

西安市4种城市绿化灌木单株生物量估算模型*

姚正阳 刘建军**

(西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 以西安市常见的4种绿化灌木(小叶女贞、雀舌黄杨、紫叶小檗、大叶黄杨)为研究对象,利用不同函数和自变量构建单一物种的器官及个体生物量估算模型,筛选出相关性最高、拟合度最好的模型作为生物量最佳估算模型.结果表明:4种灌木各器官及个体生物量最优估算模型除大叶黄杨叶生物量模型为对数函数(VAR)模型外,其余无论是器官生物量模型还是个体生物量模型均为幂函数(CAR)模型.模型包含的自变量有基径、植株冠幅直径、植株冠幅直径与株高乘积、植冠面积和植冠体积.大叶黄杨和其他3种灌木在自变量选取上有着明显不同.大叶黄杨生物量模型主要以基径为自变量,其他3种灌木生物量模型主要以与冠幅相关的因子为自变量.

关键词 城市绿地 灌木 生物量模型

文章编号 1001-9332(2014)01-0111-06 **中图分类号** S731.2, S758.1 **文献标识码** A

Models for biomass estimation of four shrub species planted in urban area of Xi'an City, Northwest China. YAO Zheng-yang, LIU Jian-jun (College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(1): 111-116.

Abstract: Four common greening shrub species (*i. e.* *Ligustrum quihoui*, *Buxus bodinieri*, *Berberis xinganensis* and *Buxus megistophylla*) in Xi'an City were selected to develop the highest correlation and best-fit estimation models for the organ (branch, leaf and root) and total biomass against different independent variables. The results indicated that the organ and total biomass optimal models of the four shrubs were power functional model (CAR model) except for the leaf biomass model of *B. megistophylla* which was logarithmic functional model (VAR model). The independent variables included basal diameter, crown diameter, crown diameter multiplied by height, canopy area and canopy volume. *B. megistophylla* significantly differed from the other three shrub species in the independent variable selection, which were basal diameter and crown-related factors, respectively.

Key words: urban green space; shrub; biomass model.

气候变化已成为当今全球共同面临的重大课题.碳源/碳汇的定性和定量分析,对于研究气候变化对生态系统的影响、决策生态系统的应对策略等具有支持作用.随着城市化进程的加速,城市作为主要的人为碳排放源受到广泛关注,而作为城市生态系统中自然成分的主体,城市绿地在碳汇方面发挥着至关重要的作用.近年来,各国学者围绕城市绿地碳储量、碳汇功能以及碳循环做了许多研究^[1-4].生物量是生态系统运行的物质和能量基础^[5-6].对生物量的测定是进一步研究生态系统碳循环和碳动态分析的基础^[7-8].为了更深入地研究城市绿地在碳

汇方面的作用,对城市绿地植被进行生物量的测定十分必要.目前,研究绿色植物生物量的方法主要有两大类,其中,直接收获法既费时又费力,而通过建立回归模型来估算生物量,不但可以降低对植被的破坏,而且更容易估算乔木和灌木生物量^[9-12].灌木是生态系统的重要类型之一,城市绿化灌木是城市绿地重要组成部分,目前,国内外灌木生物量模型的研究多集中于天然森林林下灌木^[13-18],关于城市绿化灌木的研究则鲜有报道.

小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、雀舌黄杨(*Buxus bodinieri*)、紫叶小檗(*Berberis xinganensis*)、大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)是西安市常见4种绿化灌木,在城市绿化中被广泛使用.本文以这4种灌木为研究对象,构建其各器官及个体生物量估算模型,旨在

* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD38B0603)资助.

** 通讯作者. E-mail: ljj@nwsuaf.edu.cn

2013-06-02 收稿, 2013-10-30 接受.

为城市绿地生态系统碳储量和碳循环的研究提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

西安市 (33° 39'—34° 45' N, 107° 40'—109° 49' E) 地处陕西关中平原中部, 北临渭河, 南依秦岭. 属暖温带半湿润季风气候, 冷暖干湿, 四季分明, 年无霜期 226 d. 1 月平均气温 0.4 °C, 7 月平均气温 26.6 °C, 年均气温 13.3 °C. 年均降水量 613.7 mm, 年均相对湿度 7.0%. 西安市主要土壤类型为黄褐土、褐土.

