

DOI: 10.5846/stxb201309122253

姜鹏, 张绍轩, 任佳佳, 王襄平, 孟京辉, 谷建才, 陆贵巧. 木兰围场典型落叶松-杨桦混交林生物量及固碳能力. 生态学报, 2015, 35(9): 2937-2945.
Jiang P, Zhang S X, Ren J J, Wang X P, Meng J H, Gu J C, Lu G Q. Biomass and carbon fixation ability of typical larch- poplar and betula mixed forest in Mulanweichang. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2937-2945.

木兰围场典型落叶松-杨桦混交林生物量及固碳能力

姜 鹏^{1,3}, 张绍轩¹, 任佳佳¹, 王襄平², 孟京辉², 谷建才^{1,3,*}, 陆贵巧¹

1 河北农业大学, 保定 071000

2 北京林业大学, 林学院, 北京 100083

3 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 保定 071000

摘要:以木兰林管局北沟林场内典型落叶松-杨桦混交林、落叶松人工林、白桦天然次生林、山杨天然次生林为研究对象, 利用分层切割法和分层挖掘法对华北落叶松、白桦、山杨的生物量进行测定, 并通过解析木进行了生长量的测定, 从而建立生物量、生长量模型对林分的碳储量和固碳能力进行了估算。其研究表明: 落叶松-杨桦混交林较落叶松人工林、白桦天然次生林、山杨天然次生林具有一定幅度的增产效益。落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨表现均优于各自的人工林或天然林, 平均胸径分别高出 6.7%、12.8%、4.1%, 平均树高分别高出 12.1%、1.4%、11.1%。落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨的固碳量增幅分别为 29.74%、28.36%、34.52%; 落叶松人工林固碳量增幅 27.09%; 白桦天然次生林固碳量增幅 26.34%; 山杨天然次生林固碳量增幅 26.24%。落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨固碳量的增幅分别高于所对应树种的 2.65%、2.02%、8.28%。

关键词:落叶松-杨桦混交林; 落叶松; 白桦; 山杨; 生物量模型; 生物量; 固碳能力

Biomass and carbon fixation ability of typical larch- poplar and betula mixed forest in Mulanweichang

JIANG Peng^{1,3}, ZHANG Shaoxuan¹, REN Jiajia¹, WANG Xiangping², MENG Jinghui², GU Jiancai^{1,3,*}, LU Guiqiao¹

1 Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

2 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Hebei Province Key Laboratory of Genetic Resources of Forest and Forest Protection, Baoding 071000, China

Abstract: A mixed Dahurian larch and polar birch forest, artificial *Larix principis-rupprechtii* forest, natural *Betula platyphylla* secondary forest, and natural *Populus davidiana* secondary forest, which are all part of the Bei-gou Forest Farm in Mulan Forestry Bureau were studied here. The layered cut method was used to measure aboveground biomass in all four forests. The layered mining method was used to measure underground biomass. The trunks were divided into segments 0.5 m in diameter and 5 cm thick. The north-south diameter of each disk was recorded. Tree roots were divided into 0.5 cm layers, and the crown projection area was dug up. Fresh weights of the trunks (with bark), branches, leaves, and roots of model trees were recorded in the open air. Samples of each organ were dried to (105°C) constant weight and weighed. To determine biomass, leaf and branch samples were collected from different parts of the crown cover. They were weighed and dried, and their moisture content was calculated. For trunks, disk sections were obtained and weighed before and after drying. Moisture content was calculated. The leaf, branch, and root biomass of each model tree was calculated. Increments were measured in analytic trees. Then models of biomass and increments were established. Carbon reserve and carbon

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAD38B05)

收稿日期: 2013-09-12; 网络出版日期: 2014-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gujiancai@126.com

sequestration were estimated. Significant power functions and logistic equations were chosen as biomass prediction models. DBH (diameter at breast height) served as an independent variable and the napierian logarithm of biomass and total biomass of organs as the dependent variable. Optimization was performed according to regression curve and residual sum of squares (SSE), discriminant coefficient (R^2), total relative error (RS), average relative error (E_1), absolute value of average relative error (E_2), AIC (Akaike Information Criterion), and BIC (Bayesian Information Criterion). DBH increments were measured with analytic trees, wooden cores, and DBH increments of the past five years as a baseline. A power function regression model was established. Then the DBH increments of trees over the past five years were estimated. Then the fixed carbon content of each forest was calculated for that period using the carbon content of different tree species and organs. Results showed the Dahurian larch and polar birch mixed forest stored more carbon than other forests. The Dahurian larch, *Betula platyphylla*, and *Populus davidiana* in the mixed forest were all superior to their respective artificial and natural forests. The mean DBH (diameter at breast height) was higher by about 6.7%, 12.8%, and 4.1%. The mean was higher by about 12.1%, 1.4%, and 11.1%. The fixed carbon content growth rates of Dahurian larch, *Betula platyphylla*, and *Populus davidiana* in the mixed forest were 29.74%, 28.36%, and 34.52%, respectively. The rate of carbon fixation was 27.09% in the artificial *Larix principis-rupprechtii* forest; 26.34% in the natural *Betula platyphylla* secondary forest; and 26.24% in the natural *Populus davidiana* secondary forest. The rates of carbon fixation of Dahurian larch, *Betula platyphylla*, and *Populus davidiana* in the Dahurian larch and polar-birch mixed forest were 2.65%, 2.02%, and 8.28% higher, respectively, than in the corresponding monoculture forests.

