

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150336

松嫩平原杨树人工林生态系统碳储量研究

孙虎¹ 李凤日² 孙美欧³ 贾炜玮²

(1 东北林业大学凉水国家级自然保护区 2 东北林业大学林学院 3 黑龙江省带岭林业科学研究所)

摘要:利用设置在松嫩平原典型地区的6块杨树人工林样地和36株人工杨树解析木数据,建立了人工杨树相容性生物量方程,实测并分析了杨树人工林各个组成部分含碳率,估算并分析了人工杨树各个器官含碳量和杨树人工林生态系统碳储量密度特征。结果表明:胸径和年龄是影响人工杨树各个器官含碳率的主要因素,本研究中人工杨树各器官含碳率介于0.4427~0.4848之间。林下各层含碳率差异显著,枯枝层介于0.4568~0.4711之间,枯叶层介于0.3683~0.4454之间,半分解层介于0.4184~0.4600之间,草本层介于0.3506~0.3729之间。14~28年生人工杨树生物量和碳储量都随着林龄增长,树干生物量和碳储量所占整体比例稳定在0.60,树冠生物量和碳储量保持在0.17。14、21和28年生杨树人工林生态系统碳储量分别为230.6449、280.9064和356.4973 t/hm²,各部分碳储量大小排序为土壤层>植被层>凋落物层,该地区林下植被主要以草本为主,乔木层碳储量占植被层碳储量的比例超过了99%。由于该地区土壤层深厚,生态系统碳储量主要以土壤层为主,并且随着林龄增大而增加,14、21和28年生杨树人工林生态系统土壤层碳储量分别为216.5626、262.3598和335.3581 t/hm²,所占生态系统比重都超过了93%。

关键词:杨树人工林;生物量;相容性生物量模型;碳储量密度

中图分类号:S718.55 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)05-0033-09

SUN Hu¹; LI Feng-ri²; SUN Mei-ou³; JIA Wei-wei². **Carbon storage of poplar plantations in Songnen Plain, northeastern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(5) 33-41 [Ch, 25 ref.]

1 Liangshui National Nature Reserve, Northeast Forestry University, Yichun, Heilongjiang, 153106, P. R. China;

2 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China;

3 Dailing Forestry Science Institute, Yichun, Heilongjiang, 153106, P. R. China.

Using data from 6 sample plots and 36 sample trees in the Songnen Plain, northeastern China, we established a compatible biomass model of poplar, measured carbon content rate of each component of the plantations, estimated carbon content in each organ of poplar, and analyzed the characteristics of carbon content density of the ecological system of poplar. The results were as follows. Diameter at breast height (DBH) and forest age were the main factors that affect carbon content in various organs of poplar. Carbon content rate of each organ ranged between 0.4427 and 0.4848. Difference in carbon content rate of each layer of understory species was significant, with that in deadwood layer between 0.4568-0.4711, 0.3683-0.4454 in litter layer, 0.4184-0.4600 in half-decomposition layer, and 0.3506-0.3729 in herb layer. Biomass and carbon storage rate of 14-28-year-old poplars grew with forest age; the proportion of biomass and carbon storage of stem kept around 0.60, while those of canopy at 0.17. Carbon storages of 14-, 21- and 28-year-old poplar ecology systems were 230.3449, 280.9064 and 356.4973 t/ha, respectively, and carbon storage of each component in this ecology system was in the order

收稿日期:2015-09-30 修回日期:2015-11-04

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572014BA07)、“十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAD37B02-3)。

第一作者:孙虎。主要研究方向:森林经理、林业碳汇。Email:hu_S20121@163.com 地址:153106 黑龙江省伊春市带岭区迎宾路158号黑龙江省凉水国家级自然保护区管理局。

责任作者:李凤日,教授,博士生导师。主要研究方向:林分生长与收获模型。Email:fengrili@hotmail.com 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路26号东北林业大学林学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

as soil layer > vegetation layer > litter layer. Since the understory vegetation layer in this region consisted mainly of herbs, the proportion of carbon storage of tree layer was more than 99%. The soil layer was very thick, so the carbon storages of the 14-, 21- and 28-year-old poplar ecological system depended mainly on soil and grew with forest age, which were 216.562 6, 262.359 8 and 335.358 1 t/ha, and the proportion was all over 93%.

Key words poplar plantation; biomass; compatible biomass mode; carbon storage density

大量研究已经证明大气中 CO₂浓度的增大正是引起全球气候变暖的主要原因^[1]。近几十年来,以 CO₂固定和释放为主要内容的全球变化研究是林学家和生态学家研究的热点之一^[2]。森林作为陆地生态系统的主体,在全球变化过程中扮演着非常重要的角色,势必在未来全球气候变化以及碳循环过程中发挥重要作用^[3]。研究森林生物量和碳储量特征可以为合理经营森林提供基础依据,在大区域尺度层面,刘国华等^[4]利用我国 1973—1993 年连续 4 次森林资源调查资料,推算了我国 20 年森林碳储量;周玉荣等^[5]广泛收集资料,从森林生态系统的角度研究了我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡;王效科等^[6]利用国家森林资源调查资料,以不同龄级森林类型为研究单元,估算了中国森林生态系统植物碳储量和碳密度;方精云等^[7]利用 1949—1998 年我国 7 次森林资源清查资料,分析了中国 50 年来森林碳库和森林平均碳密度的变化规律,对中国森林植被的碳汇功能进行了科学的评价。关于某一树种或者林分类型在特定区域碳储量的研究也屡见报端,近几年比较有代表性的有:贾炜玮等^[8]利用样地调查资料建立了樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)单木相容性生物量模型,对黑龙江省樟子松人工林生态系统碳储量进行了详细的研究。刘婷岩等^[9]在帽儿山实验林场不同密度水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)人工林设置样地,研究了林分密度和林分碳储量的关系。随着人工林面积的不断增大,人工林对全球碳循环的影响将会越来越大^[10]。

