

新疆疣枝桦与欧洲山杨生物量分配与异速生长模型分析

张绘芳,地力夏提·包尔汉,朱雅丽,高亚琪,丁程锋

(新疆林业科学院 现代林业研究所,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:**为了解新疆山区森林的主要阔叶树种疣枝桦与欧洲山杨各组织器官生物量分配的规律及准确预估其生物量,研究基于整株收获实测数据采用统计回归的方法分析了 2 树种生物量分配格局和估测模型。结果表明:整体上 2 树种地上生物量比例分别为 76.52%、75.42%,平均根冠比分别为 0.307 和 0.341,在不同林龄不同径阶各器官生物量分配疣枝桦和欧洲山杨均表现为树干比例最高,树叶最低,在幼龄林和胸径 0~20 cm 树根大于树枝,但在中龄林和胸径 20 cm 以上疣枝桦表现为两者接近而山杨表现为树枝大于树根;运用最小二乘法法和根茎比方法建立了 2 树种地上和地下各器官生物量估测的单因子胸径模型和胸径、树高双因子结合模型,结果显示疣枝桦地上部分和树干生物量预估精度显著提高,尤其树干生物量胸径树高的双因子模型比胸径单因子模型预估精度提高了 11.3%,但树冠、树枝和树叶生物量各评价指标改进效果不大,而欧洲山杨树干、树冠和树枝生物量评价指标改进显著,精度提高 2%~4%,树叶生物量估测反而降低,地上总生物量估测精度几乎没变,2 树种地下生物量模型估测精度分别是 81.35%和 83.87%。2 树种不同器官生物量分配均表现为树干>树根>树枝>树叶,随着林龄和径阶的变化各器官生物量比例的变化趋势一致;优选出 2 树种各器官最优生物量模型,预估精度均在 80%以上,可以满足日常生产需求。

**关键词:**生物量分配格局;异速生长模型;疣枝桦;欧洲山杨;新疆

**中图分类号:**S718.45      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2017)05-0033-06

Biomass Allocation Patterns and Allometric Models of *Betula pendula* and *Populus tremula* in Xinjiang

ZHANG Hui-fang, Dilixiati BAOERHAN, ZHU Ya-li, GAO Ya-qi, DING Cheng-feng

(Modern Forestry Research Institute of Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** To understand the rules of biomass distribution proportions in different parts of *Betula pendula* and *Populus tremula*, the two main broad-leaved trees occurring in mountainous areas of Xinjiang, and to accurately estimate their biomass, whole trees were cut off to measure relative data, which were then subject to statistical regression analysis to obtain biomass distribution pattern and estimation model. The results showed aboveground biomass proportions of *B. pendula* and *P. tremula* were 76.52% and 76.52%, respectively, the average root-shoot ratios were 0.307 and 0.341, respectively. The biomass proportions in different parts of the two species with different ages and diameter levels were the highest for tree trunk, and the lowest for tree leaf. The biomass proportions of roots were higher than those of tree branches in young forests and those with diameter at breast height (DBH) of 0—20 cm. However, in middle-aged forests and those with DBH of above 20 cm, the biomass proportions of roots were similar with branch for *B. pendula* and the proportions of the branch were higher than roots for *P. tremula*. Single factor (DBH) model and two-factor (DBH and H) models that were established by the least square method and the root

收稿日期:2016-12-26    修回日期:2017-01-26

基金项目:新疆林业厅新疆林业数表构建项目(新林计字【2014】835号)。

作者简介:张绘芳,女,副研究员,硕士,研究方向:森林资源监测和遥感技术应用。E-mail:396930128@qq.com

ratio method for the estimation of above-ground biomass and underground biomass indicated that the prediction precisions of the *Betula* aboveground biomass and trunk biomass were improved significantly, especially the precision of two-factor model was 11.3% higher than single-factor model. However for the estimation of other biomass such as crown, branch, and leaf, no differences were found between the two models for *B. pendula*. For *P. tremula*, the estimation precisions for trunk, crown, and branch were significantly improved, about 2% to 4% improvement. The precision for leaf biomass estimation decreased, the total biomass estimation accuracy was almost unchanged, the estimation precisions of the models for the underground biomass of two species of were 81.35% and 83.87%, respectively. It was concluded that the proportions of the biomass of different tree parts for two species were in the order of trunks > roots > branches > leaves. Along with the changes of forest age and diameter, the changes of biomass proportions of different tree parts were consistent. The optimal models established presented high estimation precision of over 80%, which could meet the daily needs of production.

