西北林学院学报 2014,29(1):8～14
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2014.01.02

六盘山华北落叶松和油松林典型林地生长及固碳速率研究

马正锐[1,2],程积民[1*],侯庆春[1],韩彩萍[3],殷小慧[3]

(1.中国科学院 水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨陵 712100;2.中国科学院 研究生院,北京 100049;
3.宁夏固原市六盘山林业局,宁夏 固原 756401)

摘　要:采用树干解析法对六盘山华北落叶松(29 a)和油松(30 a)典型人工林的生长过程进行了研究,并利用树皮系数还原平均木各树龄的带皮胸径,根据生物量方程求得2个树种的净生产力,再结合各器官含碳量,得出林地的固碳速率。结果表明,华北落叶松与油松胸径优势木、平均木和劣势木的连年生长量趋势基本一致,二者胸径生长量分别在12 a和10 a后开始下降,在此期间可适当进行抚育间伐。2种林分均未进入成熟期,预计成熟年龄前者在30 a以后,而后者35 a左右。华北落叶松和油松人工林总固碳量分别是34.28 t·hm^{-2}和59.56 t·hm^{-2}。华北落叶松林整个生长阶段平均碳累积速率为1.18 t·hm^{-2}·a^{-1},12 a后固碳速率比较稳定,平均为1.64 t·hm^{-2}·a^{-1};而油松林整个生长阶段平均碳累积速率为1.98 t·hm^{-2}·a^{-1},16 a以后,碳累积量快速增加,平均为3.55 t·hm^{-2}·a^{-1}。

关键词:华北落叶松;油松;生长过程;固碳速率;六盘山

中图分类号:S718.52　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2014)01-0008-07

Growth Rhythms and Carbon Sequestration Rates of *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus tabulaeformis* Forests in Liupan Mountains

MA Zheng-rui[1,2], CHENG Ji-min[1*], HOU Qing-chun[1], HAN Cai-ping[3], YIN Xiao-hui[3]

(1. *Institute of Soil & Water Conservation and Eco-Environment, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049, *China*;
3. *Liupanshan Forestry Bureau of Ningxia, Guyuan, Ningxia* 756401, *China*)

Abstract: With the method of stem analysis, the growth characters of *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus tabulaeformis* plantations in Liupan Mountains, Ningxia were studied. The diameter at breast height (DBH) with bark of the two conifers were reconstructed on the basis of bark coefficient, then the primary productivity and carbon sequestration rates were obtained according to biomass equations which existed or newly-established. As indicated by the analysis that the annual DBH increments of the dominant, average and suppressed trees showed a consistent trend within the two conifers. Their growth began to decline at the 12th and 10th year when intermediate thinning would be taken. These two forest stands were not in their maturation period and, we predicted that the mature age of *L. principis-rupprechtii* was 30 a and *P. tabulaeformis* was 35 a. The amounts of carbon fixation of *L. principis-rupprechtii* and *P. tabulaeformis* forests were 34.28 t and 59.56 t per hectare, respectively. The carbon sequestration rate of *L. principis-rupprechtii* was1.18 t·hm^{-2}·a^{-1}, and from the 12th year, the rate kept a stable level of 1.64 t·hm^{-2}·a^{-1}. But to the *P. tabulaeformis* forest, the average rate was 1.98 t·hm^{-2}·a^{-1} and the accumulation of carbon increased rapidly (3.55 t·hm^{-2}·a^{-1}) from the 16th year.

收稿日期:2013-04-21　**修回日期**:2013-07-08
基金项目:中国科学院战略性先导科技专项"应对气候变化的碳收支认证及相关问题"(XDA05050202);国家自然科学基金重点项目—气候变化背景下黄土高原土地利用影响径流的空间尺度效应(41230852)。
作者简介:马正锐,男,硕士研究生,研究方向:恢复生态学。E-mail:ahnu_mzr1988@163.com
* **通信作者**:程积民,男,博士生导师,教授,研究方向:草地生态学和恢复生态学。E-mail:gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

Key words:*Larix principis-rupprechtii*; *Pinus tabulaeformis*; growth rhythm; carbon sequestration rate; Liupan Mountains

六盘山是黄土高原典型的天然次生林区,素有“绿色明珠”之称,其涵养水源,调节气候,改善生态环境之功效巨大。历史上,一度遭受到自然和人为严重的干扰,天然植被所剩无几。六盘山林区植被恢复工程开始于20世纪70年代,选用速生型针叶树种华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)作为主要造林树种。退耕还林和天然林保护措施实施以来,六盘山的植被得到了快速恢复。但是,大量人工林初植密度过大,结构单一[1],间伐调整不及时,超出了其土地承载能力,导致林木生长不均、抵抗病虫害和自然灾害的能力差、生产力下降等问题[2]。尤其是林区内的华北落叶松林[3],结构简单,加之枯枝落叶层大量积累,导致其不能天然更新,面临着衰退的过程[4-5]。因此,开展人工林生态系统的研究,探索不同立地环境下其生长过程、生产力和固碳功能,对于指导林分的合理规划与科学经营具有重要意义。