松嫩平原面积占黑龙江省总面积超过 1/3。本区域主要以农牧业为主,森林面积相对较小,并且树种较为单一。森林类型主要是以樟子松和杨树(*Populus* spp.)为主的人工林,林种以重点生态公益林为主。本区域森林主要起着防风固沙、涵养水源、保持水土等作用,但是对其生物量及碳储量的研究鲜有报道。本文以该区域杨树人工林为研究对象,从树木个体的角度研究各器官含碳率特征;讨论不同林龄时生物量和碳储量在单木以及林分水平的分布特征,为该区域森林生态系统碳储量研究提供基础依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究在大庆市杜蒙县(124°23'37"E、46°38'29"N)和齐齐哈尔市甘南县(123°30'18"E、47°57'24"N)2个重点公益林市县共设置了6块杨树人工林标准地,收集36株标准解析木数据对本区域杨树人工林生物量分布特征和碳储量密度特征进行研究。本区域地处北温带季风气候区,大陆性气候特点较为明显,平均海拔在120~300m之间,冬季寒冷且漫长,夏季高温多雨,春季干燥,风力强劲。本区年平均气温自南向北递减,年平均降水量为400~750mm,无霜期约为130d。森林植被以人工杨树和樟子松为主,地被植物以羊草(*Leymus chinensis*)、小叶樟(*Deyeuxia langsdorffii*)等为主。土壤类型主要有草甸土、风沙土和黑钙土等。

1.2 研究方法

1.2.1 生物量测定

2009年7—8月,选择树木生长情况类似,林相完整的14、21、28年生杨树人工林林分分别设置2块30m×30m标准地(共6块),样地基本情况见表1。根据样地每木检尺数据,按照等断面积标准木法获得解析木进行生物量调查,共获得解析木36棵,解析木基本因子见表2。单木生物量的测定采用抽样法:将解析木伐倒后将树干截取为1m区分段称取树干鲜质量,每个区分段截取圆盘作为含水率测定样品,在树干基部截取圆盘测定解析木年龄。然后根据树冠长度将其分为3层,依照具体情况在每层选择3~5个标准枝,分别称取枝、叶鲜质量(要求误差控制在±5%以内),其余树枝全部称质量,并且按照树冠层次分别对树叶和树枝取样,测定含水率。树根采取“全挖法”,然后分为小根(0.2~2cm)、中根(2~5cm)和大根(大于5cm)分别称质量和取样。在每个样地设置3个0.5m×0.5m的小样方(共设置18个)和3个1m×1m的小样方(共设置18个)对枯落物层(枯枝、枯叶、半分解层)和草本层生物量进行调查。每个样地呈“品”字型挖3个土壤剖面(共设置18个),进行土壤调查并且按照土壤发生层分别取样。

1.2.2 样品测定

将采集到的所有样品带回实验室。木质样品在85℃恒温烘箱中烘干至恒质量,然后研磨样品(将树干样品分为心材、边材和树皮3部分分别研磨)。为使样品充分混匀,研磨前先用斧子、菜刀等工具将样品切碎,然后使用天津泰斯特仪器厂生产的中药粉碎机对样品进行研磨,研磨之后用50目的土壤筛过筛,以保证样品混匀以及使用碳氮分析仪测定时样品完全灼烧。土壤样品在阴凉通风处风干,然后按照土壤学实验要求制备土样。将木质样品充分粉碎研磨之后,在使用碳氮分析仪测定之前还需要将

样品放入85℃烘箱中烘干24h,以保证样品为绝干状态。称取20mg左右样品用陶瓷舟送入碳氮分析仪中,灼烧90s之后拿出,每个样品重复测量3次,仪器自动记录数值。土壤样品在烘干后,用碳氮分析仪测定之前还需要加入一定量的酸液(本研究选择1mol/L盐酸)在85℃恒温箱中4h,保证充分反应,用来除去土壤中的无机碳,土壤样品需要称取105mg左右,其余操作同上。本研究使用德国产Multi C/N 2100S碳氮分析仪,对所有采集样品含碳率进行测定。

表1 标准地基本状况

Tab.1 General situation of sample plots

标准地 Sample plot	样木株数 Number of sample trees	林分年龄 Stand age/a	平均胸径 Average DBH/cm	林分密度/(株·hm ⁻²) Stand density/(trees·ha ⁻¹)	优势木高 Average height of superior tree/m	土壤类型 Soil type
甘南1 Gannan 1	6	14	6.5	2 133	9.9	
甘南2 Gannan 2	6	14	5.9	2 544	8.2	暗色草甸土 Dark meadow soil
甘南3 Gannan 3	6	21	12.4	574	13.5	
杜蒙1 Dumeng 1	6	21	11.7	1 103	11.9	
杜蒙2 Dumeng 2	6	28	12.7	959	12.2	草原风沙土 Steppe sandy soil
杜蒙3 Dumeng 3	6	28	13.2	737	12.8	