**Key words:** biomass allocation pattern; allometric model; *Betula pendula*; *Populus tremula*; Xinjiang

森林生物量和碳储量是衡量森林在全球碳循环中贡献的重要计量指标<sup>[1-3]</sup>,近年来国内外众多学者对森林的生物量和碳储量进行了研究,包括从植被角度分乔木层、灌木层、草本层生物量分配,从单株树木角度在不同密度、年龄、立地条件、竞争强度、恢复模式等方面林木生物量分配和生长模型分析<sup>[2-13]</sup>。桦木树种的生物量研究主要是 E. J. Joke-la<sup>[8]</sup>,研究了北美桦树成熟桦树不同组件生物量和养分方程;Mark D. C. Schmitt<sup>[9]</sup>采用胸径(胸径)树木或胸径和高度为自变量对纸皮桦地上生物量构建了估算公式;R Yang<sup>[10]</sup>使用幂函数模型喀斯特森林不同的环境白桦树苗的地上茎,枝,叶的生物量进行了研究;张同文<sup>[11]</sup>利用开都河流域中段采集的天山桦树芯样本建立了这一采样点的树轮宽度年表并分析了树木生长对气候响应;王宁<sup>[12]</sup>等从林分密度、径阶、年龄和坡位等角度研究了山杨和油松人工林生物量分配格局规律;刘建军<sup>[13]</sup>等研究火地塘天然油松锐齿栎林不同细根生物量随着年龄、海拔、坡位等的不同表现出规律性的变化。但针对新疆桦树和山杨的生物量分配及模型研究尚未见报道。疣枝桦和欧洲山杨是组成新疆山地阔叶林的主要树种,分布较广泛<sup>[14]</sup>,了解它们的生物量的分配规律和精确估算其生物量对衡量其在森林碳汇中的作用具有重要意义。为此,基于现地实测数据运用数学统计的方法对新疆疣枝桦和欧洲山杨的生物量估测模型及分配格局进行探索分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

研究所用样木于 2010 年 8 月分别在阿勒泰林场、白哈巴林场、奇台林场和巩留林场选取林分中正常生长的疣枝桦样木 20 株和欧洲山杨样木 32 株,

记录样木的树种、胸径、地径、树高、冠幅、枝下高等及其采集地林分的调查因子(表 1),然后将样木伐倒分成树干、树枝、树叶,并分上、中、下 3 层称鲜重和取样品,现地称取样品和样木的鲜重,样品带回实验室烘干至恒重,测定各器官的含水率;由于获取地下根生物量困难,本研究选定其中 7 株疣枝桦和 10 株欧洲山杨样木挖根,分根茎、粗根( $\geq 10$  mm)、细根(2~10 mm,不含 2 mm 以下须根)称鲜重,同样分别抽取样品测含水率<sup>[15]</sup>。同时在每株样木基部分别截取 3~5 cm 厚圆盘并带回实验室根据年轮确定年龄,龄级划分参考森林资源二类调查细则。

### 1.2 方法

1.2.1 数据分析 采用非线性模型建立新疆疣枝桦和欧洲山杨立木生物量模型,通常生物量模型结构为:

$$Y=a_0 X_1^{b_1} X_2^{b_2} X_3^{b_3} \cdots X_n^{b_n} \theta \tag{1}$$

式中, $Y$  表示生物量; $X_1$ 、 $X_2$ ... $X_n$  表示变量; $a_0$ 、 $b_1$ ... $b_n$  表示参数; $\theta$  为误差项。非线性模型存在异方差,通常采用对数回归的方法消除异方差的影响<sup>[1-2]</sup>,对式(1)进行对数变换后如下式:

$$\ln Y=\ln a_0+b_1 \ln X_1+b_2 \ln X_2+\cdots+b_n \ln X_n+\ln \theta \tag{2}$$

运用 SPSS20.0 的最小二乘法估计回归系数,为减小对数转换产生的偏差<sup>[2]</sup>,引入修正系数  $\lambda$  对生物量估测值进行校正:

$$\lambda=\frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i} \tag{3}$$

式中, $n$  为样木个数; $Y_i$ 、 $\hat{Y}_i$  分别为生物量观测值和预测值。引进修正系数  $\lambda$  后,生物量无偏估计值为:

$$\hat{Y}=\lambda \times \exp \left(b_0+b_1 \ln X_1+b_2 \ln X_2+\cdots+b_n \ln X_n\right) \tag{4}$$

