

内蒙古柠条和山杏单株生物量模型研建

曾伟生¹, 白锦贤², 宋连城³, 赵学军⁴, 王雪军¹, 邢利军⁴, 张振荣⁵

(1. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714; 2. 内蒙古自治区林业厅, 内蒙古呼和浩特 010010;

3. 内蒙古第二林业监测规划院, 内蒙古乌兰浩特 137400; 4. 内蒙古林业监测规划院, 内蒙古呼和浩特 010020;

5. 内蒙古自治区林业厅驻呼和浩特森林资源监督专员办事处, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要:【目的】针对现有灌木生物量模型存在的分量与总量、地上与地下生物量不相容等问题,探索利用联立方程组方法,建立灌木林相容性生物量模型。【方法】以内蒙古自治区的2种常见灌木柠条(*Caragana korshinskii*)和山杏(*Armeniaca sibirica*)为研究对象,基于大样本的生物量实测数据,利用非线性误差变量联立方程组方法,建立了地上生物量模型及其相容的地下生物量模型和根茎比模型。【结果】表明:基于植冠面积和丛生枝个数(或植株高度)的地上生物量模型,其确定系数能达到0.67以上,但地下生物量模型的确定系数要低些,其中山杏仅0.36;2种灌木的地上生物量和地下生物量模型的平均预估精度均能达到80%以上,全株生物量的平均预估精度,山杏能达到86%以上,柠条能达到92%以上。【结论】对于无明显主干的丛生状灌木,不论是地上生物量还是地下生物量,植冠面积是首要的相关因子,其次才是丛生枝个数和植株高度;利用非线性误差变量联立方程组方法,能有效解决不同生物量之间的相容性问题,同步建立地上生物量模型及其相容的地下生物量模型和根茎比模型;所建模型完全可用于内蒙古自治区范围内相应灌木林的生物量估计。

关键词:地上生物量;地下生物量;根茎比;相容性;预估精度;柠条;山杏

中图分类号:S718.55

文献标识码:A

Establishment of Individual Biomass Equations for *Caragana korshinskii* and *Armeniaca sibirica* in Inner Mongolia

ZENG Wei-Sheng¹, BAI Jin-xian², SONG Lian-cheng³, ZHAO Xue-jun⁴,
WANG Xue-jun¹, XING Li-jun⁴, ZHANG Zhen-rong⁵

(1. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China; 2. Forestry Department of Inner Mongolia, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. Second Institute of Forest Monitoring and Planning of Inner Mongolia, Ulanhot 137400, Inner Mongolia, China; 4. Forest Monitoring and Planning Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 5. Hohhot Office of Forest Resource Supervision of Forestry Department of Inner Mongolia, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Objective Aiming at the incompatibility of shrub biomass models between total biomass and components, or above- and below-ground biomass, the authors attempted to develop compatible shrub biomass models using the approach of simultaneous equations. **Method** Based on the individual biomass mensuration data of two common shrub species, *Caragana korshinskii* and *Armeniaca sibirica*, in the Inner Mongolia in China, the approach of nonlinear error-in-variable simultaneous equations was used to establish compatible above- and below-ground biomass models and root-to-shoot ratio model. **Result** The results are as follows: 1. The determination coefficients of above-ground biomass models based on canopy area and amount of stem (or mean height of stem) were higher than 0.67, but those of below-ground biomass models were relatively lower, and that for *A. sibirica* was only 0.36. 2.

收稿日期:2014-08-28

基金项目:国家林业局财政预算项目“森林资源清查与动态监测”(2030208)。

作者简介:曾伟生(1966—),男,湖南涟源人,博士,教授级高工,主要从事森林资源监测与林业数表研制工作。E-mail:zengweisheng@sohu.com

The mean prediction precisions of above- and below-ground biomass models for the two species were above 80% , and that of whole biomass model for *A. sibirica* was above 86% while that for *C. korshinskii* was above 92% .

Conclusion It could be concluded that for tufty shrub species without obvious trunk , the canopy area was the most important factor related to shrub biomass , whether above- or below-ground biomass modeling , and the next was the amount or mean height of stems ; the effective approach to solve the problem of incompatibility among different biomass was using nonlinear error-in-variable simultaneous equations to develop compatible above- and below-ground biomass models and root-to-shoot ratio model ; and the biomass models developed here could be applied in shrub biomass estimation for the two species in the Inner Mongolia .