Key Words: larch- poplar and betula mixed forest; *Larix principis-rupprechtii*; *Betula platyphylla*; *Populus davidiana*; biomass model; biomass; carbon fixation ability

木兰围场国有林场管理局以经营天然林为主,有天然林总面积 5.333 万 hm^2 ,总蓄积量 226 万 m^3 ,是华北地区集中连片天然林最多的区域。经过林管局 40 年的实践,探索出了一整套改造天然次生林,“引针入阔”的营林模式,在桦、杨、柞等阔叶林采伐迹地上或林冠下人工引进针叶目的树种,使华北落叶松、油松、云杉等针叶树和天然林木有机结合,培育成了不同形式的针阔混交林及针叶纯林。目前落叶松的引进成为冀北山地速生丰产用材林的最佳模式之一,落叶松已成为北方森林引针入阔最重要的树种之一,因其长迅速、适应性强,在林管局人工林营造中得到广泛应用,经济效益高,社会和生态效益明显,40 年来,已经培育华北落叶松用材林 2.667 万 hm^2 。但是,落叶松纯林会导致地力严重衰退^[1],生态系统稳定性和生物多样性下降。针阔混交林通常会表现出较高的竞争趋势和旺盛的生产力。

很多的研究都已证实落白混交林可以改善地力^[1-2],并且提出了关于营造和经营落白混交林的关键技术^[3-4],但对于落叶松-杨桦混交林的生物量和固碳能力的研究未见发表。大量研究表明针阔混交林的生产力较相对应的纯林是否增加,主要取决于树种、立地因子、经营措施,营林模式等因素^[1,5],针阔混交林对林分生产力和稳定性具有改善作用^[1-2],落叶松-杨桦混交林的生物量和固碳能力的影响尚不得而知。本研究以木兰围场国有林场管理局辖区内北沟林场中落叶松-杨桦混交林、落叶松人工林、白桦天然次生林、山杨天然次生林为研究对象,通过对林分生长情况的调查,确定对林分和各树种林分生长量、生物量分配规律,估算其固碳能力,为研究混交林树种之间的关系、生物量、固碳能力的提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验地概况

研究区选为木兰围场林管局下属的北沟林场,在 1956 年建厂,林场坐标为北纬 40°54'N,东经 117°27'E,属于寒温带向中温带过渡、半干旱向半湿润过渡、大陆性季风型山地气候,冬季酷寒干燥,夏季凉爽无暑热,春秋两季多风沙。林场位于七老图岭山西侧,地势东北高,西南低,海拔在 800—1600 m,最高峰处于色树梁东

光顶,海拔为 1600 m,伊玛吐河自北向南从北沟林区穿过后流入隆化,水热同季,无霜期 67—108 d,年平均气温 $-1.4\sim-4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量在 400—500 mm,主要集中在 7—9 月份,占全年降水量的 67%,年蒸发量 1462—1556 mm。林场内土壤包括棕壤、褐土、风砂土、草甸土、沼泽土、灰色森林土、黑土等 7 个土类。林场总经营面积为 5428.8 hm^2 ,林区内有天然林 1485.4 hm^2 ,主要树种有桦、杨、落、油松等乔木;林区内的人工林 1180.5 hm^2 ,主要树种有油、落、杨等树种;林区主要以落叶松-杨桦混交林为主,阔叶混交为辅,混交林总面积为 1560.9 hm^2 ,林区的森林覆被率为 85.6%^[6]。林场的森林主要以天然次生林和人工林为主,天然次生林主要有硕桦林(*Betula costata* forest)、白桦(*Betula platyphylla*)、棘皮桦林(*Betula dahurica* forest)、山杨(*Pobulus davidiana*)、柞树(*Quercus mongolica*)、五角枫(*Acer truncatum*)、榆树(*Ulmus* spp.)等,人工林主要树种有云杉(*Picea asperata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* forest)等。林区内还有很丰富的生物资源,高等维管植物有 600 多种(包含了 100 多种有观赏价值的高等维管植物,200 余种药用价值植物)还有野生脊椎动物 20 余种,鸟类 80 余种^[6]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地的设置

2008 年 9 月—2012 年 7 月,在落叶松人工林、白桦天然次生林、杨树天然次生林及落叶松-杨桦混交林中,各随机布设面积 10 块 30 m $\times$ 30 m 的标准地,分别对落叶松、白桦、山杨和混交林中标准地内的林木分树种进行每木检尺,实测树种、胸径、树高等林木因子指标,根据每木检尺结果,计算各树种的平均胸径和平均树高。以 4 径阶为单位,每块标准地内按径阶选择若干株标准木作为解析木,落叶松人工林 6 株,白桦天然次生林 8 株,杨树天然次生林 8 株,落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨,分别选择 28、19、23 株,共 70 株。