关于六盘山人工林的研究主要集中在华北落叶松,包括森林生物量及其分配[6],群落天然更新初探[3],森林水文过程[7],多样性与生产力[2];而关于油松的研究鲜有报道[8]。

人工林对中国森林总碳汇的贡献率超过80%[9]。而关于六盘山人工林固碳方面的研究,尚停留在森林生物量[3]和枯落物蓄积量[10]两个方面,未深入探究其植被碳储量和固碳能力。因此开展六盘山人工林的生产力和固碳速率的研究迫在眉睫。

本试验依托六盘山自然保护区第2次综合考察资料,以华北落叶松、油松人工林典型林地为对象,在探讨二者生物量和生长过程的基础上,研究其生产力和固碳能力的动态变化,以期为人工林管理和生态服务功能评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

六盘山自然保护区是六盘山的核心部分,地跨宁夏固原市的原州区、隆德、泾源3县,保护区总面积9.1万 hm^2。海拔在2 000～2 930 m,相对高差在800～1 000 m。年平均气温5.8℃,年平均降水量676 mm,年平均相对湿度60%～70%,无霜期90～130 d。六盘山处于半湿润向半干旱过渡的边缘地带,境内降水显著高于周边地区,森林植被茂密。

森林类型主要为华北落叶松人工林,阔叶混交林,乔灌混交林及少量针阔混交林。主要树种有:山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)、椴(*Tilia*)、槭(*Acer*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、华山松(*Pinus armandii*),华北落叶松、油松等。在山体阳坡,还分布着大量灌丛;高海拔地区则分布着亚高山草甸群落。土壤类型以灰褐土为主,在高海拔地区分布有少量的亚高山草甸土[7]。

1.2 方法

1.2.1 样地选择和解析木制作　2012年6月在宁夏六盘山林业局东山坡林场、王化南林场分别选取华北落叶松(29 a)、油松(30 a)典型性林区作为调查样地,样地大小均为20 m×25 m。两者均为2～3 a移植苗,20世纪80年代造林。

记录样地基本信息(表1),对胸径大于起测直径(4 cm)的乔木进行每木检尺,计算样地林木平均胸径和高度。按胸径和树高选取平均木(平均值)、优势木(最大值)和劣势木(最小值)各1株,且要求是生长正常、无病虫害、不断梢、无双梢、易砍伐的林木。

表1　样地基本信息

Table 1　Status of experimental forests

优势树种	经纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	郁闭度	密度/(株·hm^{-2})	平均胸径/cm	平均高度/m
落叶松	N35.43°E106.20°	2 641	南	22	0.7	1 400	14	13
油松	N35.39°E106.34°	2 059	西南	28	0.8	2 300	14	10

所有样木均实测胸径和冠幅,伐倒后,测量树高,以1 m区分段进行圆盘解析;同时按根(粗、中、细)、干(上、中、下)、枝(粗、中、细)、叶和果分别取样300 g,带回室内65 ℃下烘干至恒重,粉碎后充分混匀,并过100目筛,用于测定含碳量。

1.2.2　林木生长过程分析

1.2.2.1　林木直径分布　在每木检尺的基础上,利用SPSS软件,进行描述性统计分析,分别求出华北落叶松林和油松林直径分布的偏度系数和峰度系数,画出直径分布的直方图,分析2种林分的直径分布特征[11]。

1.2.2.2　胸径生长量变化　树木年轮具有定年准确、连续性强、与气候要素相关度高等特点,因此成为获取过去环境变化的理想代用资料,也是研究林

木生长过程的重要手段[11-12]。

将经过充分磨光的所有圆盘，用标准的树木年代学技术交叉定年[13]，并测定每个龄阶年轮宽度。胸径生长量包括平均生长量和连年生长量，连年生长量数值一般较小，测定困难，通常用定期平均生长量代替。

1.2.2.3 树高生长量变化 树龄与各圆盘的年轮数之差，即为该树生长到该断面高度所需的年数。以直径为横坐标，各断面高为纵坐标，按各龄阶直径的大小绘制纵断面图。各龄阶的树高，可用内插值方法按比例算出[13]（图2）。