式中,  $b_0$  为式(1)  $a_0$  进行对数变换的结果, 即  $b_0 = \ln a_0$ 。

1.2.2 模型评价 生物量模型运用决定系数  $R^2$ 、平均预估误差 MPE 和平均百分标准误差 MPSE 指标估计模型的拟合优度和估计精度。其中, MPE 是反映平均生物量的估计精度, MPSE 反映单株生物量的估计精度<sup>[1]</sup>,  $P$  表示预估精度值。

$$R^2=1-\sum (y_i-\hat{y}_i)^2/\sum (y_i-\bar{y})^2 \tag{5}$$

$$SEE=\sqrt{\sum (y_i-\hat{y}_i)^2/(n-p)} \tag{6}$$

$$MPE=t_a\cdot (SEE/\bar{y})/\sqrt{n}\times 100 \tag{7}$$

$$P=1-MPE$$

式中,  $y_i$  为实际观测值;  $\hat{y}_i$  为模型预估值;  $\bar{y}$  为样本平均值;  $n$  样本单元数;  $t_a$  为置信水平  $\alpha$  时的  $t$  值。

2 结果与分析

2.1 生物量分配格局

生物量是植物在生长发育过程中能量的积累, 在不同生长阶段它与相邻植物会竞争光照、水分和养分等资源<sup>[2]</sup>, 其生物量的分配格局也会随着变化。

由图 1 可以看出, 疣枝桦和欧洲山杨的生物量分配比例均表现为树干>树根>树枝>树叶, 地上、地下生物量比例接近, 疣枝桦是 76.52% 和 23.48%, 山杨是 75.42% 和 24.58%; 全株生物量主要集中在树干, 比例占全株生物量的 51.52% 和 54.65%, 平均根冠比分别为 0.307 和 0.341, 经 Wilcoxon 检验各器官生物量分配比例差异均呈极显著,  $P<0.01$ 。

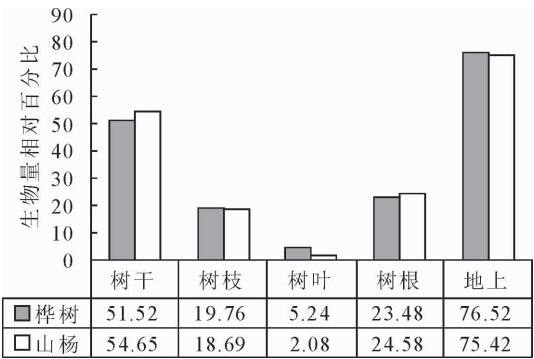


图 1 样木不同器官生物量相对分配比例

Fig. 1 Relative biomass allocation of the different components

由图 2 可以看出, 疣枝桦在不同径阶生物量分配比例表现为: 树干随径阶增大而提高, 树叶随径阶增大而降低, 树枝随径阶呈波浪式变化, 地下树根随径阶变化较小; 在不同径阶均呈树干>树根>树枝>树叶, 在 20 cm 以上径阶时树枝和树根的生物量比例接近。疣枝桦在胸径 10~20 cm 阶段是树干生物量比例增加明显, 树枝、树叶生物量比例下降; 在

20 cm 以上时, 树干比例增加很少, 树枝比例增加, 树叶树根比例降低。

由图 3 可以看出, 欧洲山杨在不同径阶生物量分配比例表现为: 树干随径阶增大呈先增后减的波浪式变化, 树枝随径阶增大而增加, 树叶和树根反之; 在径阶 1~10 cm 和 10~20 cm 均呈树干>树根>树枝>树叶, 到 20 cm 以上径阶呈树干>树枝>树根>树叶, 在这个径阶树枝的生物量比例增加较快。