1.2.2 生物量测定、模型建立和固碳能力的推算

采用“分层切割法”测量 3 种林木的地上器官生物量,采用“分层挖掘法”测量地下生物量。树干以 0.5 m 为分层段,每段截取 5 cm 圆盘,每段圆盘记录南北直径;树根以 0.5 m 为 1 层,挖取树冠投影区域。在野外实地分别称量标准木的带皮树干的鲜重和全部树枝、树叶、树根的鲜重。将各器官的样品,带回室内进行烘干(105 $^{\circ}\text{C}$)至恒重,并称重。叶、枝、根生物量的测定:在林冠不同部位采取叶、枝样品,进行烘干后求其含水率,推算其生物量;树干生物量的测定:分段取圆盘,烘干后测定干质量,求其含水率,推算其树干生物量^[1]。计算各株标准木的叶、枝、干、根的生物量。

本文选择具有较好生物学意义的幂函数和 Logistic 方程作为生物量的预估模型。模型以胸径为自变量,各器官生物量、总生物量取自然对数为因变量,根据回归曲线及评价指标残差平方和(SSE)、判别系数(R^2)、总相对误差(RS)、平均相对误差(E_1)、平均相对误差绝对值(E_2)、AIC(Akaike Information Criterion)和 BIC(Bayesian Information Criterion)选定最优模型^[7-9]。

结合解析木测定的胸径生长量以及生长锥木芯,以近 5a 胸径生长量为基础,建立胸径-5a 生长量的幂函数回归模型来估算林木 5a 的胸径生长量。在此基础上估算出林分在 5a 间生长的生物量,并根据各树种、不同器官的含碳率计算出林分在此期间的固碳量。本研究采用马钦彦^[10]等的含碳率测定结果,树种平均含碳率分别为落叶松(0.513)、白桦(0.488)、山杨(0.516)。

1.3 数据处理

利用 Excel 软件做基本的数据处理、图和表等,用 ForStat2.1(统计之林)和 SPSS18.0 统计软件进行各指标进行相关性分析和回归分析等^[11-12]。

2 结果与分析

2.1 天然林、混交林林分生长及单株林木生物量

落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦和山杨的胸径生长存在着显著差异($P<0.05$),其平均胸径表现为落叶松(13.53 cm) $<$ 山杨(16.33 cm) $<$ 白桦(19.52 cm);其树高生长中,白桦和山杨的高生长不存在显著差异

($P>0.05$),且都与落叶松的高生长存在显著差异($P<0.05$),落叶松平均树高最低为 11.95 m,白桦和山杨的平均树高相似,分别为 13.37 m 和 13.34 m(表 1)。

混交林中落叶松、白桦和山杨的平均胸径均大于各自对应树种林分的平均胸径,分别高出 6.7%、12.8%、4.1%,除了混交林中白桦与天然林白桦的平均胸径上存在显著差异外,其他两种之间均不存在显著差异;混交林中落叶松、白桦和山杨的平均树高也大于各自对应林种的平均树高,分别高出 12.1%、1.4%、11.1%,平均树高的差异表现与平均胸径的差异表现相反,除了混交林中白桦与天然林白桦的平均胸径上不存在显著差异外,其他两种之间均存在显著差异(表 1)。

表 1 各标准地的林分结构特征

Table 1 The forests structure characteristic of larch- poplar and each standard ground

林分类型 Forest types	树种 Tree species	密度 Canopy density		胸径 DBH		树高 Tree height	
		株数 /hm ²	%	均值 Average/cm	标准差 Standard differential	均值 Average/cm	标准差 Standard differential
落叶松-杨桦混交林	落叶松	279	32.44	13.53a	6.32	11.95a	4.90
Larch- poplarand Betula	白桦	190	22.09	19.52b	7.38	13.37b	4.06
Mixed Forest	山杨	227	26.4	16.33c	5.41	13.34b	3.91
	伴生树种	164	19.06	11.73	3.91	8.87	2.84
	总计	860	100	—	—	—	—
落叶松人工林	落叶松	695	79.07	12.68a	4.45	10.66c	2.75
Larch plantation	伴生树种	184	20.93	11.07	5.30	8.57	2.53
	总计	879	100	—	—	—	—
白桦天然次生林	白桦	659	69.81	17.30c	6.31	13.19b	3.40
Birch natural	伴生树种	285	30.19	15.48	8.32	10.14	4.40
secondary forest	总计	944	100	—	—	—	—
山杨天然次生林	山杨	694	82.13	15.68c	6.04	12.01c	3.41
Aspen natural	伴生树种	151	17.87	16.91	10.58	11.12	4.32
secondary forest	总计	845	100	—	—	—	—

表中数据后不同字母代表不同林分类型间差异显著($P<0.05$)