1.2.2.4 材积生长量测定 各龄阶去皮材积按伐倒木区分断面积求积法[13]计算，即各区分段材积与梢头材积之和。

1.2.3 树皮系数和带皮胸径的确定 树皮系数：$K=D_{带}/D_{去}$，式中：$D_{带}$ 为林木的带皮直径；$D_{去}$ 为林木的去皮直径。通过圆盘解析，获得一组树皮系数值，然后利用树皮系数数据拟合方程，将解析木过去各年的去皮直径转化为带皮直径，为计算各年的生物量做准备。

1.2.4 生物量模型建立 华北落叶松生物量数据(28株)由六盘山林业局提供，基本符合建立生物量模型要求。

基本模型：$B=\alpha_0 x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2}+\varepsilon$，式中：$B$ 为生物量(总生物量和各器官生物量)，单位为kg；x_1、x_2 为植株形态学变量(胸径、树高)；α_0、α_1、α_2 为模型参数；ε 为误差项。

模型基本评价指标：将确定系数(R^2)、平均预估误差(MPE)和平均百分标准误差($MPSE$) 3项指标作为基本评价指标[14-15]。

$$MPE=\frac{t_\alpha(\sqrt{\sum(Y_i-Y'_i)^2/(n-p)}}{\bar{Y}/\sqrt{n}}\times 100 \quad (1)$$

$$MPSE=\sum|(Y_i-Y'_i)/Y'_i|/n\times 100 \quad (2)$$

式中：Y_i 为实际观测值，Y'_i 为模型预估值，$\bar{Y}$ 为样本平均值，n 为样本单元数，p 为参数个数，t_α 为置信水平 α 时的 t 值。R^2 反映了模型的拟合优度；MPE 反映平均生物量估计值的精度指标；$MPSE$ 反映单株生物量估计值的精度指标。

关于本地油松的生物量数据未收集到，借用了相近地区的生物量模型[16]。

1.2.5 碳累积速率 一般情况下，林分生长状况可由林分生物量体现，因生物量数据来源较为容易，也比较可信。因此，本研究利用生物量推算林分的生产力。对林木生物量采用胸径生物量方程估计，以各龄阶生物量差值计算生长量，根据2种针叶林的生产力与含碳量，可得出单木的连年碳累积量。

用平均木的固碳量代表整个林地的平均水平，与林分密度相乘即得到林分碳累积速率。

2 结果与分析

2.1 林木生长过程

2.1.1 林分结构 调查测定华北落叶松70株，林木胸径平均值为13.91 cm，最大值为23.6 cm，标准差为3.653，树高平均值为13 m。偏度系数为-0.007，峰度系数为0.657，华北落叶松林的林木直径-株数分布基本接近于正态分布[17]（图1）。

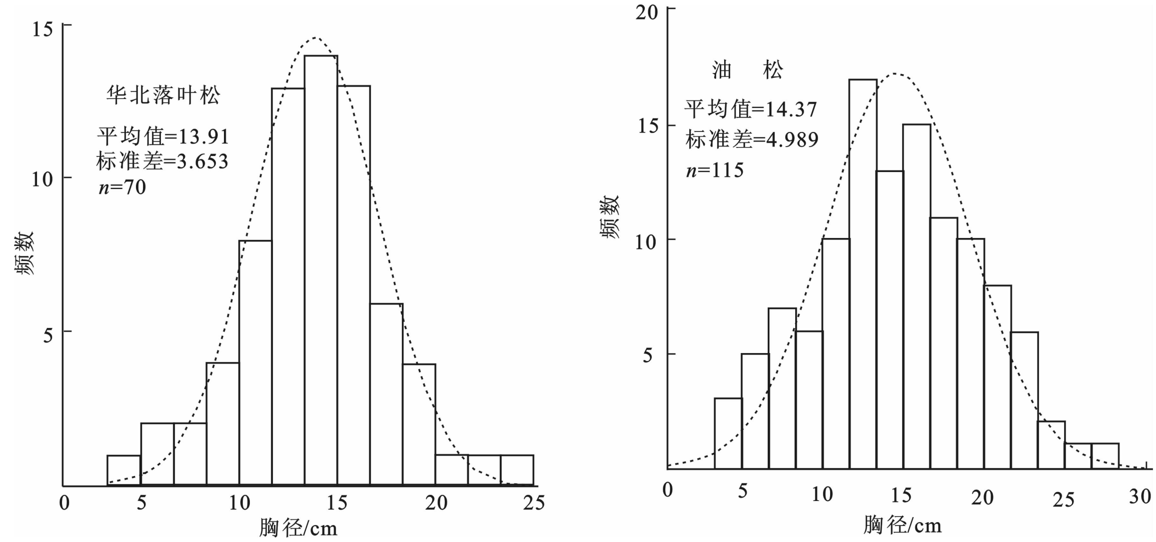

图1 华北落叶松和油松人工林直径分布直方图

Fig. 1 The histogram of diameter structure of *L. principis rupprechtii* and *P. tabulaeformis* forest