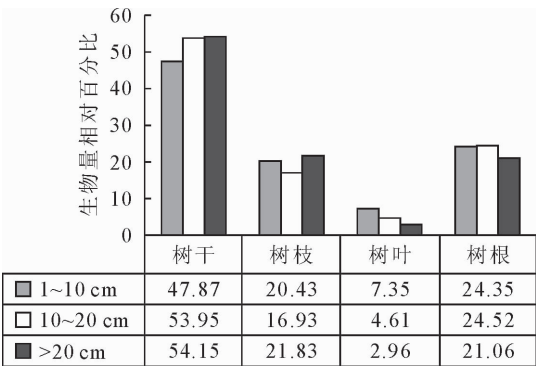


图 2 疣枝桦样木不同径阶生物量分配比例

Fig. 2 Relative biomass allocation at the different diameter grades of *Betula pendula*

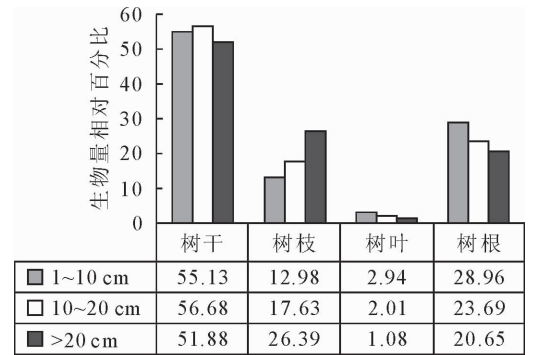


图 3 欧洲山杨样木不同径阶生物量分配比例

Fig. 3 Relative biomass allocation at the different diameter grades of *Populus tremula*

由图 4 可以看出, 疣枝桦在不同年龄的各器官生物量比例表现为树干随年龄增大而增大, 树叶和树根随年龄增大而降低, 树枝随年龄增大呈先降后升趋势。疣枝桦各器官生物量比例大小随着林龄增大而变化, 在幼龄林时表现为树干>树根>树枝>树叶, 中龄林时表现为树干>树根≈树枝>树叶, 近成熟林时表现为树干>树枝>树根>树叶。

由图 5 可以看出, 欧洲山杨在不同年龄的各器官生物量比例表现为树干、树叶和树根均随年龄增大而降低, 而树枝随年龄增大而增加。各器官生物量比例大小随着林龄增大而变化, 在幼龄林、中龄林时表现为树干>树根>树枝>树叶, 近成熟林时表现为树干>树枝>树根>树叶。

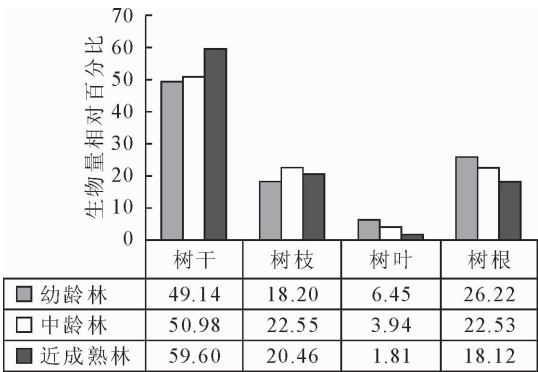


图 4 疣枝桦样本木不同年龄生物量分配比例

Fig. 4 Relative biomass allocation at the different ages of *B. pendula*

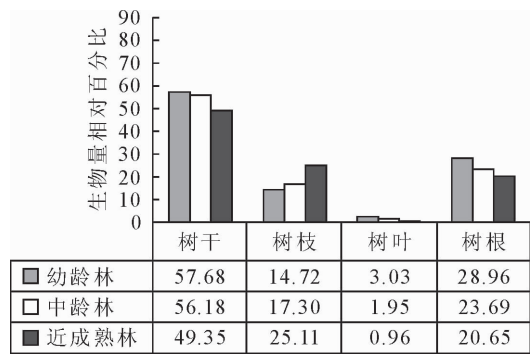


图 5 欧洲山杨样本木不同年龄生物量分配比例

Fig. 5 Relative biomass allocation at the different ages of *P. tremula*

2.2 立木生物量异速生长模型

描述个体大小和生理属性关系的规律叫做异速生长,生物的异速生长通常以幂函数的形式表示,即异速生长模型<sup>[19]</sup>。本文根据方程(4)分别采用一元因子胸径(DBH)和二元因子胸径(DBH)、树高(H)