混交结构对落叶松和山杨的树高产生明显的促进作用,但对胸径的影响较小;而白桦正好相反。通过混交林与落叶松人工林、白桦天然林、山杨天然林的比较分析结果表明,落叶松-杨桦混交林的结构有利于提高林分生产力,混交林对林木生长有促进作用^[1]。

2.2 落叶松-杨桦混交林中单株生物量模型

林木的生物量是随着胸径的增加而增大,但是由于树种不同,同林分中,不同树种的生物量积累往往不同^[12-16]。利用外业调查混交林所获得 70 株标准木生物量数据,采用 SPSS 18.0 以及 Forstat2.1 统计软件,采用已选定 Logistic 方程、幂函数为回归模型,以胸径(DBH)为自变量,单株总生物量的自然对数($\ln W$)为因变量,建立回归模型,最终选出落叶松、白桦、山杨的单木各生物量最优估测模型。在样地内,以落叶松、白桦、山杨的所有标准木数据作为检验数据,采用选定的 6 个检测评价指标为标准,对混交林中建立的单木生物量模型进行检验和评价(表 2)。

从表 2 中可以看出:混交林中落叶松树干、树根、树叶、树枝和总生物量的残差平方和 SSE 的平均值为 3.869,总生物量的残差较小在 1.494—1.737 之间,其根生物量残差较大在 8.837—9.951 之间;树干、树根、树叶、树枝和总生物量的总相对误差 RS 在 0.651%以内,总体误差较小,这是由于残差整体较小的缘故;树干、树根、树叶、树枝和总生物量的平均相对误差 E_1 在 0.360%之内,且平均相对误差绝对值 E_2 在 6.291%之内。混交林中白桦树干、树根、树叶、树枝和总生物量的残差平方和 SSE 的平均值为 1.193,总生物量的残差较小在 0.413—1.303 之间,其叶生物量残差较大在 2.149—2.584 之间;树干、树根、树叶、树枝和总生物量的总相对误

表 2 落叶松-杨桦混交林中各种生物量模型及检测评价指标

林分类型 Forest types	树种 Tree species	器官 Organ	方程 Equation	回归模型 Regression model	模型汇总 Model summary		检测评价指标 Test evaluation			
					R^2	F	REE	RS/	$E_1/$	$E_2/\%$
混交林 Mixed forest	落叶松	干	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.076+0.091 \times 0.878^W)$	0.985	1673.068	0.61	0.011	0.122	1.138
		干	幂函数	$\ln(W) = 5.579D^{0.252}$	0.993	3653.601	0.505	0.016	0.009	1.167
		根	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.099+0.102 \times 0.896^W)$	0.791	98.142	8.837	0.651	0.360	5.994
		根	幂函数	$\ln(W) = 4.875D^{0.195}$	0.703	61.618	9.951	0.343	0.326	6.291
		叶	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.107+0.093 \times 0.905^W)$	0.949	482.506	1.595	0.067	0.177	2.496
	白桦	叶	幂函数	$\ln(W) = 4.942D^{0.166}$	0.858	156.961	2.471	0.109	0.094	3.401
		枝	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.087+0.087 \times 0.892^W)$	0.883	196.655	5.697	0.273	0.047	4.128
		枝	幂函数	$\ln(W) = 5.692D^{0.191}$	0.847	144.423	5.792	0.153	0.134	4.353
		总	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.075+0.073 \times 0.886^W)$	0.970	850.583	1.494	0.005	0.190	1.858
		总	幂函数	$\ln(W) = 6.572D^{0.202}$	0.963	678.121	1.737	0.046	0.032	1.898
	山杨	干	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.076+0.136 \times 0.877^W)$	0.979	801.401	0.754	0.069	0.170	1.562
		干	幂函数	$\ln(W) = 4.092D^{0.341}$	0.984	1016.228	0.941	0.016	0.028	1.800
		根	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.084+0.13 \times 0.878^W)$	0.968	516.005	0.606	0.159	0.330	1.523
		根	幂函数	$\ln(W) = 3.804D^{0.337}$	0.973	619.065	1.779	0.001	0.044	2.521
		叶	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.094+0.13 \times 0.9^W)$	0.854	99.649	2.584	0.395	0.170	3.737
人工林 Plantation	落叶松	叶	幂函数	$\ln(W) = 3.94D^{0.273}$	0.935	244.569	2.149	0.083	0.073	3.318
		枝	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.083+0.128 \times 0.888^W)$	0.967	494.705	0.718	0.011	0.050	1.787
		枝	幂函数	$\ln(W) = 4.024D^{0.318}$	0.986	1195.483	0.682	0.004	0.020	1.650
		总	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.074+0.084 \times 0.89^W)$	0.972	591.87	1.303	0.071	0.342	1.724
		总	幂函数	$\ln(W) = 6.3D^{0.217}$	0.986	1170.275	0.413	0.017	0.010	1.061
	白桦	干	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.079+0.069 \times 0.901^W)$	0.993	2994.553	0.104	0.005	0.029	0.536
		干	幂函数	$\ln(W) = 6.121D^{0.215}$	0.993	2924.31	0.16	0.007	0.004	0.633
		根	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.087+0.102 \times 0.875^W)$	0.961	514.982	0.821	0.020	0.214	1.575
		根	幂函数	$\ln(W) = 5.28D^{0.229}$	0.984	1301.166	0.376	0.016	0.010	1.034
		叶	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.099+0.118 \times 0.884^W)$	0.853	121.571	2.07	0.257	0.013	3.137
	山杨	叶	幂函数	$\ln(W) = 4.545D^{0.23}$	0.922	249.423	1.669	0.064	0.052	2.451
		枝	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.095+0.059 \times 0.937^W)$	0.812	90.522	1.577	0.411	0.422	2.379
		枝	幂函数	$\ln(W) = 5.62D^{0.182}$	0.910	212.452	1.576	0.038	0.038	2.356
		总	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.077+0.072 \times 0.878^W)$	0.967	619.734	0.676	0.058	0.197	1.119
		总	幂函数	$\ln(W) = 6.768D^{0.193}$	0.991	2223.703	0.201	0.007	0.004	0.713
天然林 Natural forest	落叶松	总	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.076+0.087 \times 0.871^W)$	0.891	48.844	1.129	-0.133	0.320	3.098
		总	幂函数	$\ln(W) = 6.284D^{0.216}$	0.952	119.76	0.859	0.073	0.059	2.718
		总	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.075+0.077 \times 0.89^W)$	0.968	180.508	0.516	0.100	0.402	2.105
		总	幂函数	$\ln(W) = 6.338D^{0.211}$	0.991	668.895	0.146	0.018	0.009	1.184
		总	Logistic	$\ln(W) = 1/(0.077+0.066 \times 0.878^W)$	0.974	184.939	0.231	0.092	0.287	1.453