表2 解析木各主要测树因子表

Tab.2 Main measurement factors of sample trees

主要测树因子 Main measurement factors	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Average	标准差 Std. error	变动系数 CV/%
年龄 Age/a	14	28	21.25	5.81	27.33
胸径 DBH/cm	4.4	20.0	12.20	4.19	34.38
树高 Height/m	6.2	13.5	10.31	2.00	19.43
冠长 Crown length/m	3.70	9.00	5.97	1.51	25.34
冠幅 Crown width /m	0.81	2.31	1.59	0.40	25.32

1.2.3 生物量模型的建立

生物量模型的拟合过程基本上可以概括为以下几步:确定候选模型、估计模型参数及拟合统计量、若干备选模型的和模型的统计诊断等。相容性生物量模型解决了林木总生物量和各分量生物量不相等的问题,因此本研究参考李凤日等^[12]、董利虎等^[13]的研究结果,以常用的CAR(Constant allometric ratio)模型出发,选择胸径为唯一变量,以方程 $w = aD^b$ (式中: w 为生物量, a 、 b 为相应的模型参数, D 为胸径)为基础。从相容性的基本定义出发,以各分量独立的生物量模型为基础,通过划定的各分量之间的基本数学关系,建立总量与各分量相容的生物量模型,对总量和各分量生物量进行估计。将解析木生物量数据按照3:1的比例随机分为建模

数据和检验数据两部分,见表3。采用平均偏差(ME)、平均绝对偏差(MAE)、平均相对偏差(MRE)、平均相对偏差绝对值(MRAE)和预估精度 P 对模型进行检验和评价^[14]。

1.2.4 生物量及碳储量密度计算

利用标准地每木检尺数据,结合所建立模型可以求出各样地乔木层各器官生物量,按照样地面积可求出林木器官单位面积生物量密度,乘以相应的含碳率实测值即得到碳储量密度;枯枝落叶层和草本层生物量采用样方收获法获得,根据样方面积和相应含碳率得到碳储量密度。参考金峰等^[15]研究,本研究土壤层有机碳密度按照以下式计算:

$$T_0 = \sum_j^m \frac{(1 - \delta_j) \rho_j c_j d_j}{100}$$

表3 杨树人工林解析木生物量统计量

Tab.3 Statistics of biomass of sample poplar

树种 Tree species	变量 Variables	样本数 Number	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Average	标准差 Std. error	变异系数 CV/%
人工杨树(建模样本)Poplar plantation (for model development)	树干生物量 WS/kg	25	2.53	80.45	28.34	19.98	70.47
	树枝生物量 WB/kg	25	0.29	17.66	2.03	2.92	144.07
	树叶生物量 WL/kg	25	0.59	22.09	6.58	5.96	90.57
	树根生物量 WR/kg	25	1.71	24.06	10.56	6.77	64.06
人工杨树(检验样本)Poplar plantation (for model evaluation)	树干生物量 WS/kg	10	5.22	39.07	23.45	13.57	57.87
	树枝生物量 WB/kg	10	1.23	8.84	4.12	2.61	63.3
	树叶生物量 WL/kg	10	0.65	2.76	1.39	0.74	53.02
	树根生物量 WR/kg	10	3.30	15.63	9.33	5.19	55.61

Note: WS, wood stem; WB, wood branch; WL, wood leaves; WR, wood roots. The same below.

式中: T_0 为此剖面深度内土壤有机碳密度, k_g/m^3 ; c_j 为第 j 层土壤有机碳含量, g/kg ; ρ_j 为第 j 层土壤密度, g/cm^3 ; δ_j 为第 j 层土壤石砾含量, %; d_j 为该类型土壤层的厚度, cm 。

采用 SPSS17.0 和 Excel2007 对数据进行统计分析;采用 SAS9.3 软件 GLM 模块对模型参数进行求解。

2 结果与分析

2.1 生物量模型

参考已报道的方法,拟合出了该地区人工杨树相容性生物量模型。模型拟合结果和检验结果见表 4、5、6。从模型检验结果发现:人工杨树各个器官模

型拟合确定系数均超过 0.80;模型整体预估精度超过 95%。说明模型整体模拟效果较好,满足林业生产应用的需要,可以用来对人工杨树各器官生物量进行估算。

2.2 乔木层含碳率

2.2.1 树木胸径对人工杨树各器官含碳率的影响

将人工杨树解析木按照胸径大小分为优势木、平均木和被压木,分析在林木年龄相同的情况下胸径对林木各个器官含碳率的影响。在林木年龄相同的情况下,不同径级人工杨树各个器官含碳率差异基本不明显,14年生人工杨树树叶部分含碳率受林木胸径影响显著,随胸径减小有明显下降的趋势,其余各器官含碳率也基本呈现出优

表4 人工杨树生物量模型

Tab.4 Biomass model of poplar

各器官 Organs	生物量模型 Biomass model
树干 WS	$W_s = 0.22295818D^{2.08253743} / [1 + 0.09735152D^{0.33088681} + 0.62716996D^{(-0.92631271)} + 0.54220999D^{(-0.13151243)}]$
树枝 WB	$W_b = 0.22295818 \times 0.09735152D^{(0.33088681 + 2.08253743)} / [1 + 0.09735152D^{0.33088681} + 0.62716996D^{(-0.92631271)} + 0.54220999D^{(-0.13151243)}]$
树叶 WL	$W_l = 0.22295818 \times 0.62716996D^{(-0.92631271 + 2.08253743)} / [1 + 0.09735152D^{0.33088681} + 0.62716996D^{(-0.92631271)} + 0.54220999D^{(-0.13151243)}]$
树根 WR	$W_r = 0.22295818 \times 0.54220999D^{(-0.13151243 + 2.08253743)} / [1 + 0.09735152D^{0.33088681} + 0.62716996D^{(-0.92631271)} + 0.54220999D^{(-0.13151243)}]$

