林龄的增长而增加,林龄 3~5、6~10、11~20 和 26 a 人工林的碳密度依次为(20.15 ± 3.09)、(27.24 ± 2.25)、(94.89 ± 9.90)和 147.58 t/hm<sup>2</sup>。在思茅松人工林幼林初期(3~5 a),灌木层的碳密度最大((8.79 ± 1.97) t/hm<sup>2</sup>),其他各层依次为乔木层((7.83 ± 1.46) t/hm<sup>2</sup>)、草本层((1.86 ± 1.67) t/hm<sup>2</sup>)、枯落物层((1.30 ± 0.43) t/hm<sup>2</sup>)。此期后,乔木层的碳密度增加越来越快,枯落物层碳密度逐渐积累,灌木层碳密度变化不大,而草本层碳密度有减少的趋势。林龄 6~10 a 期,各层的碳密度均值依次为乔木层((18.53 ± 8.97) t/hm<sup>2</sup>)、灌木层((5.70 ± 2.61) t/hm<sup>2</sup>)、枯落物层((1.60 ± 0.13) t/hm<sup>2</sup>)、草本层((1.15 ± 0.19) t/hm<sup>2</sup>);林龄 11~20 a 人工林各层的碳密度依次为乔木层((83.01 ± 10.84) t/hm<sup>2</sup>)、灌木层((8.12 ± 2.49) t/hm<sup>2</sup>)、枯落物层((2.49 ± 0.79) t/hm<sup>2</sup>)、草本层((1.28 ± 0.61) t/hm<sup>2</sup>);林龄 26 a 思茅松人工林各层的生物量碳密度依次为乔木层(141.85 t/hm<sup>2</sup>)、灌木层(3.52 t/hm<sup>2</sup>)、枯落物层(1.72 t/hm<sup>2</sup>)、草本层(0.49 t/hm<sup>2</sup>)。

表 2 不同林龄思茅松人工林的碳密度

Tab. 2 Carbon density of plantations of different age groups t/hm<sup>2</sup>

林龄/a	样地数量	乔木层	灌木层	草本层	枯落物层	全林分
3~5	8	7.83 ± 1.46	8.79 ± 1.97	1.86 ± 1.67	1.30 ± 0.43	20.15 ± 3.09
6~10	16	18.53 ± 8.97	5.70 ± 2.61	1.15 ± 0.19	1.60 ± 0.13	27.24 ± 2.25
11~20	4	83.01 ± 10.84	8.12 ± 2.49	1.28 ± 0.61	2.49 ± 0.79	94.89 ± 9.90
26	2	141.85	3.52	0.49	1.72	147.58

人工林内各层占全林分的碳密度比例与林龄的相关分析结果(表 3)显示,乔木层碳密度比例与林

龄存在显著的正相关,而灌木层、草本层和枯落物层的碳密度比例与林龄显著负相关,即随林龄增长,乔

木层的碳密度比例显著增加,而灌木层、草本层和枯落物层的碳密度比例显著减少。

表3 思茅松中幼龄人工林各层的碳密度比例与林龄的相关系数

Tab.3 Correlation coefficients between the carbon density ratio of different forest layers and stand age

生物量层	乔木层	灌木层	草本层	枯落物
相关系数	0.795 3 **	-0.726 39 **	-0.562 0 **	-0.599 1 **

注:\*\*表示相关系数在0.01水平上显著,下同。

### 3.3 思茅松人工林碳密度随林龄的变化

思茅松人工林各层的碳密度与林龄的相关分析结果(表4)显示,林分、乔木层和枯落物层的碳密度与林龄存在显著正相关,灌木层和草本层的碳密度与林龄负相关,但相关不显著。即林分、乔木层和枯落物层的碳密度随林龄的增加明显增长,而灌木层

和草本层的碳密度随林龄的增加有较弱的减少趋势。

表4 思茅松中幼龄人工林各层碳密度和林龄的相关系数

Tab.4 Correlation coefficients between the carbon density of different forest layers and stand age

生物量层	乔木层	灌木层	草本层	枯落物	全林分
相关系数	0.952 3 **	-0.161 2	-0.290 8	0.418 9 **	0.930 5 **

经多种函数关系模拟后发现,林分碳密度( $C_{sd}$ )、乔木层碳密度( $C_{ar}$ )、枯落物碳密度( $C_{li}$ )随林龄( $A_{ag}$ )关系以逻辑斯蒂模型拟合效果较好,其方程为 $y = a / (1 + \exp(b + cx))$ ,式中: $y$ 为碳密度, $x$ 为林龄, $a$ 、 $b$ 和 $c$ 为常数,其值参见表5。灌木层和草本层的碳密度与林龄的拟合效果差,故没列出回归方程。