n : 样本数; SSE: 残差平方和; RS: 总相对误差; E_1 : 平均相对误差绝对值; AIC: Akaike Information Criterion; BIC: Bayesian Information Criterion

差 RS 在 0.395% 以内,误差较小;树干、树根、树叶、树枝和总生物量的平均相对误差 E_1 在 0.342% 之内,且平均相对误差绝对值 E_2 在 3.737% 之内。混交林中山杨树干、树根、树叶、树枝和总生物量的残差平方和 SSE 的平均值为 0.923,总生物量的残差较小在 0.201—0.676 之间,其叶生物量残差较大在 1.669—2.070 之间;树干、树根、树叶、树枝和总生物量的总相对误差 RS 在 0.088% 以内,误差很小;树干、树根、树叶、树枝和总生物量的平均相对误差 E_1 在 0.442% 之内,且平均相对误差绝对值 E_2 在 3.137% 之内。混交林内,由于落叶松、白桦、山杨的残差小,其 4 个指标均表现出拟合模型比较理想。落叶松人工林、白桦和山杨的天然次生林都只做出总生物量模型,其 SSE 、 RS 、 E_1 、 E_2 变化较小,预估效果较好。

回归模型都在 0.05 水平上成显著性,其各类函数的相关判定系数 R^2 在 0.703—0.993 之间,落叶松-杨桦混交林中林木的回归模型函数是根据判定系数越大拟合模型精度相对越高。并在回归模型的基础上,选择收敛的模型为模拟结果,利用 AIC 和 BIC(模型拟合优度指标)对模型的模拟效果进行比较,2 个指标越小说明拟合的精度越高^[17],模拟计算结果见表 2。根据 AIC 和 BIC 模型拟合优度指标越小说明拟合的精度越高,选取最优回归模型(表 2)。

根据外业调查所获得 70 株落叶松、白桦、山杨的标准木生物量数据,利用表 3 所建立的总生物量模型,并采用 SPSS 18.0 建立 Logistic 方程、幂函数的胸径-单株立木 $\ln(W_{\text{Total}})$ 的散点图和回归曲线(图 1)。