表5 人工杨树生物量模型拟合统计量

Tab.5 Fitting results of poplar biomass model

确定系数 Coefficient of determination				残差平方和 Residual sum of squares			
树干 WB	树枝 WL	树叶 WR	树根 WS	树干 WB	树皮 WL	树叶 WR	树根 WS
0.8582	0.8059	0.9872	0.9915	263.7244	15.8415	50.7495	236.4679

表6 人工杨树相容性生物量模型检验结果

Tab.6 Testing results of poplar compatible model

ME	MAE	MRE/%	MRAE/%	精度 Precision/%
-0.5757	1.5400	-2.7421	5.5276	95.1379

势木 > 平均木 > 被压木的情况。21 年生人工杨树各器官含碳率受胸径影响不明显, 含碳率没有显著变化。28 年生人工杨树树枝含碳率受胸径影响

较显著, 随胸径减小而下降, 被压木树干和树叶部分含碳率最高, 但是树根部分含碳率却是在平均木条件下最高, 如表 7。

表 7 不同径级人工杨树各器官含碳率

Tab. 7 Carbon content rate of each organ of poplar at different diameter classes

%

林龄 Age/a	径级 Diameter class	地上 Aboveground			地下(树根) Underground (Root)		
		树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf	0.2 ~ 2 cm	2 ~ 5 cm	> 5 cm
14	优势木 Dominant tree	0.485 9A ± 0.005 8	0.489 8A ± 0.003 4	0.494 0A ± 0.015 1	0.419 3A ± 0.015 1	0.460 1A ± 0.008 3	0.457 3A ± 0.026 3
	平均木 Average tree	0.480 4A ± 0.001 5	0.491 7A ± 0.009 1	0.478 0AB ± 0.004 9	0.418 6A ± 0.014 8	0.433 9A ± 0.007 8	0.468 4A ± 0.011 5
	被压木 Retarded tree	0.480 3A ± 0.002 2	0.482 3A ± 0.010 4	0.465 4B ± 0.006 0	0.421 7A ± 0.015 9	0.438 9A ± 0.020 5	0.469 5A ± 0.007 7
21	优势木 Dominant tree	0.482 3A ± 0.006 4	0.500 1A ± 0.011 5	0.495 5A ± 0.010 1	0.445 8A ± 0.034 1	0.469 9A ± 0.014 2	0.467 7A ± 0.022 9
	平均木 Average tree	0.490 4A ± 0.009 3	0.477 1A ± 0.017 7	0.488 6A ± 0.019 9	0.436 1A ± 0.093 7	0.489 2A ± 0.013 1	0.490 9A ± 0.002 2
	被压木 Retarded tree	0.495 8A ± 0.007 5	0.496 2A ± 0.006 0	0.493 4A ± 0.013 5	0.474 4A ± 0.016 3	0.474 5A ± 0.018 8	0.479 3A ± 0.012 0
28	优势木 Dominant tree	0.467 1A ± 0.016 6	0.487 4A ± 0.016 7	0.480 7A ± 0.021 5	0.440 2A ± 0.011 8	0.445 7A ± 0.012 1	0.449 9A ± 0.011 3
	平均木 Average tree	0.452 2A ± 0.028 2	0.489 4A ± 0.022 2	0.470 6A ± 0.021 2	0.470 4A ± 0.031 8	0.469 9A ± 0.031 4	0.480 2A ± 0.020 2
	被压木 Retarded tree	0.471 2A ± 0.024 8	0.450 3B ± 0.013 1	0.496 2A ± 0.027 4	0.457 0A ± 0.031 7	0.465 4A ± 0.027 1	0.468 8A ± 0.027 9

在林龄相同的情况下, 相同径级人工杨树各个器官之间含碳率差异都较为显著, 尤其是 14 和 21 年生人工杨树地下部分不同粗细的树根之间含碳率差异非常显著, 但是 28 年生人工杨树树根之间含碳率没有明显差异。14 年生人工杨树平均木和被压木地上部分各器官含碳率差异明显, 并且树枝 > 树

干 > 树叶, 优势木条件下则差异不显著。21 年生人工杨树地上部分各器官含碳率在不同的胸径条件下都没有出现显著差异。28 年生人工杨树在被压木条件下地上部分各器官含碳率差异显著, 树叶 > 树干 > 树枝, 优势木和平均木条件下各器官含碳率没有显著差异, 如表 8。