表5 林分碳密度、乔木层碳密度和枯落物层碳密度与林龄的回归方程

Tab.5 Regression equations for calculating the carbon density of the stand, arbor layer and litter layer with stand age as variable

$y$	$x$	$a$	$b$	$c$	$R^2$	$P$	$n$
$C_{sd}$	$A_{ag}$	156.211 6	3.319 0	-0.243 390	0.914 2	<0.000 1	30
$C_{ar}$	$A_{ag}$	143.327 2	4.209 5	-0.301 137	0.952 9	<0.000 1	30
$C_{li}$	$A_{ag}$	2.569 8	0.888 1	-0.192 510	0.227 0	0.030 9	30

### 3.4 思茅松中幼龄人工林的年均固碳量

思茅松人工林内的枯落物多数为思茅松枝叶,因此将枯落物层积累的碳储量还原到乔木层进行年均固碳量统计。如表6所示,林龄3~5 a林分的年均固碳量为 $(4.92 \pm 0.63) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,其中乔木层年均固碳量为 $(2.16 \pm 0.26) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,灌木层年均固碳量为 $(2.16 \pm 0.45) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,草本层年均固碳量为 $(0.61 \pm 0.17) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,幼林期乔木层与灌木层的年均固碳量基本一样。林龄6~10 a林分的年均固碳量为 $(3.52 \pm 0.25) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,其中乔木层为 $(2.57 \pm 0.24) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,灌木层为 $(0.76 \pm 0.08) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,草本层为 $(0.19 \pm 0.03) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,此间乔木层的年均固碳量较林龄3~5 a期间有一定增加,灌木层和草本层则较3~5 a期间大幅减少,而林分的年均固碳量也有一定减少。林龄11~20 a期间,林分的年均固碳量为 $(6.44 \pm 0.30) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,其中乔木层为 $(5.75 \pm 0.35) \text{ t}/$

$(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,灌木层为 $(0.61 \pm 0.22) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,草本层为 $(0.08 \pm 0.03) \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,此阶段乔木层的年均固碳量比6~10 a期间有明显的增加,而灌木层和草本层年均固碳量持续小幅减少,林分年均固碳量因乔木层的大幅增加而显著增加。林龄26 a思茅松人工林林分的年均固碳速量为 $5.68 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,其中乔木层为 $5.52 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,灌木层为 $0.14 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,草本层为 $0.02 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,此阶段乔木层的年均固碳量比10~20 a阶段有所下降,灌木层和草本层的年均固碳量也都有一定减少,全林分的年均固碳量相应的有一定减少,表明思茅松人工林的年均固碳量在前一阶段(10~20 a)达到了峰值,而林分的连年固碳量峰值则应出现得更早一些。但因为思茅松人工林营建历史短,获得具有可比性的中龄林样地数据很困难,本研究中林龄大于20 a的样地数量只有2块,此期间的林分碳积累变化趋势具有较高的不确定性,有待继续研究。

表6 不同林龄思茅松人工林各层的年均固碳量

Tab.6 Mean annual carbon sequestration rate of different layers and age groups

林龄/a	样地数量	乔木层(含枯落物)	灌木层	草本层	全林分
3~5	8	$2.16 \pm 0.26$	$2.16 \pm 0.45$	$0.61 \pm 0.17$	$4.92 \pm 0.63$
6~10	16	$2.57 \pm 0.24$	$0.76 \pm 0.08$	$0.19 \pm 0.03$	$3.52 \pm 0.25$
11~20	4	$5.75 \pm 0.35$	$0.61 \pm 0.22$	$0.08 \pm 0.03$	$6.44 \pm 0.30$
26	2	5.52	0.14	0.02	5.68

### 3.5 思茅松人工林年均固碳量随林龄的变化

如表7所示,在中幼林阶段,思茅松人工林乔木层年均固碳量与林龄存在显著正相关;灌木层年均固碳量与林龄存在显著负相关;草本层年均固碳量与林龄负相关,但相关系数不显著;林分的年均固碳量与林龄正相关,但相关不显著。

经多种函数关系模拟后发现,乔木层年均固碳量( $S_{ar}$ )和草本层年均固碳量( $S_{gr}$ )和林龄( $A_{ag}$ )的关系以逻辑斯蒂模型拟和效果较好,灌木层年均固碳量