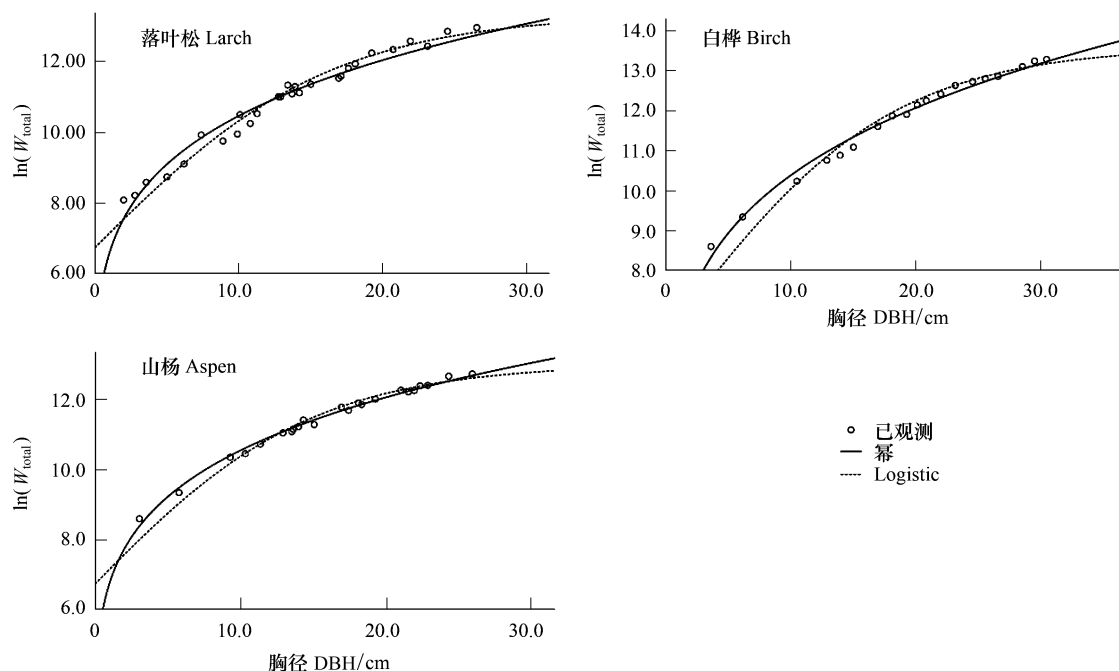


图 1 胸径和 $\ln(W_{\text{Total}})$ 散点及回归曲线图

Fig.1 Scatter and regression curve of DBH and $\ln(W_{\text{Total}})$

依据 2008—2012 年间解析木的生长量数据以及生长锥数据,建立胸径-生长量的回归关系的回归方程,并随机选取 30 个生长锥数据作为检验数据(表 3)。

混交林的胸径生长量与胸径的模型判别系数 R^2 均在 0.65 以上,说明方程拟合效果良好;其胸径生长量的残差平方和 SSE 在 1.618—1.997,白桦的胸径生长量残差平方和 SSE 最小;胸径生长量的总相对误差 RS 在 -5.001%—3.200% 以内,落叶松和山杨总相对误差 RS 为负值,30 个样本中残差负值的较多;胸径生长量的平均相对误差 E_1 在 -10.591%—5.195% 之间,且平均相对误差绝对值 E_2 在 21.170%—27.116% 之间;混交林的胸径生长量与胸径的回归模型拟合结果较为理想。

落叶松林、白桦林和山杨林的胸径生长量与胸径的模型判别系数 R^2 均在 0.679—0.761 之间,其胸径生长量的残差平方和 SSE 在 1.372—1.459,山杨的胸径生长量残差平方和 SSE 最小;胸径生长量的总相对误差 RS

在-5.176%—2.474%以内,落叶松的总相对误差 RS 为负值;胸径生长量的平均相对误差 E_1 在-7.916%—5.982%之间,平均相对误差绝对值 E_2 在 22.650%—24.299%之间。天然林中各树种拟合方程的判别系数 R^2 大于混交林中落叶松、白桦、山杨的判别系数,其它 4 种指标差异不大,均表现出比较理想拟合模型。

表 3 各树种定期生长量与胸径的模型关系

Table 3 Model relationships between the regular growth of each species and BDH

林分类型 Forest types	树种 Tree Species	回归模型 Regression model	模型汇总 Model Summary		检测评价指标 Test Evaluation			
			R^2	F	SSE	$RS/\%$	$E_1/\%$	$E_2/\%$
混交林	落叶松	$\ln Z = -2.560 + 4.055 \ln D - 1.040 (\ln D)^2$	0.675	60.272	1.744	-1.519	3.902	27.116
Mixed forest	白桦	$\ln Z = -2.362 + 3.388 \ln D - 0.762 (\ln D)^2$	0.651	63.302	1.618	3.200	5.195	21.170
	山杨	$\ln Z = -2.750 + 3.935 \ln D - 0.962 (\ln D)^2$	0.753	119.168	1.997	-5.001	-10.591	24.442
人工林 Plantation	落叶松	$\ln Z = -4.395 + 5.730 \ln D - 1.432 (\ln D)^2$	0.738	81.587	1.459	-5.176	-7.916	24.299
天然林	白桦	$\ln Z = -1.582 + 2.673 \ln D - 0.645 (\ln D)^2$	0.679	71.803	1.416	2.474	5.982	22.650
Natural forest	山杨	$\ln Z = -2.828 + 4.448 \ln D - 1.128 (\ln D)^2$	0.761	120.857	1.372	0.007	-1.042	23.366

2.3 落叶松-杨桦混交林生物量和固碳能力

利用 2.2 生物量最优模型以及胸径-生长量模型,依据每木检尺测得的混交林与天然林的胸径数据 ($DBH > 5$),推算出落叶松-杨桦混交林、落叶松人工林、白桦天然林及山杨天然林中不同树种的立木的总生物量(表 4)。