1.2 数据获取

选取西安市常用的 4 种绿化灌木树种作为研究对象, 即小叶女贞、雀舌黄杨、紫叶小檗、大叶黄杨 (表 1). 2012 年 8 月在西安市苗圃取样, 每种灌木各随机选取 50 株 (年龄在 2~15 年), 其中, 30 株用于估测模型参数, 其余 20 株用于模型检验. 测量每株植株株高 (H , m)、基径 (D , cm)、冠幅 (C , m) (长短冠径之均值), 之后将植物整株挖出, 深度为根系分布所达范围, 地上部分分枝、叶称其鲜质量 (精度到 0.01 g), 根系迅速洗净称其鲜质量 (精度到 0.01 g), 然后将各组分各取适量样品放入 80 °C 通风干燥箱内烘至恒量, 计算干、鲜质量比, 通过干鲜质量比计算每株灌木各器官及全株干质量 (精度到 0.01 g). 本文中所选灌木均为丛生, 并无明显的主干, 因此, 在构建器官生物量模型时, 将地上部分分为枝和叶分别进行模型构建. 4 种灌木的样本数及各调查参数范围见表 1.

1.3 数据分析

1.3.1 模型自变量的选择 自变量的选取是构建模型的关键^[19]. 只有选择与灌木生物量相关性较高的自变量来拟合生物量模型, 才能提高模型精度. 影响

灌木生物量的主要因子有 H 、 D 、 C 和植冠面积 (A_c , m^2). 众多研究表明, 除株高、基径和植株冠幅直径是生物量建模的理想指标外^[20-23], 自变量选取植株冠幅直径与株高乘积 (CH)、基径平方与株高乘积 (D^2H)、 A_c 和植冠体积 (V_c) 等指标进行灌木生物量模型拟合也获得了较好的结果^[13-15, 18, 23-25]. 本文选取 H 、 D 、 C 、 CH 、 D^2H 、 A_c ($A_c = \pi C_1 C_2 / 4$, 其中, C_1 为冠幅长轴冠径, C_2 为冠幅短轴冠径) 和 V_c ($V_c = A_c H$) 等易测因子作为自变量, 分别对 4 种灌木进行各器官及个体生物量模型拟合.

1.3.2 模型的选取 根据国内外对于灌木生物量模型的研究, 生物量模型有 3 种类型: 线性模型、非线性模型和多项式模型. 非线性模型应用最广泛, 其中, 相对生长模型的幂函数 (CAR) 模型和对数函数 (VAR) 模型最具有代表性, 是所有模型中应用最普遍的两种模型^[26]. 本研究选用以下 4 种模型类型进行生物量方程拟合:

$$Y = a + bX \quad (1)$$

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (2)$$

$$Y = a + b \ln X \quad (3)$$

$$Y = aX^b \quad (4)$$

式中: Y 为生物量; X 为自变量; a 为回归常数; b 、 c 为回归系数.

采用 SPSS 18.0 软件对数据进行回归分析, 用判定系数 (R^2)、估计值的标准误 (SEE)、标准化残差以及通过对模型及模型参数的 F 检验和 t 检验对方程进行筛选, 用总相对误差 (RS) 和平均相对误差绝对值 (RMA) 来评价方程优劣, 选择方程显著 ($P < 0.05$)、相关性最密切、拟合度最好的生物量回归模型作为最佳估算模型.