调查人工林油松115株，平均胸径为14.37 cm，最大为27.3 cm，标准差为4.989 cm；平均高10

m。偏度和峰度分别是 0.073、-0.526,直径结构特征表现出与华北落叶松类似的对称分布[17](图 1)。

华北落叶松直径分布较集中,12~16 cm 径级占到 63%,而油松同一径级只占 38%。推测原因是华北落叶松林密度相对较小,种内竞争小,优势木和劣势木数量较少,林木向着平均木发展。

2.1.2　胸径、树高生长过程　30 a 油松优势木、平均木和劣势木胸径与树高年生长量(图 2),胸径年平均生长量分别为 0.71、0.43 cm 和 0.22 cm,树高年均生长量为 0.41、0.39 m 和 0.18 m。

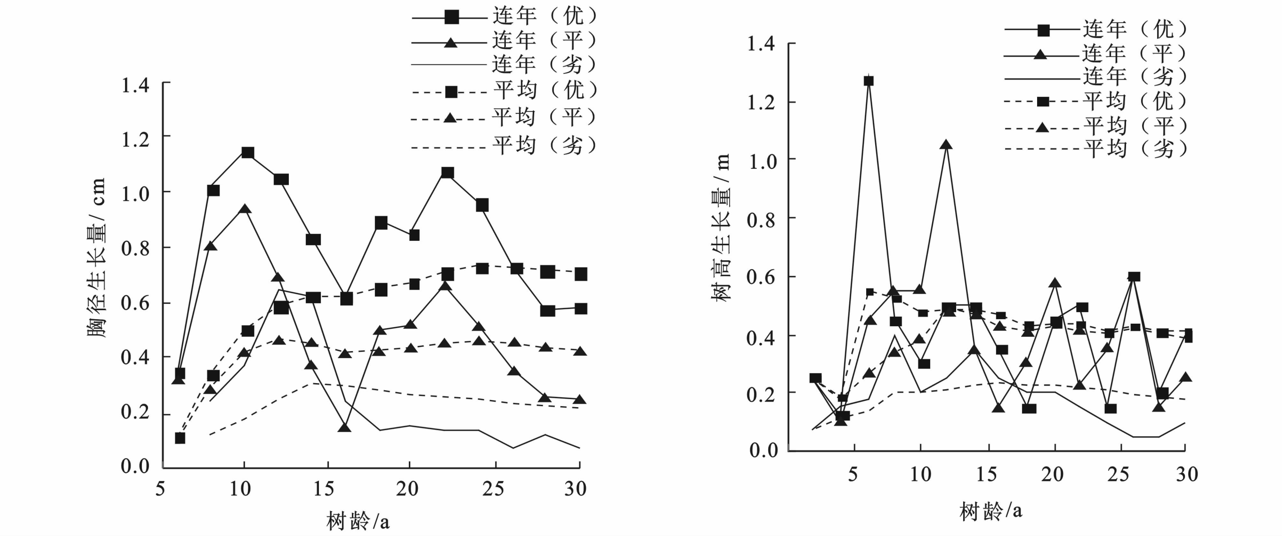

图 2　油松优势木、平均木和劣势木胸径、树高生长变化图

Fig. 2　The growth processes of DBH and height of *P. tabulaeformis*

优势木和平均木的胸径连年生长量变动较大,但趋势基本一致,均出现 2 次较明显的高峰,分别是第 10 年、22 年,其第 16 年达到最低值;劣势木 16 a 以前表现为同样的规律,之后明显低,生长极其缓慢。平均生长量分别在 24、24 a 和 14 a 达到最大值,为 0.78、0.49 cm 和 0.31 cm,以后逐年下降。

树高生长变化规律不明显,优势木、平均木连年生长量分别在第 6 年、12 年达到最大值 1.28 m 和 1.05 m,其后连年生长量均围绕平均值上下波动;劣势木在 16 a 以后被压。

华北落叶松在过去的 29 a 中,优势木、平均木和劣势木胸径年均生长量(图 3)分别为 0.70、0.44 cm 和 0.15 cm,树高年均生长量为 0.49、0.44 m 和 0.18 m。