表 8 相同径级人工杨树各器官含碳率比较

Tab. 8 Carbon content rate of each organ of poplar at the same diameter class

%

林龄 Age/a	部位 Parts	器官 Organs	优势木 Dominant tree	平均木 Average tree	被压木 Retarded tree
14	地上部分 Aboveground	树干 Stem	0.485 9A ± 0.005 9	0.480 5AB ± 0.001 5	0.480 4A ± 0.002 2
		树枝 Branch	0.489 8A ± 0.003 4	0.491 7A ± 0.009 2	0.482 3A ± 0.010 4
		树叶 Leaf	0.494 0A ± 0.015 1	0.478 0B ± 0.004 9	0.465 5B ± 0.006 1
	地下(树根) Underground (Root)	0.2 ~ 2 cm	0.419 3B ± 0.015 2	0.418 6B ± 0.014 8	0.421 7B ± 0.015 9
		2 ~ 5 cm	0.460 1A ± 0.008 4	0.433 9B ± 0.007 8	0.438 9AB ± 0.020 6
		> 5 cm	0.457 4A ± 0.026 4	0.468 5A ± 0.011 5	0.469 6A ± 0.007 8
21	地上部分 Aboveground	树干 Stem	0.482 3A ± 0.006 5	0.490 4A ± 0.009 3	0.495 8A ± 0.007 5
		树枝 Branch	0.500 1A ± 0.011 5	0.477 1A ± 0.017 7	0.496 2A ± 0.006 0
		树叶 Leaf	0.495 5A ± 0.010 2	0.488 6A ± 0.019 9	0.493 4A ± 0.013 6
	地下(树根) Underground (Root)	0.2 ~ 2 cm	0.419 3B ± 0.015 2	0.418 6B ± 0.014 8	0.421 7B ± 0.015 9
		2 ~ 5 cm	0.460 1A ± 0.008 3	0.433 9B ± 0.007 9	0.438 9AB ± 0.020 5
		> 5 cm	0.457 3A ± 0.026 4	0.468 5A ± 0.011 5	0.469 5A ± 0.007 7
28	地下(树根) Underground (Root)	树干 Stem	0.467 2A ± 0.016 6	0.452 3A ± 0.028 2	0.471 3AB ± 0.024 8
		树枝 Branch	0.487 5A ± 0.016 7	0.489 4A ± 0.022 2	0.450 3B ± 0.013 1
		树叶 Leaf	0.480 7A ± 0.021 5	0.470 6A ± 0.021 3	0.496 2A ± 0.027 4
	地上部分 Aboveground	0.2 ~ 2 cm	0.440 3A ± 0.011 8	0.470 4A ± 0.031 8	0.457 0A ± 0.031 7
		2 ~ 5 cm	0.445 7A ± 0.012 1	0.469 9A ± 0.031 4	0.465 4A ± 0.027 1
		> 5 cm	0.449 9A ± 0.011 3	0.480 2A ± 0.020 2	0.468 8A ± 0.027 9

2.2.2 树木年龄对人工杨树各器官含碳率的影响

随着林龄增大,人工杨树各个器官含碳率大多没有显著变化,只有树干、树枝和2~5 cm树根部分出现了显著差异,其余部分变化都不明显。基本上各个器官含碳率都随着林龄先增大后减小,14年生<28年生<21年生,如表9。

在林龄相同的情况下,只有在14年生人工杨树各个器官之间含碳率出现了显著差异,21和28年生人工杨树各个器官含碳率都没有显著差异,并且基本都出现了树叶>树枝>树干>树根的情况,如

表10。

2.3 杨树人工林林下各层含碳率

本研究中将林下层定义为凋落物层和草本层,将凋落物层又分为分解层和半分解层。随着林龄的增大,枯枝层含碳率没有显著变化,但是枯叶层和半分解层含碳率都有显著差异,都随着林龄的增大含碳率降低。草本层则没有显著变化,并且草本层含碳率都要明显低于凋落物层,并且枯枝层含碳率要高于枯叶层和半分解层,见表11。

表9 不同林龄人工杨树各器官含碳率

Tab.9 Carbon content rate of each organ of poplar at different stand ages

%

林龄 Age/a	地上部分 Aboveground			地下部分(根) Underground (Root)		
	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf	0.2~2 cm	2~5 cm	>5 cm
14	0.482 2A ± 0.004 3	0.487 9AB ± 0.008 5	0.479 1A ± 0.015 1	0.419 9A ± 0.013 9	0.444 3B ± 0.017 0	0.465 1A ± 0.016 6
21	0.489 5A ± 0.009 1	0.491 1A ± 0.015 5	0.492 5A ± 0.014 0	0.452 1A ± 0.055 4	0.477 9A ± 0.016 5	0.479 3A ± 0.016 8
28	0.463 5B ± 0.023 1	0.473 1B ± 0.024 5	0.482 5A ± 0.024 0	0.455 9A ± 0.027 5	0.460 3AB ± 0.025 1	0.466 3A ± 0.023 0

表10 相同林龄人工杨树各器官含碳率

Tab.10 Carbon content rate of each organ of poplar at the same stand age

%

部位 Parts	器官 Organs	林龄 Age/a		
		14	21	28
地上部分 Aboveground	树干 Stem	0.482 2A ± 0.004 3	0.489 5A ± 0.009 2	0.463 5A ± 0.023 1
	树枝 Branch	0.487 9A ± 0.008 6	0.491 1A ± 0.015 6	0.473 1A ± 0.024 5
	树叶 Leaf	0.479 1A ± 0.015 1	0.492 5A ± 0.014 0	0.482 5A ± 0.024 0
地下部分(根) Underground (Root)	0.2~2 cm	0.419 9C ± 0.013 9	0.452 1A ± 0.055 4	0.455 9A ± 0.027 5
	2~5 cm	0.444 3B ± 0.017 1	0.477 9A ± 0.016 5	0.460 3A ± 0.025 1
	>5 cm	0.465 1A ± 0.016 6	0.479 3A ± 0.016 8	0.466 3A ± 0.023 0