$$RS = \frac{\sum Y_i - \sum \hat{Y}_i}{\sum \hat{Y}_i} \times 100\% \quad (5)$$

表 1 取样灌木的基本参数范围

Table 1 Range for general parameters of sampling shrubs

灌木 Shrub	样本数 Number of sample	株高 Height (m)			基径 Basal diameter (cm)			冠幅 Crown (m)			总生物量 Total biomass (g)		
		最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值± 标准差 Mean±SD	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值± 标准差 Mean±SD	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值± 标准差 Mean±SD	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值± 标准差 Mean±SD
小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	50	0.36	1.62	1.14±0.39	0.27	4.36	1.72±1.04	0.14	0.96	0.67±0.27	8.25	75.31	45.42±20.30
雀舌黄杨 <i>Buxus bodinieri</i>	50	0.31	0.74	0.53±0.09	0.25	1.02	0.59±0.18	0.15	0.31	0.23±0.04	10.60	67.69	35.22±15.19
紫叶小檗 <i>Berberis xingnanensis</i>	50	0.36	1.03	0.71±0.15	0.29	1.14	0.67±0.20	0.26	0.55	0.41±0.08	12.58	41.68	23.30±7.03
大叶黄杨 <i>Buxus megistophylla</i>	50	0.34	1.34	0.89±0.24	0.38	4.37	1.71±1.05	0.23	1.14	0.76±0.25	9.85	196.66	70.13±46.55

$$RMA = \frac{1}{n} \sum | \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\hat{Y}_i} | \times 100\% \quad (6)$$

式中: n 为样本数; Y_i 为生物量实测值; \hat{Y}_i 为生物量预测值。

在选择回归模型时, 一般选用 R^2 最大、SEE 最小的模型作为生物量估算的最优模型。但是, R^2 值在未经对数转换的方程与经对数转换的乘幂方程之间不能直接进行统计比较^[27-28]。为对模型进行比较, 选用标准误修正因子 (CF) 和适合指数 (FI) 来替代乘幂方程的 SEE 和 R^2 值作为模型优劣的判断指标^[27, 29-30]。当乘幂方程的 FI 值与线性方程、二次多项式方程及对数方程的 R^2 值接近时, 选择乘幂方程为最佳估测模型。CF、SEE 和 FI 的计算公式如下:

$$CF = \exp(S_{y,x}^2/2) \quad (7)$$

$$SEE = \frac{[\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - k - 1)]^{\frac{1}{2}}}{\bar{Y}} \quad (8)$$

$$FI = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

式中: y 为因变量 (干质量); x 为自变量; $S_{y,x}$ 为 $Y = aX^b$ 的估计值的标准误 (SEE); Y_i 为第 i 个植株生物量实测值; \hat{Y}_i 为第 i 个植株生物量预测值; \bar{Y} 为植株生物量平均值; n 为样本数; k 为自变量个数。

2 结果与分析

2.1 4 种灌木物种生物量的最佳模型

分别对 4 种灌木各器官及个体生物量进行回归

分析, 选择各物种器官及个体生物量最佳模型 (表 2)。其中, 绝大多数器官及个体生物量模型为 CAR 模型; 所有回归模型的回归关系均极显著 (F 检验, $P < 0.001$), 大多数 R^2 值超过 0.850, 且 SEE 值较小。

除大叶黄杨的枝、根及个体生物量模型均用 D 解释较好外, 其余各器官及个体生物量模型均用 C 、 CH 、 A_c 和 V_c 作为自变量的解释较理想。其中, 雀舌黄杨各器官及个体生物量均用 CH 估算较好, 紫叶小檗各器官及个体生物量均用 A_c 拟合模型最佳。

4 种灌木各器官及个体生物量最佳估算模型中, 除大叶黄杨的叶生物量模型为 VAR 模型外, 其余无论是器官生物量模型还是个体生物量模型均为 CAR 模型, 均有较高的 R^2 值和较小的 SEE 值 (表 2)。其中, 枝、叶、根及个体生物量估算模型的 R^2 值范围分别在 0.895 ~ 0.979、0.601 ~ 0.972、0.785 ~ 0.975、0.903 ~ 0.980。总体上, 各器官生物量最佳估算模型的 R^2 值从大到小依次为枝 > 根 > 叶; 4 种灌木个体生物量最佳模型的 R^2 值依次为 大叶黄杨 > 小叶女贞 > 雀舌黄杨 > 紫叶小檗。

2.2 模型残差分析

残差分析是一种简单实用的模型诊断技术, 通过模型的标准化残差可以分析回归方程的方差齐性和检测异常值^[28]。一个好的模型的残差应该是任意分布的, 呈现正态分布的特点。本研究利用 4 种灌木各器官及个体生物量模型标准化残差对模型进行诊断分析。结果显示, 4 种灌木各器官及个体生物量标