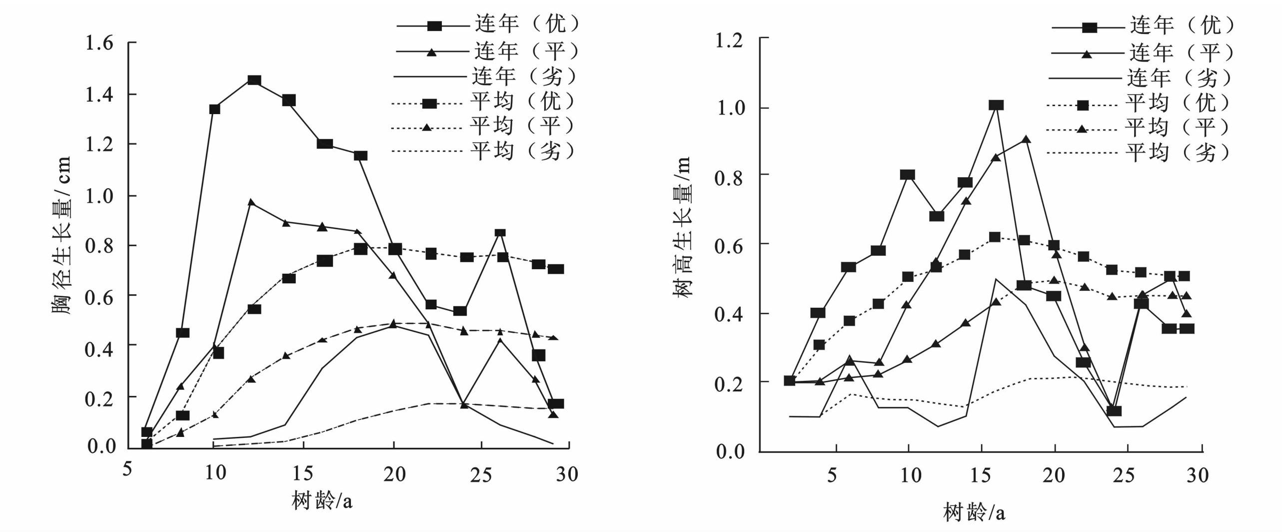

图 3　华北落叶松优势木、平均木和劣势木胸径、树高生长变化图

Fig. 3　The growth processes of DBH and height of *L. principis rupprechtii*

胸径平均生长量分别在 18、20 a 和 24 a 达到最大值,为 0.79、0.49 cm 和 0.17 cm,以后逐年下降。优势木和平均木的连年变化规律基本一致,第 12 年达到最大值,后减小,至 24 a 出现极小值;劣势木 24 a 以前表现较类似的规律,之后减小,生长缓慢。

树高连年生长均表现为先显著升高,在第 16~

18 年达到最大值，然后逐年降低，并在第 24 年降至最低，再上升。其趋势与胸径变化规律相似，却有一定滞后性。优势木的平均生长量也明显大于平均木和劣势木。

2.1.3 材积生长过程　整个林分材积变化用平均木生长过程表示，30 a 油松和 29 a 华北落叶松平均木总材积分别是 0.070、0.074 m^3。

油松和华北落叶松材积连年生长量和平均生长量均表现先显著增加，分别在22 a、26 a达到最大值，然后再逐渐减小。

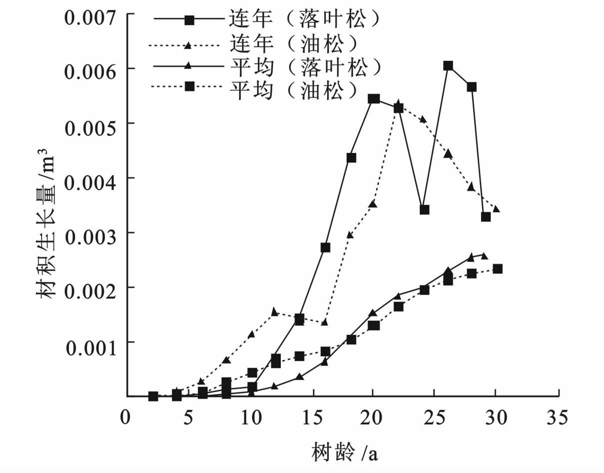

图 4　油松和华北落叶松平均木去皮材积生长变化

Fig. 3　Average increment and annual increment of the average trees' volume

对于树木材积来说，连年生长量和平均生长量 2 条曲线相交时的年龄即为数量成熟龄。而本研究中华北落叶松和油松林均未进入成熟期。预计华北落叶松林成熟年龄在 30 a 以后，油松林在 35 a 左右。