Key words : above-ground biomass ; below-ground biomass ; root-to-shoot ratio ; compatibility ; prediction precision ; *Caragana korshinskii* ; *Armeniaca sibirica*

灌木林是自然界中广泛存在的一种重要的陆地生态系统类型。在森林生态系统的演替过程中,灌木林既可以是一种过渡类型,也可以是一种顶极类型。我国的灌木林分布广、面积大。根据最新的第八次全国森林资源清查结果,我国灌木林面积 5 590 万 hm^2 , 占林地面积的 18%^[1]。在乔木树种难以适应的高山、湿地、干旱、荒漠地区,灌木林常能形成稳定的群落,具有显著的生态防护效益。尤其在生态环境脆弱的干旱、半干旱地区,保护和发展灌木林资源,对改善生态环境、促进经济发展具有重要意义。

长期以来,因灌木林与乔木林相比所占比例较小,处于次要地位而较少受到重视,关于灌木林生物量的研究国内外报道相对也较少。国外最早关于灌木生物量的研究可追溯到上世纪 60 年代初^[2-3], 而我国最早的相关文献见于上世纪 80 年代初^[4], 比国外晚了整整 20 年。上世纪 90 年代以后,国内外关于灌木生物量方面的研究逐渐增多^[5-10]。尤其是新世纪以来,灌木林生物量方面的研究也得到了较快发展^[11-28]。陈遐林等研究了太岳林区榛子 (*Corylus heterophylla* Fisch.)、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana* Decne.)、黄刺玫 (*Rosa xanthina* Lindl.) 3 种代表性灌木林类型的生物量 and 生产力, 并建立了总生物量、枝干生物量及叶生物量与基径平方乘高 (D^2H) 之间的回归模型^[11]; Navar 等建立了墨西哥东北部 18 种灌木和整个植被群落的地上生物量模型, 采用似然无关线性回归方法保证了生物量与各分量的可加性^[12]; Lufafa 等对塞内加尔花生盆地的 2 种常见土生灌木 *Guiera senegalensis* 和 *Piliostigma reticulatum* 的生物量进行了研究, 建立了不同年龄的生物量与基径、高度、冠幅和株数之间的回归模型^[18]; 林伟等建立了井冈山自然保护区 12 种常见

灌木的生物量模型, 以地径和高度 2 个形态因子作为自变量^[19]; 黄劲松和邱雪颖建立了帽儿山地区 6 种典型灌木的地上生物量模型, 也以地径和高度作为解释变量^[20]; 赵蓓等对大岗山不同森林类型林下 10 种灌木的生物量进行了研究, 建立了干、枝、叶、根生物量及全株生物量与基径、高度、植冠面积、植冠体积之间的回归模型^[24]; 陈富强等建立了粤东地区林下灌木层 12 个优势种各器官生物量的一元和二元(地径、高度)相对生长方程, 为估算生物量和碳储量提供了依据^[26]; 杨昊天等建立了腾格里沙漠东南缘 4 种灌木的叶、新生枝、老龄枝、地上部分、地下部分和整株生物量与株高和冠幅的复合因子灌木体积之间的预测模型^[27]。综合分析以往的研究, 通常会存在以下问题: 一是样本量普遍较少, 大部分都在 50 以下, 未达到大样本的要求; 二是样本采集比较集中, 基本都是集中在局部范围, 所建模型在大尺度范围内缺乏代表性; 三是以地上生物量模型居多, 即使建立了地下生物量模型, 也几乎都没有考虑与地上生物量的相容性。针对以上问题, 本文以内蒙古自治区常见的 2 个灌木树种柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.) 和山杏 (*Armeniaca sibirica* (L.) Lam.) 为研究对象, 基于大样本的实测生物量数据, 利用非线性误差变量联立方程组方法^[29-30], 同步建立相容性地上生物量模型、地下生物量模型及根茎比模型, 既为相应树种灌木林的生物量估计提供依据, 也为规范灌木生物量建模方法提供参考。

1 数据

本研究所用数据为柠条和山杏的生物量实测数据, 2 个灌木种的样本数量分别为 106 和 82 株。样本采集自内蒙古自治区的主要分布区。其中, 柠条样本采集自呼和浩特、赤峰、乌兰察布、巴彦淖尔和