落叶松-杨桦混交林的生物量的分布情况见表 4,其中 2012 年落叶松的总生物量为 28.79 t/hm²,白桦的总生物量的为 39.42 t/hm²,山杨生物量总量的为 29.11 t/hm²,落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨的生物量比例为 0.296:0.405:0.299,全林的总生物量为 97.32 t/hm²。5 年内落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨的增幅依次为 29.71%、28.35%、34.55%,全林 5 年内林分总生物量增幅 30.55%。在 2008—2012 年之间,落叶松人工林生物量增幅为 27.09%,白桦天然次生林生物量增幅为 26.33%,山杨天然次生林生物量增幅为 26.25%。

表 4 各林分生物量特征

Table 4 Biomass characteristics of each stand

林分类型 Forest types	树种 Tree Species	株数 Individual plant	2012 年林分生物量 Stand biomass in 2012/(t/hm ²)	2008 年林分总生物量 Total stand biomass in 2008/(t/hm ²)	增幅 Increase Amplitude/%
混交林 Mixed forest	落叶松	254	28.79	22.19	29.71
	白桦	180	39.42	30.71	28.35
	山杨	221	29.11	21.64	34.55
	总计	655	97.32	74.54	30.55
人工林 Plantation	落叶松	649	51.42	40.46	27.09
天然林 Natural forest	白桦	615	76.46	60.52	26.33
	山杨	625	76.87	60.89	26.25

在此基础上,利用每个树种的 2008 年和 2012 年的总生物量及增长量乘以各器官含碳率,求出全林分的碳储量和固碳能力,其落叶松-杨桦混交林、落叶松人工林、白桦天然次生林及山杨天然次生林的碳储量和固碳能力分布情况见表 5。

在 2012 年,落叶松-杨桦混交林的碳储量为 49.03 kg C/hm²(表 5),落叶松人工林的碳储量为 26.38 kg C/hm²,白桦天然次生林的碳储量为 26.38 kg C/hm²,山杨天然次生林的碳储量为 26.38 kg C/hm²。落叶松-杨桦混交林 5a 固碳量为 11.49 kg C 5a⁻¹ hm⁻²,显著高于落叶松人工林、白桦天然次生林和山杨天然次生林的固碳

量,是落叶松人工林的 2.04 倍,是白桦天然次生林 1.48 倍,是山杨天然次生林 1.39 倍。

落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨的固碳量分别为 3.39、4.25、3.85 kg C 5a⁻¹ hm⁻²,增幅分别为 29.74%、28.36%、34.52%。落叶松人工林固碳量为 5.62 kg C 5a⁻¹ hm⁻²,增幅 27.09%。白桦天然次生林固碳量为 7.78 kg C 5a⁻¹ hm⁻²,增幅 26.34%。山杨天然次生林固碳量为 8.25 kg C 5a⁻¹ hm⁻²,增幅 26.24%。落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨固碳量的增幅分别高于所对应树种的 2.65%、2.02%、8.28%(表 5)。

表 5 2008—2012 年林木的固碳能力

Table 5 The carbon fixation ability of the forest in 2008—2012 years

林分类型 Forest types	树种 Tree Species	密度 Density/(株/hm ²)	2012 年林分碳储量 Stand carbon storage in 2012/(t/hm ²)	2008 年林分总碳储量 Stand carbon storage in 2008/(t/hm ²)	固碳量 5 years' sequestration
混交林 Mixed forest	落叶松	254	14.77	11.38	3.39
	白桦	180	19.24	14.99	4.25
	山杨	221	15.02	11.17	3.85
	总计	655	49.03	37.54	11.49
人工林 Plantation	落叶松	649	26.38	20.76	5.62
天然林 Natural forest	白桦	615	37.31	29.53	7.78
	山杨	625	39.66	31.42	8.25

3 结论与讨论

落叶松-杨桦混交林较落叶松人工林、白桦天然次生林、山杨天然次生林具有一定幅度的增产效益。落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨表现均优于各自的人工林或者天然林,平均胸径分别高出 6.7%、12.8%、4.1%,平均树高分别高出 12.1%、1.4%、11.1%,与夏成财^[1]针对 16 年生落叶松白桦纯林与混交林林分生长量研究的略有区别,其混交林中树的生长优于各自纯林,平均胸径分别高出 8.0% 和 2.3%,平均树高分别高出 15.1% 和 20.5%。白桦和山杨的平均胸径百分比略显大,这样可能是由于林龄差别较大所造成的。

生物量回归模型都在 0.05 水平上成显著性,其各类函数的相关判定系数 R^2 在 0.703—0.993 之间,对树干、树根、树叶、树枝进行了残差平方和 SSE、总相对误差 RS、平均相对误差 E_1 、平均相对误差绝对值 E_2 的残差检测,并选择相关判定系数 R^2 、AIC 和 BIC 3 个指标对模型的模拟效果进行比较,其回归模型拟合结果较为理想^[18]。胸径-生长量模型判别系数 R^2 均在 0.65 以上,人工林、天然林中各树种拟合方程的判别系数 R^2 大于混交林中落叶松、白桦、山杨的判别系数,其它 4 种指标差异不大,并表出比较理想拟合模型。