2.2 树皮系数变化规律

油松的树皮系数则随直径的增加而增大，而华北落叶松没有明显的规律。计算树皮系数的均值，并求其变动系数 $C=S_y/\bar{y}$，式中：S_y 为树皮系数的标准差；$\bar{y}$ 为其平均值。油松、华北落叶松的树皮系数均值分别是 1.09、1.10，变动系数为 2.60%、1.13%。

油松树皮系数(y)随其去皮直径(x)的变化规律用线性方程进行拟合，效果较好，拟合方程为 $y=0.0034x+1.048$，$R^2=0.61$，3 cm $<x<$ 28 cm。油松各径级的树皮系数通过方程求得，而华北落叶松树皮系数以其均值计。

利用解析木和树皮系数能较准确的还原平均木各龄阶的带皮胸径，再结合生物量方程求得的连年净初级生产力，可信度较高。

华北落叶松和油松平均木各龄阶带皮胸径和树高的计算结果见表 2，只计胸径>4 cm 的各龄阶胸径。

表 2　2 种针叶树平均木各龄阶带皮胸径

Table 2　The diameter with bark of the two conifers

树龄/a	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
华北落叶松			5.47	7.40	9.29	10.80	11.89	12.27	13.22	13.82
油松	4.44	5.96	6.78	7.11	8.22	9.37	10.86	12.01	12.80	13.38

2.3 生物量模型建立

华北落叶松生物量(B)与胸径(一元方程)、胸径树高联合(二元方程)之间均存在显著的相关关系，据此拟合出 2 种形式的单木各器官生物量和树木总生物量的回归方程(表 3)，相关系数基本都在 0.94 以上，尤其是总生物量回归方程的相关系数均在 0.98 以上。经检验，所有相关性均显著。

MPE 基本在 5.5%(果除外)以内，说明华北落叶松单木生物量模型的平均预估精度达到约 94.5%；*MPSE* 值除果外，均为 10%以内，该指标反

表 3　华北落叶松单木生物量方程

Table 3　Single log biomass equations of *L. principis-rupprechtii*

组分	类型	参数估计值				统计指标		
		α_0	α_1	α_2	ε	R^2	*MPE*(%)	*MPSE*(%)
总	一元	0.914	1.403		3.521	0.987	4.62	5.31
	二元	1.065	1.157	0.247	1.175	0.989	4.38	5.69
枝	一元	1.502	0.741		−2.708	0.993	2.97	4.65
	二元	1.642	0.651	0.087	−3.260	0.994	2.93	4.02
叶	一元	0.002	2.412		0.871	0.988	4.89	4.38
	二元	0.002	2.137	0.252	1.084	0.988	4.87	9.98
果	一元	0.293	1.267		−1.437	0.964	9.68	22.76
	二元	0.311	1.135	0.142	−1.610	0.945	9.91	17.88
干	一元	0.229	1.562		0.638	0.986	5.41	13.18
	二元	0.283	1.216	0.347	−0.494	0.989	4.83	9.72
根	一元	3.110	0.565		−2.651	0.959	5.35	6.64
	二元	1.280	0.516	0.338	0.538	0.969	4.82	4.98

映的是估计单株生物量误差水平。可见,所建立的回归模型能准确的反映乔木层整体的生物量现状。

油松总生物量方程为 $\ln B=-3.523+0.966\ln(D^2h)$ 和 $\ln B=-2.459+2.380\ln D$,R^2 分别为 0.991 和 0.993,各组分生物量方程略[12]。

2.4　林地固碳速率

净生产力以各龄阶生物量差值计算,生物量则由带皮胸径和胸径生物量方程(样木胸径连年变化比较一致,故选用一元方程)计算得出。单木固碳量以净生产力与各器官含碳率乘积计,整个林地的固碳能力以平均木固碳量乘以密度求得。

实测华北落叶松果、叶、枝、干、根含碳率(质量百分比)分别为 47.34%、48.96%、48.20%、46.10%、44.64%;油松叶、枝、干皮、根分别为 47.64%、46.31%、45.59%、45.47%。

2 种林分总固碳量的连年变化如图 5 所示,30 a 油松和 29 a 华北落叶松人工林总固碳量分别是 59.56 $t\cdot hm^{-2}$ 和 34.28 $t\cdot hm^{-2}$。华北落叶松林整个生长阶段平均碳累积速率为 1.18 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$,12 a 后固碳速率比较稳定,平均为 1.64 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$;而油松林整个生长阶段平均碳累积速率为 1.98 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$,16 a 以后,碳累积量快速增加,平均为 3.55 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。