表 2 4 种灌木各器官及其个体生物量模型

Table 2 Equations for organs and individual biomass of four shrubs

灌木 Shrub	模型 Equation	参数 Parameter		判定系数 R^2	适合指数 FI	标准误修正 因子 CF	估计值标 准误 SEE	P
		a	b					
小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	$W_B = a(CH)^b$	26.332	0.666	0.950	0.940	1.013	0.159	<0.001
	$W_L = aC^b$	14.646	1.164	0.972	0.956	1.007	0.120	<0.001
	$W_R = aV_c^b$	18.721	0.421	0.965	0.937	1.008	0.129	<0.001
	$W_T = a(CH)^b$	52.388	0.654	0.959	0.957	1.010	0.141	<0.001
雀舌黄杨 <i>Buxus bodinieri</i>	$W_B = a(CH)^b$	262.879	1.546	0.895	0.913	1.016	0.177	<0.001
	$W_L = a(CH)^b$	224.662	1.364	0.890	0.902	1.013	0.160	<0.001
	$W_R = a(CH)^b$	294.262	1.639	0.889	0.906	1.019	0.194	<0.001
	$W_T = a(CH)^b$	756.343	1.497	0.913	0.928	1.012	0.154	<0.001
紫叶小檗 <i>Berberis xinganensis</i>	$W_B = aA_c^b$	73.468	0.766	0.927	0.934	1.004	0.090	<0.001
	$W_L = aA_c^b$	3.340	0.465	0.601	0.609	1.012	0.157	<0.001
	$W_R = aA_c^b$	29.029	0.721	0.785	0.819	1.012	0.157	<0.001
	$W_T = aA_c^b$	104.637	0.734	0.903	0.915	1.005	0.100	<0.001
大叶黄杨 <i>Buxus megistophylla</i>	$W_B = aD^b$	15.572	1.325	0.979	0.983	1.010	0.139	<0.001
	$W_L = a + b \ln(CH)$	20.649	9.047	0.902	0.902	-	2.432	<0.001
	$W_R = aD^b$	9.654	1.308	0.975	0.979	1.011	0.151	<0.001
	$W_T = aD^b$	35.982	1.212	0.980	0.978	1.008	0.125	<0.001

W_B 、 W_L 、 W_R 和 W_T 分别为枝、叶、根和总生物量 W_B , W_L , W_R and W_T stood for the biomass of branch, leaf, root and total, respectively. 下同 The same below.

表 3 回归模型精度检验

Table 3 Accuracy assessment of the equations

灌木 Shrub	生物量 Biomass	总相对误差 RS (%)	平均相对误差 绝对值 RMA (%)
小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	W_B	3.7	13.0
	W_L	-0.3	10.8
	W_R	4.6	10.6
	W_T	2.9	10.4
雀舌黄杨 <i>Buxus bodinieri</i>	W_B	2.1	12.4
	W_L	3.9	11.8
	W_R	4.7	14.1
	W_T	3.1	8.8
紫叶小檗 <i>Berberis xingnanensis</i>	W_B	0.7	6.3
	W_L	-0.6	13.8
	W_R	-3.2	10.3
	W_T	-0.6	5.4
大叶黄杨 <i>Buxus megistophylla</i>	W_B	-3.7	13.7
	W_L	0.1	13.4
	W_R	-4.5	12.6
	W_T	-4.7	12.1

准化残差绝对值均未超过默认值 3,且在横坐标方向上未呈现任何趋势,因此,可以认为本文所选的估算模型比较合理。

2.3 模型精度检验

模型验证是构建生物量模型的重要步骤,是方程应用的基础。本文以总相对误差(RS, <30%)和平均相对误差绝对值(RMA, <20%)为方程验证指标^[31],采用 4 种灌木未参与建模的 20 个样本进行模型精度验证。RS 和 RMA 反映了回归模型的拟合程度,其中,RS 反映回归模型系统偏差的情况,RMA 反映各器官及个体的平均相对误差。