在 5 年内,落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨的生物量增幅依次为 29.71%、28.35%、34.55%,全林 5 年内林分总生物量增幅 30.55%。落叶松人工林生物量增幅为 27.09%,白桦天然次生林生物量增幅为 26.33%,山杨天然次生林生物量增幅为 26.25%。落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨的固碳量增幅分别为 29.74%、28.36%、34.52%;落叶松人工林固碳量增幅 27.09%;白桦天然次生林固碳量增幅 26.34%;山杨天然次生林固碳量增幅 26.24%。落叶松-杨桦混交林中落叶松、白桦、山杨固碳量的增幅分别高于所对应树种的 2.65%、2.02%、8.28%。

对于树种混交对生长的影响的报道已有很多^[1,4-5],一些研究也证实了混交林模式具有提高生产力的能力,但是不同文章阐述的增产效应往往受到立地因子、树种生态位差异程度、林场的经营措施、林分起源等因素限制^[1,5,18]。本研究结果是以木兰林管局经营的天然林和人工林为主,研究冀北山地处于中龄林、近熟林、成熟林 3 个阶段的落叶松-杨桦混交林、落叶松人工林、白桦天然次生林、山杨天然次生林得到的。其林型较为分散,属于改造天然次生林,“引针入阔”的营林模式,所形成的混交方式主要以随机间距为主,同时间有斑块混交,样地内间有其他伴生树种,有待进一步的调查研究相互之间的影响。本研究排除了伴生树种的干扰,以主要树种为研究对象,致使结果有一定局限性的重要原因。由于试验条件限制,不能进一步研究落叶松、白

桦、山杨种间互作以协同增效作用^[14],以后可以进一步根据种间营养互作、生化互作、地上、地下生态位分异等方面进一步研究混交林种间关系^[5,18]。

参考文献 (References):

- [1] 夏成财, 刘忠玲, 王庆成, 李开隆. 16 年生落叶松白桦纯林与混交林林分生长量及生物量对比. 东北林业大学学报, 2012, 40(10): 1-3.
- [2] 陈立新, 陈祥伟, 史桂香, 武兰在. 提高落叶松人工林林地质量的研究. 东北林业大学学报, 1998, 26(3): 6-11.
- [3] 丁宝永, 徐立英, 张世英. 兴安落叶松人工林营养元素的分析. 生态学报, 1989, 9(1): 71-76.
- [4] 师德生, 冯继平, 王勇天. 天然落叶松白桦中幼龄混交林最佳经营密度的研究. 林业勘查设计, 2006, (4): 64-65.
- [5] Thomas K, Christian A, Bernd S, Reinhard M. Admixing broadleaved to coniferous tree species: a review on yield, ecological stability and economics. *Eco-Logical Stability and Economics*, 2008, 127(2): 89-101.
- [6] 姜鹏, 任佳佳, 任仙, 等. 典型针阔混交林中山杨生物量和碳储量研究. 西北林学院学报, 2014, 29, (1): 15-20.
- [7] 李建强, 菊花, 张秋良. 白桦天然林生物量模型的研究. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, 31(1): 76-82.
- [8] Gerry P Q, Michaei J K. 生物实验设计与数据分析. 蒋志刚, 李春旺, 曾岩, 译. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [9] 刘璋温, 吴国富. 选择回归模型的几个准则. 数学的实践与认识, 1983, 13(1): 61-69.
- [10] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 蔺琛, 康峰峰, 曹文强, 马志波, 李文字. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 96-100.
- [11] 接程月. 基于 FORECAST 模型不同轮伐期杉木人工林和云杉林碳储量的研究 [D]. 临安: 浙江农林大学, 2011.
- [12] 靳阿亮. 河北八英庄林场林木生物量研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [13] Gunn S J, Ganz D J, Keeton W S. Biogenic vs. geologic carbon emissions and forest biomass energy production. *GCB Bioenergy*, 2012, 4(3): 239-242.
- [14] 罗云建, 张小全, 王效科, 朱建华, 侯振宏, 张治军. 森林生物量的估算方法及其研究进展. 林业科学, 2009, 45(8): 129-134.
- [15] 方晰, 田大伦, 项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳贮量及其空间分配格局的影响. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(11): 47-53.
- [16] 李鑫, 欧阳勋志, 刘琪璟. 江西省 2001—2005 年森林植被碳储量及区域分布特征. 自然资源学报, 2011, 26(4): 655-665.
- [17] 李春明, 李利学. 基于非线性混合模型的栓皮栎树高与胸径关系研究. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 7-12.
- [18] Pretzsch H. Diversity and productivity in forests evidence from long-term experimental plots // Scherer Lorenzen, Körner C, Schulze E D. *Forest Diversity and Function: Temperate and Boreal Systems*. Berlin: Ecology Stud Springer, 2005, 176: 41-64.