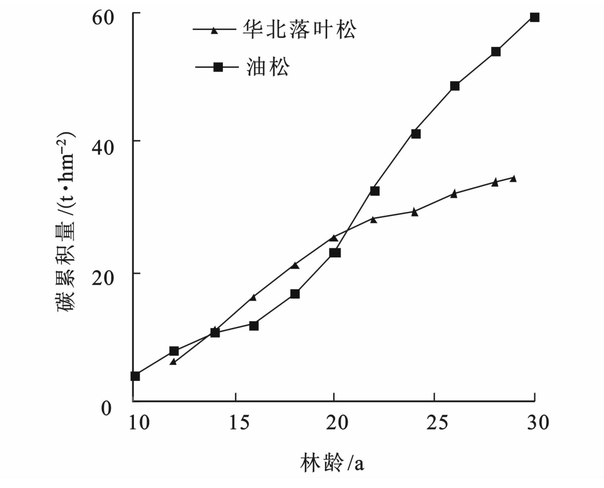

图 5　2 种林分总固碳量连年变化

Fig. 5　Annual changes of the accumulation of carbon of the two conifers

3　结论与讨论

对六盘山 2 种主要人工林典型样地进行每木检尺,华北落叶松林(1 400 株 $\cdot hm^{-2}$)平均胸径为 13.91 cm,平均树高为 13 m;而油松林(2 300 株 $\cdot hm^{-2}$)平均胸径为 14.57 cm,高 10 m。两者直径—株数分布均接近于正态分布,符合人工同龄纯林的直径结构特征,而华北落叶松林较集中于平均木,其密度结构更合理,也与该地区其他的研究[1]结果类似。

华北落叶松和油松所有解析木的胸径连年生长量变动较大,但趋势基本一致。林分直径连年生长量的变化反映出林木对营养空间的需求情况,油松、华北落叶松胸径的连年生长量分别在 12 a 和 10 a 后开始下降,林木对营养和空间需求增加,种内竞争加剧。可适当进行抚育间伐,给林木以适宜的空间,提高胸径生长率。已有研究[18]也表明,六盘山华北落叶松人工林树木平均胸径为 12.8～13.8 cm,1 200～1 500 株 $\cdot hm^{-2}$ 较为合理,对于高密度林分,应该在 10 年生时及时间伐抚育,才有利于林分立木正常生长。

29 a 华北落叶松和 30 a 油松的平均木总材积分别是 0.074、0.070 m^3,二者均未进入成熟期,预计成熟年龄前者在 30 a 以后,而后者 35 a 左右,此期间应进行主伐。这符合这 2 种人工林在北方地区成熟的一般年龄,也与王伟[19]等的研究结果类似。

利用解析木和树皮系数能较准确的还原平均木各龄阶的带皮胸径,再结合生物量方程求得的连年净初级生产力,可信度高。华北落叶松和油松人工林总固碳量分别是 34.28 $t\cdot hm^{-2}$ 和 59.56 $t\cdot hm^{-2}$。前者自第 12 年起,固碳速率比较稳定,为 1.64 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$;而后者生长前期碳累积缓慢,16 a 以后,碳累积量快速增加,平均为 3.55 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。华北落叶松较速生,22 a 以前总固碳量大于油松林,之后油松林较大。

华北落叶松林整个生长阶段平均碳累积速率为 1.18 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$,年固碳速率略低于全国平均水平 1.41 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$[20],12 a 后固碳速率比较稳定,平均为 1.64 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$;而油松林整个生长阶段平均碳累积速率为 1.98 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$,略高于全国平均水平,生长前期受高密度的影响,碳累积缓慢,16 a 以后,碳累积量快速增加,平均为 3.55 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。

本研究只是初步探索了六盘山华北落叶松和油松林中 2 个典型林地的生长规律和固碳能力,关于更多林分不同年龄的生长过程和碳汇功能还有待研究。

参考文献:

[1]　李晓慧,陆元昌,袁彩霞,等.六盘山林区林分直径分布模型研究[J].内蒙古农业大学学报,2006,27(4):68-72.
LI X H,LU Y C,YUAN C X,*et al*. The study on stand stem number-diameter distribution in forest district of Liupan Mountains[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University,2006,27(4):68-72.(in Chinese)

[2]　王俊玲,金红喜,杨占彪,等.六盘山华北落叶松人工林多样性、

生产力研究[J]. 兰州大学学报,2008,44(1):31-35,42.
WANG J L,JIN H X,YANG Z B,*et al*. Species diversity and productivity of *Larix principis-rupprechtii* plantation woods in Liupan Mountains[J]. Journal of Lanzhou University,2008,44(1):31-35,42. (in Chinese)

[3] 金红喜,杨占彪,袁彩霞,等. 六盘山 4 种类型森林群落天然更新初探[J]. 西北林学院学报,2009,24(1):93-97.
JIN H X,YANG Z B,YUAN C X,*et al*. Regeneration of four types forest communities in Liupan Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(1):93-97. (in Chinese)

[4] BREWER S W,WEBB M A H. Ignorant seed predators and factors affecting the seed survival of a tropical palm[J]. Oikos,2001,93:32-41.