构建疣枝桦和欧洲山杨立木各器官生物量模型,运用统计最小二乘回归法得出疣枝桦山杨各器官生物量模型,运用统计指标评价选出最优模型。

2.2.1 地上生物量异速生长模型 由表 2 可以看出,疣枝桦地上部分各器官生物量模型经 *F* 检验均呈极显著, Sig. < 0.001。各器官生物量一元和二元模型的 *R*<sup>2</sup> 均在 0.95 以上,说明模型可解释变量 95% 以上,平均预估误差均在 18% 以内。由单因子胸径拟合的一元模型提升到胸径和树高双因子拟合模型,地上生物量和树干生物量的拟合精度明显提高,各评价指标均有改进,决定系数 *R*<sup>2</sup> 达 0.99 以上,平均预估误差 MPE 树干由 18.0% 降到 6.65%,地上生物量由 11.29% 降到 4.95%,平均预估精度提升到 93.35% 和 95.05%;树冠、树枝和树叶生物量一元模型平均预估精度均在 88% 以上,二元模型增加树高因子并未提高决定系数 *R*<sup>2</sup>,平均预估误差和单株预估精度指标仅降低 0.5% 左右,树枝反而升高,平均预估精度并未提高,说明树高因子对树冠生物量贡献小。

疣枝桦地上各器官生物量最优模型为:

$$Y_{\text{地上}} = 1.109 \times \exp(-2.4191 \times 1.8671 \ln D \times 0.6743 \ln H) = 0.0987 \times D^{1.8671} \times H^{0.6743}$$
$$Y_{\text{树干}} = 1.109 \times \exp(-3.1689 \times 1.7412 \ln D \times 0.9573 \ln H) = 0.0466 \times D^{1.7412} \times H^{0.9573}$$
$$Y_{\text{树冠}} = 1.177 \times \exp(-2.7722 \times 2.1642 \ln D) = 0.07359 \times D^{2.1642}$$
$$Y_{\text{树枝}} = 1.210 \times \exp(-3.2283 \times 2.2552 \ln D) = 0.04795 \times D^{2.2552}$$
$$Y_{\text{树叶}} = 1.024 \times \exp(-3.6598 \times 1.8249 \ln D) = 0.02639 \times D^{1.8249}$$

表 2 疣枝桦地上生物量和各组分器官生物量模型拟合结果及统计指标

Table 2 Fitting results and statistical indexes of aboveground biomass and the biomass various tree parts for *B. tianschanica*

组分器官	模型	参数估计			统计指标					
		<i>b</i> <sub>0</sub>	<i>b</i> <sub>1</sub>	<i>b</i> <sub>2</sub>	<i>R</i> <sup>2</sup>	显著性 Sig.	修正系数	SEE/%	MPE/%	<i>P</i> /%
地上生物量	一元	-1.933 2	2.302 3		0.978	0.000	1.131	67.64	11.29	88.71
	二元	-2.419 1	1.867 1	0.674 3	0.991	0.000	1.109	29.65	4.95	95.05
树干	一元	-2.480 3	2.359 1		0.965	0.000	1.157	77.69	18.00	82.00
	二元	-3.168 9	1.741 2	0.957 3	0.99	0.000	1.109	28.56	6.65	93.35
树冠	一元	-2.772 2	2.164 2		0.974	0.000	1.177	18.70	11.02	88.98
	二元	-2.808 4	2.132 2	0.049 6	0.974	0.000	1.178	19.56	11.52	88.48
树枝	一元	-3.228 3	2.255 2		0.97	0.000	1.210	17.80	11.87	88.13
	二元	-3.296 8	2.196	0.091 8	0.97	0.000	1.213	19.23	12.82	87.18
树叶	一元	-3.659 8	1.824 9		0.95	0.000	1.024	2.29	11.56	88.44
	二元	-3.575 6	1.899 9	-0.116 1	0.951	0.000	1.022	2.20	11.11	88.89

由表 3 可以看出,欧洲山杨地上部分各器官生物量模型经 *F* 检验均呈极显著, Sig. < 0.001。树干和地上总生物量的预估精度较高,在 92% 以上,树