( $S_{sh}$ )和林龄( $A_{ag}$ )关系以 Gauss 模型拟和效果较好,回归方程见表8。林分的年均固碳量与林龄的关系函数拟和效果不好,没列出回归方程。

表7 思茅松中幼龄人工林各层年均固碳量与林龄的相关系数

群落层次	乔木层 (含枯落物)	灌木层	草本层	全林分
相关系数	0.760 0**	-0.507 3**	-0.496 4	0.295 26

表8 思茅松人工林分各层生产力和林龄的回归方程

Tab.8 Regression equations for calculating the productivities of different layers of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation with stand age as variable

回归方程	$y$	$x$	$a$	$b$	$c$	$R^2$	$P$	$n$
$y = a / (1 + \exp(b + cx))$	$S_{ar}$	$A_{ag}$	6.338 0	2.125 3	-0.228 525	0.643 4	<0.000 01	30
$y = a(1 + b \exp(cx^2))$	$S_{sh}$	$A_{ag}$	0.417 5	6.283 1	-0.031 410	0.420 1	0.000 64	30
$y = a / (1 + \exp(b + cx))$	$S_{gr}$	$A_{ag}$	1.232 7	-2.850 8	0.663 963	0.555 3	<0.000 10	30

## 4 结论与讨论

### 4.1 思茅松中幼龄人工林的生物量碳密度

因为在幼林初期(3~5 a),思茅松人工林灌木层(含思茅松以外的乔木幼树)更新良好,灌木层碳密度(8.79 t/hm<sup>2</sup>)比乔木层碳密度(7.83 t/hm<sup>2</sup>)还高,从而在总体上使林分的生物量碳密度(20.15 t/hm<sup>2</sup>)达到了较高的水平。该值高于同龄杉木人工林的碳密度(11.95 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[10]</sup>,高于四川省人工林的生物量平均碳密度(19.53 t/hm<sup>2</sup>,其中灌木层碳密度均值仅为0.52 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[9]</sup>,与华北落叶松中幼龄林(14~49年生)的生物量平均碳密度水平(27.58 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[11]</sup>相差不大,显示出本区思茅松人工林幼龄初期碳密度较大、且主要分布于灌木层和乔木层的特点,这是该区水热条件较好、思茅松新造林地中原生树种天然更新能力强大<sup>[5]</sup>的结果。在林龄6~10 a期间,思茅松人工林的生物量碳密度(27.24 t/hm<sup>2</sup>)与同龄杉木人工林的碳密度(按相关生物量数据<sup>[10]</sup>估算值28.72 t/hm<sup>2</sup>)基本相当,略低于本地区7年生西南桦(*Betula alnoides*)人工林生物量碳密度(34.60 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[12]</sup>和山桂花(*Paramichelia baillonii*)人工林的碳密度(30.06 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[12]</sup>。林龄11~20 a期间,思茅松人工林的碳密度(94.89 t/hm<sup>2</sup>)明显高于同龄思茅松天然林的碳密度(按相关生物量数据<sup>[13]</sup>估算值54.88 t/hm<sup>2</sup>),高于21~25 a杉木人工林的碳密度(按相关生物量数据<sup>[10]</sup>估算值70.85 t/hm<sup>2</sup>)。林龄26 a思茅松人工林的碳密度高达

147.58 t/hm<sup>2</sup>,是23 a思茅松天然林碳密度(按相关生物量数据<sup>[13]</sup>估算值63.83 t/hm<sup>2</sup>)的2倍,超过王效科等<sup>[14]</sup>计算的中国森林生物量碳密度分布区间(6.47~118.14 t/hm<sup>2</sup>)。由上可见,思茅松中幼龄人工林具有较高的生物量碳密度,这与有关研究云南森林的碳密度水平较高的结论相吻合<sup>[15-16]</sup>,思茅松人工林的碳密度较思茅松天然林高可能是在人工林营造中使用了良种、并采取施肥和其他抚育措施提高了林分的生产力。

在思茅松人工林林分的碳密度组成中,乔木层碳密度比例和绝对值都与林龄呈高度正相关,灌木层的碳密度比例在幼林初期较高,随林龄增长,比例明显降低,绝对值也略有下降,草本层与灌木层类似,碳密度随林龄增长,比例明显降低,绝对值也略有下降,枯落物层碳密度所占比例随林龄增加降低,但绝对值却在不断增加。作为林分各层碳密度变化的整体反馈,思茅松人工林林分的生物量碳密度与其他很多林分一样,与林龄存在显著的正相关。乔木层碳密度的不断增加是导致林分碳密度增长的主要原因,而灌木层和草本层的碳密度比例持续减少则是受到乔木树种的生长压制和人工抚育砍除的综合作用。林分、乔木层和灌木层的碳密度随林龄的动态变化可用逻辑斯蒂模型实现良好拟合,相关的回归方程可用于思茅松人工林的碳汇计量。