[5] 杨占彪,李圣男,金红喜. 六盘山林区华北落叶松天然更新影响因素研究[J]. 江苏农业科学,2011,39(3):206-209.

[6] 刘延惠,王彦辉,于澎涛,等. 六盘山主要植被类型的生物量及其分配[J]. 林业科学研究,2011,24(4):443-452.
LIU Y H,WANG Y H,YU P T,*et al*. Biomass and its allocation of the main vegetation types in Liupan Mountains[J]. Forest Research,2011,24(4):443-452. (in Chinese)

[7] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,等. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):134-138.
SHI Z J,WANG Y H,YU P T,*et al*. Study on different forestry vegetation's eco-hydrological function in Liupan Mountain of Ningxia China[J]. Journal of Soil Water Conservation,2005,19(3):134-138. (in Chinese)

[8] 王梦麦,戴君虎,白洁,等. 利用树木年轮重建六盘山地区 1900 年以来的干湿变化[J]. 古地理学报,2009,11(3):355-360.
WANG M M,DAI J H,BAI J, *et al*. Reconstruction of humidity changes from tree rings in Liupan Mountains Area since 1900[J]. Journal of Palaeogeography,2009,11(3):355-360. (in Chinese)

[9] FANG J Y,CHEN A P,PENG C H,*et al*. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science,2001,292:2320-2322.

[10] 莫菲,王彦辉,熊伟,等. 六盘山华北落叶松人工纯林枯落物储量的空间变异分析[J]. 林业科学,2009,45(9):1-5.
MO F,WANG Y H,XIONG W,*et al*. Spatial variation of litter mass for pure plantation of *Larix principis-rupprechtii* in the Liupan Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae,2009,45(9):1-5. (in Chinese)

[11] 张光灿,刘霞,周泽福,等. 黄土丘陵区油松水土保持林生长过程与直径结构[J]. 应用生态学报,2007,18(4):728-734.
ZHANG G C,LIU X,ZHOU Z F,*et al*. Growth process and diameter structure of *Pinus tabulaeformis* forest for soil and water conservation in Loess Plateau hilly regions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(4):728-734. (in Chinese)

[12] 陈英,杨华,李伟,等. 北京地区侧柏人工林标准木生长过程研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(5):153-157.
CHEN Y,YANG H,LI W,*et al*. Standard tree growth of *Platycladus orientalis* plantation in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(5):153-157. (in Chinese)

[13] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006:172-175.

[14] PARRESOL B R. Assessing tree and stand biomass:a review with examples and,critica1 comparisons[J]. Forest Science,1999,45(4):573- 593.

[15] 曾伟生,唐守正. 东北落叶松和南方马尾松地下生物量模型研建[J]. 北京林业大学学报,2011,33(2):1-6.
ZENG W S,TANG S Z. Establishment of below-ground biomass equations for larch in northeastern and masson pine in southern China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2011,33(2):1-6. (in Chinese)

[16] 程堂仁,冯菁,马钦彦,等. 小陇山油松林乔木层生物量相容性线性模型[J]. 生态学杂志,2008,27(3):317-322.
CHENG T R,FENG J,MA Q Y,*et al*. Linear compatible models of tree layer biomass of *Pinus tabulaeformis* plantations in Xiaolong Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology,2008,27(3):317-322. (in Chinese)

[17] 黄文丁,张立均. 林农复合系统中林分直径分布动态研究[J]. 南京林业大学学报,1988,13(4):86-91.
HUANG W D,ZHANG L J. Diameter distribution dynamics of stands in agroforestry system[J]. Journal of Nanjing Forestry University,1988,13(4):86-91. (in Chinese)

[18] 王晶. 六盘山南部华北落叶松人工林生长特征及其影响因子[D]. 哈尔滨,东北林业大学,2009.

[19] 王伟,马履一,贾忠奎,等. 河北平泉地区油松人工林生长过程的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(6):13-17.
WANG W,MA L Y,JIA Z K,*et al*. A study of growing process of *Pinus tabulae* formis plantation in Pingquan,Hebei[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2012,32(6):13-17. (in Chinese)

[20] 胡会峰,刘国华. 中国天然林保护工程的固碳能力估算[J]. 生态学报,2006,26(1):291-296.
HU H F,LIU G H. Carbor sequestration of China's National Forest Protection Project[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(1):291-296. (in Chinese)