冠、树枝和树叶的预测精度相对较低,在 79% 以上。由单因子胸径拟合的一元模型提升到胸径和树高双因子拟合模型,树干、树冠和树枝生物量的拟合精度

明显提高,平均预估精度树干提升到 96.00%,树冠和树枝分别提升到 84.27%和 82.87%;地上总生物量的拟合精度并未提高,且其一元模型拟合精度已达 92.80%;树叶生物量一元模型预估精度均在 86.02%以上,而二元模型增加树高因子反而预估精度降低。

表 3 欧洲山杨地上生物量和各组分器官生物量模型拟合结果及统计指标

Table 3 Fitting results and statistical indexes of aboveground biomass and the biomass various of parts for <i>P. tremula</i>										
组分器官	模型	参数估计			统计指标					
		<i>b</i> 0	<i>b</i> 1	<i>b</i> 2	<i>R</i> <sup>2</sup>	显著性 Sig.	修正系数	<i>SEE</i> /%	<i>MPE</i> /%	<i>P</i> /%
地上生物量	一元	−2.215	2.399		0.993	0.000	0.997 5	74.36	7.20	92.80
	二元	−2.428	2.290	0.199	0.989	0.000	1.007 8	78.81	7.63	92.37
树干	一元	−2.35	2.322		0.995	0.000	0.987	39.19	5.76	94.24
	二元	−3.065	1.958	0.668	0.990	0.000	1.007 6	27.25	4.00	96.00
树冠	一元	−4.126	2.611		0.974	0.000	1.084	70.15	19.87	80.13
	二元	−2.901	3.235	−1.144	0.985	0.000	0.999 4	55.53	15.73	84.27
树枝	一元	−4.498	2.708		0.977	0.000	1.067 5	71.15	20.99	79.01
	二元	−3.469	3.231	−0.960	0.984	0.000	1.000 6	58.07	17.13	82.87
树叶	一元	−5.118	1.975		0.834	0.000	1.097 4	1.97	13.98	86.02
	二元	−3.362	2.868	−1.639	0.870	0.000	0.978 6	2.90	20.58	79.42

欧洲山杨地上各器官生物量最优模型为：  
 $Y_{\text{地上}}=0.997\ 5\times\exp(-2.215\times2.399\ 1\ln D)$   
 $=0.108\ 9\times D^{2.399}$   
 $Y_{\text{树干}}=1.007\ 6\times\exp(-3.065\times1.958\ln D\times$   
 $0.668\ln H=0.047\ 01\times D^{1.958}\times H^{0.668}$   
 $Y_{\text{树冠}}=0.999\ 4\times\exp(-2.901\times3.235\ln D\times$   
 $(-1.144)\ln H=0.549\ 7\times D^{3.235}\times H^{-1.144}$   
 $Y_{\text{树枝}}=1.000\ 6\times\exp(-3.469\times1.867\ 1\ln D\times$   
 $(-0.960)\ln H=0.031\ 1\times D^{3.231}\times H^{-0.960}$   
 $Y_{\text{树叶}}=1.097\ 4\times\exp(-5.118\times1.975\ln D)=$   
 $0.006\ 58\times D^{1.975}$

2.2.2 地下生物量异速生长模型 由于实测树根生物量难度较大,实践中通常采用根茎比(地下生物量与地上生物量的比值)这一指标结合地上生物量模型估计地下生物量<sup>[1]</sup>。本文运用 7 株疣枝桦和 10 株山杨实测的树根数据建立根茎比方程,然后与最优地上生物量模型结合建立地下生物量模型。

据实测数据建立根茎比与胸径(*D*)的回归关系：

$$R=c_0D^{c1}$$
$$Y_{\text{地下}}=R\times Y_{\text{地上}}$$

根茎比方程拟合结果：疣枝桦  $R=0.308\ 9D^{-0.127\ 1}$   $MPE=25.94\%$ ；欧洲山杨  $R=0.602\ 5D^{-0.251\ 4}$   $MPE=21.65\%$