由表 3 可以看出,4 种灌木各器官及个体生物量估算模型的 RS 和 RMA 值均在精度允许范围内。4 种灌木枝、叶、根及个体生物量估算模型的 RS 值均小于 10%,其值范围分别为 -3.7% ~ 3.7%、-0.6% ~ 3.9%、-4.5% ~ 4.7%、-4.7% ~ 3.1%。所有灌木枝、叶、根及个体生物量模型 RMA 值均显著高于 RS 值,其值范围分别为 6.3% ~ 13.7%、10.8% ~ 13.8%、10.3% ~ 14.1%、5.4% ~ 12.1%。整体上,模型估测效果较好,可以进行生物量估测。

3 讨 论

本文在总结前人对生物量模型研究的基础上,选取 H 、 D 、 C 、 CH 、 D^2H 、 A_c 、 V_c 等易测因子作为自变量,对 4 种城市绿化灌木各器官及个体生物量进行模型模拟,结果表明:大叶黄杨枝、根以及个体生物量的最优估算模型以 D 为自变量,其他灌木器官及

个体生物量模型自变量均与冠幅因子有关,其中,雀舌黄杨各器官及个体生物量模型自变量参数均为 CH ,紫叶小檗各器官及个体生物量模型均以 A_c 为自变量估算生物量最佳;在模型方程形式的选择上,4 种灌木器官及个体生物量最佳估算模型多以 CAR 模型为主,只有大叶黄杨叶生物量模型为 VAR 模型,且各最优估算模型均有较高的 R^2 值和较小的 SEE 值(表 2);模型精度检验的结果表明,4 种灌木各器官及个体生物量预测模型均符合精度要求,可以用于灌木生物量的估测。

单木生物量模型误差主要由因子选择和模型采用的数学形式两个方面决定^[32]。因此,如何依据其生物学特性选择恰当的参数是提高生物量回归法测定精度的关键。有研究表明,灌木生物量估测参数的选择与灌木形态有着密切关系^[23]。基径、冠幅面积以及高度等易测因子常被用作灌木生物量模型的回归拟合。许多研究表明,主干比较明显的灌木,以 D 或 D^2H 为自变量可以很好地预测灌木生物量^[17,24,33-34];而分枝多、植株矮小、无明显主干的灌木,以冠幅直径或冠幅面积为自变量拟合个体生物量是可行的,且具较高精度^[15,23,35-36]。从实用性、简便性考虑,对于那些矮小且分枝较多的灌木,测量冠幅比测量基径更简便、省时、省力。在灌木生物量模型拟合中,将 H 引进自变量中没有乔木普遍^[35,37-39],这可能是由于乔木中枝干占生物量的比重较大的缘故。但是,在灌木生物量估算中,引进 H 是十分有必要的,因为植株生长不仅表现在侧枝的横向生长,也包括纵向树高的生长^[35],因此,采用 CH 和 V_c 为自变量建立模型可以很好地提高模型精度。此外,在灌木枝干生长易受到外界干扰(修剪)的情况下,引入 H 就更加重要^[33]。与其他 3 种灌木相比,大叶黄杨主干比较明显。本研究结果显示,大叶黄杨枝、根以及个体生物量模型参数均为 D ,也印证了这一点,而其他 3 种灌木器官及个体生物量模型均与冠幅参数有关。显然,在选择模型自变量时必须考虑植物的形态特征。本研究中,除大叶黄杨叶生物量最佳估算模型为 VAR 模型外,其余均为 CAR 模型。不同灌木树种所得到的方程形式也不一样,因为灌木树种形态各异,目前尚无固定的通用估测模型公式。此外,本研究中估算模型的 R^2 值与国内外其他物种模型的 R^2 值范围一致^[15,23,35],而替代 R^2 值进行模型优劣比较的 FI 值并不总小于 R^2 值^[18]。

灌木生物量估算主要有两种方法,一是直接收获法,二是模型估测。直接收获法不仅需花费相当多

的时间和劳力,而且存在破坏植被的缺点;模型估测具有简便性和实用性的优点,而且可以减少对灌木植被的不必要破坏,同时数据可以进行外推而使生物量的跟踪调查研究成为可能. 针对城市绿地不能轻易破坏的特殊性,采用易测因子建立灌木生物量最优化预测模型可为城市绿地灌木生物量的测定提供便利条件.