### 4.2 思茅松中幼龄人工林的年均固碳量

林龄为3~5、6~10、10~20和26 a思茅松人工林的年均固碳量分别为4.92 ± 0.63、3.52 ± 0.25、

6.44 ± 0.30 和 5.68 t/(hm<sup>2</sup>·a),表现出初期较高,然后减少,再上升达到高峰后维持的趋势,这是由思茅松的树种生长特性、立地条件和相关的人工林抚育措施共同作用的结果。还应注意因本研究采用的是年均固碳量,而连年固碳量的峰值应比年均固碳量出现得更早更大。与一些文献报道的针叶林年均固碳量比较,如杉木林(据相关生物量生产力<sup>[10]</sup>推算值 2.79 ~ 3.90 t/(hm<sup>2</sup>·a)、兴安落叶松林(1.18 ~ 2.79 t/(hm<sup>2</sup>·a))<sup>[17]</sup>、马尾松林(3.60 t/(hm<sup>2</sup>·a))<sup>[18]</sup>、柏木林 2.11 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[18]</sup>和红松林(3.61 t/(hm<sup>2</sup>·a))<sup>[19]</sup>,思茅松人工林的年均固碳量较高,表明思茅松人工林的固碳能力较强,这与思茅松树种的速生特性和云南西南部优良的水热条件是紧密相关的。

在中幼龄期,思茅松人工林乔木层的年固碳量与林龄存在正相关,灌木层和草本层的固碳量与林龄呈负相关,林分的年固碳量与林龄呈较弱正相关且相关不显著。乔木层和草本层的年均固碳量与林龄的关系以逻辑斯蒂模型拟和效果较好,而灌木年固碳量和林龄关系以 Gauss 模型拟和效果较好,其他各层的年均固碳量与林龄拟合效果较差。

## 5 参考文献

- [1] Binkley D, Valentine D. 50-year biogeochemical effects of green ash, white-pine, and Norway spruce in a replicated experiment [J]. *Forest Ecology and Management*, 1991, 40: 13-25
- [2] Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate [J]. *Unasylva*, 1996, 47: 3-10
- [3] 徐永椿,毛品一,伍聚奎,等. 云南树木图志:上 [M]. 昆明:云南科技出版社,1988:90
- [4] 吴中伦. 中国森林:第二卷针叶林 [M]. 北京:中国林业出版社,1999:983
- [5] 陈宏伟,冯弦,刘永刚,等. 5种思茅松人工幼林生长及林下植物动态的研究 [J]. *西部林业科学*, 2009, 38(2): 24-27
- [6] 李江,孟梦,邱琼,等. 思茅松中幼龄人工林生物量与生产力态 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(8): 36-38
- [7] 李江,翟明普,朱宏涛,等. 思茅松人工中幼林的含碳率研究 [J]. *福建林业科技*, 2009, 36(4): 12-15
- [8] 马钦彦,陈遐林,王娟,等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 96-100
- [9] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川人工林生态系统碳储量特征 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1644-1650
- [10] 侯振宏,张小全,徐德应,等. 杉木人工林生物量 and 生产力研究 [J]. *中国农学通报*, 2009, 25(5): 97-103
- [11] 杜红梅,王超,高红真. 华北落叶松人工林碳汇功能的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 756-759
- [12] 李江,陈宏伟,冯弦,等. 云南热区几种阔叶人工林 C 储量的研究 [J]. *广西植物*, 2003, 23(4): 294-298
- [13] 吴兆录,党承林. 云南普洱地区思茅松林的生物量 [J]. *云南大学学报:自然科学版*, 1992, 14(2): 137-145
- [14] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16
- [15] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究 [J]. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 1-9
- [16] 吴庆标,王效科,段晓男,等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 517-523
- [17] 鲍春生,白艳,青梅,等. 兴安落叶松天然林生物生产力及碳储量研究 [J]. *内蒙古农业大学学报*, 2010, 31(2): 77-82
- [18] 王鹏程,邢乐杰,肖文发,等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量 [J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 97-106
- [19] 闫平,冯晓川. 原始阔叶红松林碳素储量及空间分布 [J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(5): 23-25

(责任编辑:程云)