根茎比方程和大样本拟合的地上生物量最优模型相乘得到疣枝桦地下生物量模型,根据积的误差传播定律,其平均预估误差 *MPE* 应该等于 2 个模型预估误差的平方平均数,根茎比方程建立的地下生物量模型平均预估精度疣枝桦是 81.35%,欧洲山杨是 83.87%,可以满足日常林业调查需求。

$$\text{疣枝桦:}Y_{\text{地下}}=0.030\ 5\times D^{1.740}\times H^{0.674\ 3}$$
$$\text{欧洲山杨:}Y_{\text{地下}}=0.065\ 6\times D^{2.147\ 6}$$

3 结论与讨论

生物量是植株对能量积累的一种体现,不同器官对生物量积累是不均匀的<sup>[3-6]</sup>。新疆疣枝桦和欧洲山杨不同器官生物量分配均表现为树干>树根>树枝>树叶,整体上疣枝桦和欧洲山杨生物量一半以上集中在树干,与魏艳敏<sup>[17]</sup>研究人工杨树林生物量得出的各器官生物量分配规律一致;本研究推算出疣枝桦和山杨平均根冠比分别为 0.307 和 0.341,与黄玫<sup>[16]</sup>研究森林根茎比在 0.17~0.36 之间吻合,该比值对于估计疣枝桦地下生物量具有重要参考价值。

在不同林龄不同径阶各器官生物量分配疣枝桦和欧洲山杨均表现为树干比例最高,树叶最低,在幼龄林和胸径 0~20 cm 树根大于树枝,但在中龄林和胸径 20 cm 以上疣枝桦表现为两者接近而山杨表现为树枝大于树根,随着林龄和径阶的变化各器官生物量比例的变化趋势是一致的。说明疣枝桦和欧洲山杨在整个生长过程中树干生长都占主导作用,树根与树枝生物量比例变化是由于这 2 种树喜光性强,不耐庇荫<sup>[14]</sup>,在幼龄时由于整株生物量较小,树根占比较大,随着年龄和径阶增大由于树种的喜阳特性直径和树高迅速生长,树枝也随着生长加快。这也是疣枝桦和欧洲山杨天然林在不同发育阶段各器官生物量分配对生长变化的反映。

生物量模型构建时,采用过多的自变量,会使模型过于复杂且实用性不高<sup>[18]</sup>。本研究采用最常用和较易获取的测树因子胸径和树高构建天然疣枝桦

和欧洲山杨的立木生物量模型,结果表明胸径因子拟合疣枝桦和欧洲山杨地上部分各器官模型平均预估精度均在 79% 以上;在胸径基础上引进树高因子对各器官生物量重新拟合发现,疣枝桦地上部分和树干生物量各评价指标改进显著,预估精度明显提高,尤其树干生物量胸径树高的双因子模型比胸径单因子模型预估精度提高了 11.3%,但树冠、树枝和树叶生物量各评价指标改进效果不大,而欧洲山杨树干、树冠和树枝生物量评价指标改进显著,精度提高 2%~4%,树叶生物量估测反而降低,地上总生物量估测精度几乎没变。运用根茎比方法建立疣枝桦和欧洲山杨地下生物量模型,估测精度分别是 81.35% 和 83.87%,可以满足日常生产需求。

参考文献:

[1] 曾伟生,张会儒,唐守正. 立木生物量建模方法[M]. 北京:中国林业出版社,2011:10-13.

[2] 汪金松,张春雨,范秀华,等. 臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 生态学报,2011,31(14):3918-3927.  
WANG J S,ZHANG C Y,FAN X H,*et al.* Biomass allocation patterns and allometric models of *Abies nephrolepis* Maxim [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14):3918-3927. (in Chinese)

[3] 李海奎,宁金魁. 基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型[J]. 生态学报,2012,32(3):740-757.  
LI H K,NING J K. Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(3):740-757. (in Chinese)

[4] 高成杰,唐国勇,孙永玉,等. 不同恢复模式下干热河谷幼龄印楝和大叶相思生物量及其分配[J]. 浙江农林大学学报,2012,29(4):482 - 490.  
GAO C J,TANG G Y,SUN Y Y,*et al.* Biomass and allocation of young *zadirachta indica* and *Acacia auriculiiformis* for different restoration patterns in dry-hot valley[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2012,29(4):482-490. (in Chinese)