灌木的生长状况会因立地条件的不同而存在一定差异. 因此,在研究区之外应用本文建立的回归估测模型时,需用拟合率检验并确定校正正值,当拟合率大于 70% 时,则可认为该模型适合于该地区. 此外,对于模型中自变量超过该研究范围,进行冠幅、植株高度等变量外推时也需要做进一步验证.

本研究所建立的 4 种城市绿化灌木器官及个体生物量模型完善了城市绿地灌木生物量模型基础数据库,为城市绿地灌木生物量和碳储量研究提供了参考. 在模型评价指标的选取上,不仅采用常规的判定系数和估计值标准误,还采用了残差分析来综合评价模型的拟合效果,能较全面地反映模型的优劣. 近年来城市绿地碳储量和碳循环研究越来越受到重视,但城市绿地灌木生物量模型研究较少,因此,今后应加强城市绿地灌木种类生物量估算模型的研究,为精确研究城市绿地碳储量和碳循环提供可靠的基础数据.

参考文献

- [1] Zhu C (朱超), Zhao S-Q (赵淑清), Zhou D-C (周德成). Organic carbon storage in urban built-up areas of China in 1997–2006. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2012, **23**(5): 1195–1202 (in Chinese)
- [2] Guan D-S (管东生), Chen Y-J (陈玉娟), Huang F-F (黄芬芳). The storage and distribution of carbon in urban vegetation and its roles in balance of carbon and oxygen in Guangzhou. *China Environmental Science (中国环境科学)*, 1998, **18**(5): 437–441 (in Chinese)
- [3] Jo HK, McPherson EG. Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management*, 1995, **45**: 109–133
- [4] Jo HK. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*, 2002, **64**: 115–126
- [5] Feng Z-W (冯宗炜), Wang X-K (王效科), Wu G (吴刚). Biomass and Productivity of Forest Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [6] Roy J, Mooney HA, Saugier B. Terrestrial Global Productivity, Past, Present, Future. San Diego, CA: Academic Press, 2001

- [7] Woodwell GM, Whittaker RH, Reiners WA, *et al.* The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, **199**: 141–146
- [8] Fang JY, Wang GG, Liu GH, *et al.* Forest biomass of China: An estimation based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, 1998, **8**: 1084–1091
- [9] Brown JK. Estimating shrub biomass from basal stem diameters. *Canadian Journal of Forest Research*, 1976, **6**: 154–158
- [10] Crow TR. Common regressions to estimate tree biomass in tropical stands. *Forest Science*, 1978, **24**: 180–191
- [11] Pereira JM, Sequeira NM, Carreiras JM. Structural properties and dimensional relations of some Mediterranean shrub fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, **5**: 35–42
- [12] Ter-Mikaelian MT, Korzukhin MD. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 1997, **97**: 1–24
- [13] Zeng H-Q (曾慧卿), Liu Q-J (刘琪璟), Feng Z-W (冯宗炜), *et al.* Estimation models of understory shrub biomass and their applications in red soil hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(10): 2185–2190 (in Chinese)
- [14] Yang K (杨昆), Guan D-S (管东生). Selection of gaining quadrat for harvesting the undergrowth vegetation and its biomass estimation modeling in forest. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2007, **27**(2): 705–714 (in Chinese)
- [15] Li X-N (李晓娜), Guo Q-X (国庆喜), Wang X-C (王兴昌), *et al.* Allometry of understory tree species in a natural secondary forest in northeast China. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 2010, **46**(8): 22–32 (in Chinese)
- [16] Tietema T. Biomass determination of fuelwood trees and bushes of Botswana, southern Africa. *Forest Ecology and Management*, 1993, **60**: 257–269
- [17] Haase R, Haase P. Above-ground biomass estimates for invasive trees and shrubs in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 1995, **73**: 29–35
- [18] Sah JP, Ross MS, Koptur S, *et al.* Estimating aboveground biomass of broadleaved woody plants in the understory of Florida Keys pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, **203**: 319–329
- [19] Woods KD, Feiveson AH, Botkin DB. Statistical analysis for biomass density and leaf-area index estimation. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, **21**: 974–989
- [20] Tang S-Z (唐守正), Zhang H-R (张会儒), Xu H (胥辉). Study on establish and estimation method of compatible biomass model. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 2000, **36**(suppl. 1): 19–27 (in Chinese)
- [21] Zhang H-Q (张海青), Liu Q-J (刘琪璟), Lu P-L (陆佩玲), *et al.* Biomass estimation of several common shrubs in Qianyanzhou Experimental Station. *Forest Inventory and Planning (林业调查规划)*, 2005, **30**(5): 43–49 (in Chinese)