表11 杨树人工林林下层各部分含碳率

Tab.11 Carbon content rate of each understory part in poplar plantation

%

林龄 Age/a	分解层 Decomposition layer		半分解层	草本层
	枯枝 Deadwood	枯叶 Dead leaves	Semi-decomposition layer	Herbaceous layer
14	0.470 1A ± 0.025 8	0.445 4A ± 0.292 5	0.460 0A ± 0.023 7	0.372 9A ± 0.013 7
21	0.456 8A ± 0.017 1	0.368 3B ± 0.070 0	0.418 4B ± 0.023 8	0.350 6A ± 0.066 1
28	0.471 1A ± 0.021 3	0.390 7B ± 0.021 1	0.425 3B ± 0.024 4	0.364 2A ± 0.292 3

2.4 杨树人工林土壤层含碳率

不同林龄的杨树人工林土壤层含碳率都是A层要明显大于B层,并且随着林龄增大,无论A层或者B层土壤含碳率都有显著差异,都和林龄增大成正比,如表12。

2.5 乔木层生物量和碳储量特征

人工杨树整体生物量和碳储量都随着林龄增大而增大,但是各个器官所占生物量和碳储量的比重随着树木生长发生了变化。经计算得出,树干生物

表12 杨树人工林土壤含碳率

Tab.12 Soil carbon content rate of different soil types in poplar plantation

%

林龄 Age/a	土壤层 Soil layer	
	A层 Layer A	B层 Layer B
14	4.897 0B ± 1.322 0	2.844 1B ± 1.188 0
21	9.139 0A ± 5.185 0	3.000 1B ± 2.049 1
28	11.072 0A ± 2.891	4.718 2A ± 0.877 1

量占整体生物量的比例比较稳定,3 个林龄阶段都稳定在 0.60 左右,树冠部分(包括树枝和树叶)生物量所占整体生物量比例也稳定在 0.17 左右。但是树根生物量占整体生物量的比重随着林龄的增长逐渐下降,0.25(14 a) > 0.23(21 a) > 0.22(28 a),也导致了地上器官和地下器官生物量比率随着林龄的增长逐步提高,3.07(14 a) > 3.33(21 a) > 3.34(28 a),如表 13。树干碳储量占人工杨树碳储量总

量的比重没有随着林分年龄增大产生明显变化,也是基本稳定在 0.60 左右,树冠部分碳储量比重和生物量相同,也是稳定在 0.17 左右。树根部分碳储量比重随着林龄增大而减小,变化情况也和生物量相同,0.23(14 a) > 0.22(21 a) > 0.22(28 a),只有地上器官和地下器官碳储量比率随着林龄增大出现了先增大后减小的情况,3.54(21 a) > 3.38(28 a) > 3.30(14 a),如表 14。

表 13 人工杨树各器官生物量

Tab. 13 Biomass of each organ of poplar

t·hm⁻²

林龄 Age/a	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root
14	13.701 2 ± 0.471 1	2.532 4 ± 0.181 1	1.490 1 ± 0.870 2	5.773 1 ± 0.110 1
21	19.550 2 ± 7.242 1	4.460 1 ± 1.632 2	1.171 1 ± 0.452 4	7.563 5 ± 2.823 6
28	23.420 2 ± 2.973 5	5.414 5 ± 0.655 1	0.333 6 ± 0.182 6	9.012 5 ± 1.135 6

表 14 人工杨树各器官碳储量

Tab. 14 Carbon storage of each organ of poplar

t·hm⁻²

林龄 Age/a	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root
14	6.610 1 ± 0.236 1	1.235 2 ± 0.100 1	0.716 4 ± 0.044 3	2.593 2 ± 0.032 3
21	9.564 1 ± 3.506 2	2.196 0 ± 0.821 4	0.578 3 ± 0.230 6	3.479 1 ± 1.347 8
28	10.879 2 ± 1.689 2	2.570 9 ± 0.462 6	0.645 6 ± 0.110 6	4.168 6 ± 0.735 8

2.6 杨树人工林生态系统碳储量特征

14、21 和 28 年生杨树人工林生态系统碳储量分别为 230.644 9、280.906 4 和 356.497 3 t/hm²,主要是由植被层(包括乔木层和草本层)、凋落物层(枯枝、枯叶和半分解层)和土壤层组成。按照碳储量大小可以排列为土壤层 > 植被层 > 凋落物层。在 14、21 和 28 年生杨树人工林生态系统中,植被层和土壤层碳储量都随林龄增长而增加,只有凋落物层碳储量随着林龄增长而下降。植被层碳储量分别为 11.289 3、15.951 5 和 18.414 1 t/hm²,分别占整个生态系统的 4.89%、5.67% 和 5.16%;可见植被层碳储量随着林龄增长有增加的趋势,在 21 年生时植被层碳储量所占比例最大,同时由于该地区杨树人工

林林下植被以草本为主,所以 3 种林龄下乔木层碳储量占植被层碳储量的比重都超过了 99%,因此该地区杨树人工林植被层碳储量主要取决于乔木层碳储量。凋落物层碳储量随着林龄增长先下降后升高,分别为 2.793 0、2.595 2 和 2.725 1 t/hm²,随着林龄增长凋落物层碳储量占生态系统碳储量的比例逐年下降,分别为 1.21%、0.92% 和 0.76%。该地区土壤层深厚,平均土壤厚度都大于 80 cm,有些剖面甚至超过了 100 cm,因此该地区生态系统碳储量主要以土壤层为主,并且随着林龄增大而增加,分别为 216.562 6、262.359 8 和 335.358 1 t/hm²,所占生态系统比重都超过了 93%,如表 15。