[5] 贾全全,罗春旺,刘琪璟,等. 不同林分密度油松人工林生物量分配模式[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(6):87-93.  
JIA Q Q,LUO C W,LIU Q J,*et al.* Biomass allocation in relation to stand density in *Pinus tabuliiformis* plantation [J]. Journal of nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition,2015,39(6):87-93. (in Chinese)

[6] 郑路,蔡道雄,卢立华,等. 南亚热带不同树种人工林生物量及其分配格局[J]. 林业科学研究,2014,27(4):454-458.  
ZHENG L,CAI D X,LU L H,*et al.* Biomass allocation of different species plantations in subtropical area of China[J]. Forest Research,2014,27(4):454-458. (in Chinese)

[7] 董点,林天喜,唐景毅,等. 紫椴生物量分配格局及异速生长方程[J]. 北京林业大学学报,2014,36(4):54-63.  
DONG D ,LIN T X,TANG J Y,*et al.* Biomass allocation patterns and allometric models of *Tilia amurensis* [J]. Journal of Beijing Forestry University ,2014,36(4):54-63. (in Chinese)

[8] JOKELA E J,SHANNON C A,WHITE E H. Biomass and nutrient equations for mature *Betula papyrifera* Marsh[J]. Canadian Journal of Forest Research,2011,11(2):299-305.

[9] MARK D C,SCHMITT D F,GRIGAL. Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh[J]. Canadian Journal of Forest Research,1981,11(4):837-840.

[10] YANG R,YU L F,LUO Y,*et al.* Effects of different environment of Karst forest on the biomass of *Betula luminifera* saplings[J]. Journal of Nanjing Forestry University,2009,33(1):143-145.

[11] 张同文,袁玉江,魏文寿,等. 开都河流域天山桦树轮宽度年表的建立及其气候响应[J]. 生态学报,2015,35(9):3034-3042.  
ZHANG T W,YUAN Y J,WEI W S,*et al.* Development of the tree-ring width chronology of *Betula tianschanica* for the Kaiduhe river watershed and its climate response[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9):3034-3042. (in Chinese)

[12] 王宁,王百田,王瑞君,等. 晋西山杨和油松生物量分配格局及异速生长模型研究[J]. 水土保持通报,2013(2):0151-0156.  
WANG N,WANG B T,WANG R J,*et al.* Biomass allocation patterns and allometric models of *Populus davidiana* and *Pinus tabulaeformis* Carr. in West of Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013(2):0151-0156. (in Chinese)

[13] 刘建军,王得祥,雷瑞德,等. 火地塘天然油松锐齿栎林细根生物量及其空间变化[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):1-4.  
LIU J J,WANG D X,LEI R D,*et al.* Fine roots biomass and spatial dynamic in the natural stands of sharptooth oak Chinese pine at Huoditang Forest Region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2004,19(1):1-4. (in Chinese)

[14] 《新疆森林》编辑委员会. 新疆森林[M]. 北京:中国林业出版社,1990:159-160.

[15] 张绘芳,高亚琪,朱雅丽,等. 新疆雪岭杉生物量模型对比研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):52-58.  
ZHANG H F,GAO Y Q,ZHU Y L,*et al.* A comparative study on biomass models for *Picea schrenkianain* Xinjiang [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(6):52-58. (in Chinese)

[16] 黄政,季劲钧,曹明奎,等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报,2013,26(12):4156-4163.  
HUANG M,JI J J,CAO M K,*et al.* Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,26(12):4156-4163. (in Chinese)

[17] 魏艳敏. 荒漠环境规模化人工杨树林生物量和碳储量研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2010:23-26.

[18] 王维枫,雷渊才,王雪峰,等. 森林生物量模型综述[J]. 西北林学院学报,2008,23(2):58-63.  
WANG W F,LEI Y C,WANG X F,*et al.* A review of forest biomass models[J]. Journal of Northwest Forestry University,2008,23(2):58-63. (in Chinese)

[19] 韩文轩,方精云. 幂指数异速生长机制模型综述[J]. 植物生态学报,2008,32(4):951-960.  
HAN W X,FANG J Y. Review on the mechanism models of allometric scaling laws: 3/4 VS. 2/3 Power [J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2008, 32(4):951-960. (in Chinese)