- [22] Lyon LJ. Length- and weight-diameter relations of serviceberry twigs. *Journal of Wildlife Management*, 1970, **34**: 456-460
- [23] Paton D, Nuñez J, Bao D, *et al.* Forage biomass of 22 shrub species from Monfragüe Natural Park (SW Spain) assessed by log-log regression models. *Journal of Arid Environments*, 2002, **52**: 223-231
- [24] Wang L (王 蕾), Zhang H (张 宏), Ha S (哈 斯), *et al.* A study on the estimating method of shrub upper biomass based on the crown diameter and plant height. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* (北京师范大学学报·自然科学版), 2004, **40**(5): 700-704 (in Chinese)
- [25] Vora RS. Prediction biomass of five shrub species in Northeastern California. *Journal of Range Management*, 1988, **41**: 83-85
- [26] Xu H (胥 辉). A comparison between CAR and VAR biomass models. *Journal of Southwest Forestry College* (西南林学院学报), 2003, **23**(2): 36-39 (in Chinese)
- [27] Crow TR, Schlaegel BE. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. *Northern Journal of Applied Forestry*, 1988, **5**: 15-22
- [28] Draper NR, Smith H. *Applied Regression Analysis*. 3rd Ed. New York, USA: John Wiley and Sons, 1998
- [29] Sprugel DG. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, 1983, **64**: 209-210
- [30] Brand GJ, Smith WB. Evaluating allometric shrub biomass equations fit to generated data. *Canadian Journal of Botany*, 1985, **63**: 64-67
- [31] Wang L (王 玲). Study of Biomass and Its Models of Main Shrub Community Type in Northwest Sichuan. Master Thesis. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [32] Guo Q-W (郭清文), Feng Z-K (冯仲科), Zhang Y-L (张彦林), *et al.* Error theory and weighted-calculation method on single-tree biomass model. *Central South Forest Inventory and Planning* (中南林业调查规划), 2006, **25**(1): 5-9 (in Chinese)
- [33] Martin WL, Sharik TL, Oderwald RG, *et al.* Equations for Estimating Above-ground Phytomass in the Understorey of Appalachian Oak Forests. Blacksburg, VA, USA: School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1981
- [34] Paton D, Azocar P, Tovar J. Growth and productivity in forage biomass in relation to the age assessed by dendrochronology in the evergreen shrub *Cistus ladanifer* (L.) using different regression models. *Journal of Arid Environments*, 1998, **38**: 221-235
- [35] Halpern CB, Miller EA, Geyer MA. Equations for predicting above-ground biomass of plant species in early successional forests of the western Cascade Range, Oregon. *Northwest Science*, 1996, **70**: 306-320
- [36] Gehring C, Park S, Denich M. Liana allometric biomass equations for Amazonian primary and secondary forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, **195**: 69-83
- [37] Harrington G. Estimation of above-ground biomass of trees and shrubs in a *Eucalyptus populaca* F. Muell woodland by regression of mass on trunk diameter and plant height. *Australian Journal of Botany*, 1979, **27**: 135-143
- [38] Murray RB, Jacobson MQ. An evaluation of dimension analysis for predicting shrub biomass. *Journal of Range Management*, 1982, **35**: 451-454
- [39] Nelson BW, Mesquita R, Pereira JLG, *et al.* Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, 1999, **117**: 149-167

作者简介 姚正阳,男,1984年生,博士研究生.主要从事城市生态研究. E-mail: yangyang0077@163.com

责任编辑 杨 弘