表 15 杨树人工林生态系统碳储量

Tab. 15 Carbon storage of poplar plantation ecosystem

t·hm⁻²

林龄 Age/a	植被层 Vegetation layer		凋落物层 Decomposition layer			土壤层 Soil layer	总量 Total
	乔木层 Tree layer	草本层 Herb-layer	枯枝 Deadwood	枯叶 Dead leaves	半分解层 Semi-decomposition layer		
	14	11.155 1	0.134 2	1.238 8	0.604 3	0.949 9	216.562 6
21	15.817 6	0.133 9	1.225 7	0.490 5	0.879 0	262.359 8	280.906 4
28	18.264 2	0.149 9	1.284 6	0.525 6	0.914 8	335.358 1	356.497 3

3 结论与讨论

3.1 杨树人工林生物量模型的建立

利用得到的 35 株人工杨树解析木,从相对生长

方程 $w = aD^b$ 出发,构造了总量与树干、树枝、树叶和树根 4 个分量相容的一元立木生物量模型,解决了总生物量与地上、地下生物量以及各分量之间不相容的问题。模型只用了胸径一个变量,拟合效果

非常理想,模型确定系数都超过了0.80,精度超过了95%,可以用来估算人工杨树各器官生物量。

3.2 杨树人工林含碳率

大多数研究在计算生态系统碳储量时都采用0.45或者0.50作为碳转化系数^[16-17],对生态系统各组成部分尤其乔木各器官(树枝、树叶、树干和树根)含碳率鲜有细致研究,但是胡海清等^[18]研究大兴安岭5种典型林型森林生物碳储量时对含碳率进行了实测。本研究通过采集杨树人工林生态系统各部分样品后进行实测,分析了杨树人工林生态系统各部分含碳率,并且研究了树木胸径和年龄对各器官含碳率的影响。通过比较和分析,本研究中人工杨树各器官含碳率介于0.4427~0.4848之间,符合马钦彦等^[19]研究华北地区主要森林类型建群种的含碳率范围。但是人工杨树器官含碳率受胸径和年龄的影响程度不一样。在年龄相同的情况下,树木胸径对各器官含碳率的影响较为显著,大多数器官含碳率都随着胸径增大而减小,在胸径相同的情况下,各器官含碳率也呈现出显著差异,14年生人工杨树各器官大小为树枝>树干>树叶>树根。21年生人工杨树各器官含碳率受胸径影响不明显。28年生人工杨树树枝含碳率受胸径影响较显著,随胸径减小而下降,被压木树干和树叶部分含碳率最高,但是树根部分含碳率却是在平均木条件下最高。孙虎等^[20]研究红松(*Pinus koraiensis*)人工林含碳率得到了类似的结果。

杨树人工林林下层分为分解层、半分解层和草本层。3种林分年龄条件下,枯枝层和草本层含碳率差异不明显,枯枝层介于0.4568~0.4711之间,草本层介于0.3506~0.3729;枯叶层和半分解层含碳率受林龄的影响显著,都随着林分年龄增大而减小。相对来说草本层含碳率要低于分解层和半分解层,这和明安刚等^[21]研究广西铁力木(*Mesua ferrea*)人工林林下植被含碳率的特征一致。

杨树人工林土壤层含碳率无论是A层还是B层都随着土壤深度和林龄增大而增大,这和张涛等^[22]研究墨西哥柏(*Cupressu lusitanica*)人工林土壤层含碳率得到的结果类似,这可能和林分生长过程中林分凋落物积累分解有关。

3.3 杨树人工林生物量和碳储量分布特征

有研究表明,林龄是影响森林生态系统碳素积累的主要因子之一^[23]。本研究同样也发现人工杨树生物量和碳储量都随着林龄增大而增大,这和贾炜玮等人^[8]研究27~44年生樟子松林碳储量密度得到的结果相似。3种林龄条件下树干和树冠(包括树枝和树叶)生物量和碳储量占整体生物量和碳

储量的比例都稳定在0.60和0.17左右;树根生物量和碳储量占整体生物量的比重随着林分年龄的增长逐渐下降,分别为0.25(14 a)>0.23(21 a)>0.22(28 a)和0.23(14 a)>0.22(21 a)=0.22(28 a);人工杨树各器官碳储量大小依次为树干>树根>树枝>树叶,和轩志龙等^[24]研究长白落叶松(*Larix olgensis*)人工林生物量得到的结果一致。

14~28年生杨树人工林生态系统碳储量分别为230.6449、280.9064和356.4973 t/hm²,主要是由植被层(包括乔木层和草本层)、凋落物层(枯枝、枯叶和半分解层)和土壤层组成,碳储量大小可以排列为土壤层>植被层>凋落物层。植被层和土壤层碳储量都随着林龄增大而增大,只有凋落物层碳储量相反,和马炜等^[25]研究不同林龄长白落叶松人工林碳储量得到的结果相似。14~28年生杨树人工林植被层碳储量分别为11.2893、15.9514和18.4141 t/hm²,分别占整个生态系统的4.89%、5.67%和5.16%,土壤层碳储量随着林龄增大而增加,分别216.5626、262.3598和335.3581 t/hm²,所占生态系统比重都超过了93%。

参 考 文 献

- [1] BROWN S, LUGO A E. Biomass of tropical forests; a new estimate based on forest volumes [J]. Science New Series, 1984, 223 (4642): 1290-1293.
- [2] SAXE H, CANNELL M G R. Tree and forest functioning in response to global warming [J]. New Physiologist, 2001, 149: 369-400.
- [3] 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.
- [4] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
LIU G H, FU B J, FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 733-401.
- [5] 周玉荣,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
ZHOU Y R, ZHAO S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24 (5): 518-522.
- [6] 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.
WANG X K, FENG Z W, OUYANG Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 13-16.
- [7] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
FANG J Y, CHEN A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43

- (9):967-973.
- [8] 贾炜玮,李凤日,董利虎,等. 基于相容性生物量模型的樟子松林碳密度与碳储量研究[J]. 北京林业大学学报,2012,34(1):6-13.
JIA W W, LI F R, DONG L H, et al. Carbon density and storage for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation based on compatible biomass models [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(1):6-13.
- [9] 刘婷岩,张彦东,彭红梅,等. 林分密度对水曲柳人工幼龄林植被碳储量的影响[J]. 东北林业大学学报,2012,40(6):1-4.
LIU T Y, ZHANG Y D, PENG H M, et al. Carbon storage in vegetation in *Fraxinus mandshurica* young plantations of different densities[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012,40(6):1-4.
- [10] 姜佳梅,贾炜玮,刘强. 黑龙江省市县林区落叶松人工林碳储量成熟的研究[J]. 植物研究,2015,35(4):597-603.
JIANG J M, JIA W W, LIU Q. Carbon storage maturity of larch plantation in Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Botanical Research, 2015,35(4):597-603.
- [11] 方显瑞. 杨树人工林生态系统碳交换及其环境响应[D]. 北京:北京林业大学,2011:9-12.
FANG X R. Carbon exchange and its response to environmental factors in poplar plantation ecosystem [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011:9-12.
- [12] LI F R, LIU F X, JIA W W. The development of compatible tree biomass models for main species in North-Eastern China [J]. Advanced Materials Research,2011,183-185:250-254.
- [13] 董利虎,李凤日,贾炜玮,等. 含度量误差的黑龙江省主要树种生物量相容性模型[J]. 应用生态学报,2011,22(10):2653-2661.
DONG L H, LI F R, JIA W W, et al. Compatible biomass models for main tree species with measurement error in Heilongjiang Province of northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1):2653-2661.
- [14] 唐守正,张会儒,胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究[J]. 林业科学,2000,36(专刊1):19-26.
TANG S Z, ZHANG H R, XU H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(Spec. 1):19-26.
- [15] 金峰,杨浩,蔡祖聪. 土壤有机碳密度及储量的统计研究[J]. 土壤学报,2001,38(4):522-527.
JIN F, YANG H, CAI Z C. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001,38(4):522-527.
- [16] 王琰,王孟本,朱世忠,等. 山西吕梁山南端森林乔木层碳密度[J]. 生态学报,2015,34(2):333-340.
WANG Y, WANG M B, ZHU S Z, et al. Carbon densities of major tree species in forests in southern Luliang Mountains of Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(2):333-340.
- [17] 肖湘,王西峰,范文义,等. 黑龙江省区小兴安岭森林生态系统碳密度遥感估[J]. 东北林业大学学报,2015,43(4):127-130.
XIAO X, WANG X F, FAN W Y, et al. Forest ecosystem carbon density in Xiaoxing'an mountain of Heilongjiang Province based on the remote sensing[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015,43(4):127-130.
- [18] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 大兴安岭5种典型林型森林生物量碳储量研究[J]. 生态学报,2015,35(17):1-21.
HU H Q, LUO B Z, WEI S J, et al. Estimating biological carbon storage of five typical forest types in the Daxing'anling mountain Heilongjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17):1-21.
- [19] 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):96-101.
MA Q Y, CHEN X L, WANG J, et al. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6):96-101.
- [20] 孙虎,李凤日,贾炜玮,等. 人工红松中龄林含碳率研究[J]. 森林工程,2013,29(5):19-23.
SUN H, LI F R, JIA W W, et al. The study on carbon content of planted *Pinus koraiensis* middle-aged forest [J]. Forest Engineering, 2013,29(5):19-23.
- [21] 明安刚,郑路,麻静,等. 铁力木人工林生物量与碳储量及其分配特征[J]. 北京林业大学学报,2015,37(2):32-40.
MING A G, ZHEN L, MA J, et al. Biomass and carbon stock and allocation characteristic in *Mesua ferrea* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(2):32-40.
- [22] 张涛,万福绪,谈正鑫. 盱眙县墨西哥柏人工林含碳率与碳储量研究[J]. 水土保持研究,2015,22(4):228-231.
ZHANG T, WAN F X, TAN Z X. Carbon content and storage of mexican cypress plantation forest in the Xu Yi County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(4):228-231.
- [23] PREGITZER K S, EUSKIRCHEN E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age [J]. Global Change Biology,2004,10(12):2052-2077.
- [24] 轩志龙,张启昌,葛丽丽,等. 长白落叶松人工林生物量的结构与分布[J]. 林业资源管理,2013(1):53-57.
XUAN Z L, ZHANG Q C, GE L L, et al. Biomass structure and distribution of Korean Larch Plantations [J]. Forestry Resources Management, 2013(1):53-57.
- [25] 马炜,孙玉军,郭孝玉,等. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量[J]. 生态学报,2010,30(17):4659-4667.
MA W, SUN Y J, GUO X Y, et al. Carbon storage of *Larix olgensis* plantation at different stand ages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(17):4659-4667.

(责任编辑 赵 勃
责任编委 刘琪璟)