锡林郭勒5个盟(市)的17个旗(县),山杏样本采集自赤峰、通辽、锡林郭勒、呼伦贝尔和兴安盟5个盟(市)的6个旗(县)。考虑到这2个灌木种都无明显主干,为丛生状(柠条的丛生枝数量平均超过10个,山杏的丛生枝平均也能达到3个以上),为了测量和应用方便,确定的测定因子为植株高度、丛生枝个数和植冠垂直投影面积,其中柠条还调查了植株的年龄。为尽可能增强样本在大尺度范围内的代表性,样株的选取考虑了按植株高度和丛生枝个数的分配。其中,柠条的样本数配置,植株高度1 m以下31株,1.0~1.3 m的40株,1.4 m以上的35株;丛生枝个数10以下36株,11~15的36株,15以上

的34株;山杏的样本数配置,植株高度1.3 m以下23株,1.3~1.5 m的41株,1.5 m以上的18株;丛生枝个数1~2的30株,3~4的24株,5以上的28株。每个样株先调查测量植株高度、丛生枝个数和植冠垂直投影面积,然后与地面齐平将地上部分割(锯)断,测定其鲜质量,并选取代表性样品;地下部分采用全挖法测定全部根系的鲜质量,并选取代表性样品。全部样品带回实验室,在85℃温度下烘干至恒质量得到干质量。根据样品干质量与鲜质量的比值,分别推算样株的地上和地下部分干质量,再汇总得到整株生物量。表1为柠条和山杏生物量实测数据的统计指标。

表1 灌木生物量实测数据的统计指标

树种	样本数	变量	平均值	最小值	最大值	标准差	变动系数/%
柠条	106	植株高度 H/m	1.2	0.4	1.6	0.2	21.05
		丛生枝个数 N	13.8	2.0	32.0	6.5	46.80
		植冠面积 A/m^2	1.05	0.06	3.99	0.71	67.95
		地上生物量 M_a/kg	1.01	0.07	5.68	0.69	62.01
		地下生物量 M_b/kg	1.76	0.09	8.58	1.29	73.11
		根茎比 R	2.33	0.31	7.89	1.49	63.69
山杏	82	植株高度 H/m	1.4	0.3	2.0	0.3	21.16
		丛生枝个数 N	4.5	1.0	35.0	4.4	98.08
		植冠面积 A/m^2	2.84	0.04	22.05	3.57	125.83
		地上生物量 M_a/kg	4.06	0.02	29.22	6.19	152.64
		地下生物量 M_b/kg	4.08	0.01	19.08	4.45	108.86
		根茎比 R	1.89	0.32	7.59	1.61	85.36

2 方法

从已有的灌木生物量建模研究成果看,所建灌木生物量模型包括线性模型、对数模型、相对生长模型和多项式模型等。由于线性模型(多项式模型也是线性模型的一种)参数的正负及取值大小难以作出合理解释,相对生长模型的应用最为广泛^[9,11-12,18,20,26],其通用结构形式为:

$$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \cdots x_j^{\beta_j} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: y 为生物量; x_j 为植株高度、丛生枝个数和植冠面积等反映灌木特征的变量; β_j 为参数; ε 为误差项。由于灌木生物量数据均存在明显的异方差性,参数估计时必须采取消除异方差的措施。对数转换是消除异方差的有效手段,形如(1)式的相对生长模型通过对数转换变成线性模型后,即可采用普通线性回归方法求解。消除异方差的另一方法是采用加权回归方法^[31],其中的特定权函数利用普通回归估计的残差推导得来。利用柠条和山杏的地上生物量与地下生物量数据按模型(1)进行拟合发

现,植冠面积是最主要的影响因子,而植株高度和丛生枝个数的影响各不相同,柠条生物量受植株高度的影响很小,而山杏生物量受丛生枝个数的影响很小。柠条和山杏生物量的相对生长模型分别确定为:

$$M = \beta_0 A^{\beta_1} N^{\beta_2} + \varepsilon \quad (2)$$

$$M = \beta_0 A^{\beta_1} H^{\beta_2} + \varepsilon \quad (3)$$

式中: M 为地上或地下生物量(kg), A 为植冠面积(m^2), N 为丛生枝个数, H 为植株高度(m)。

2.1 相容性模型

利用非线性误差变量联立方程组,来建立以下形式的相容性地上与地下生物量模型:

$$\begin{cases} M_a = a_0 A^{a_1} X^{a_2} + \varepsilon_1 \\ M_b = b_0 A^{b_1} X^{b_2} + \varepsilon_2 = c_0 A^{c_1} X^{c_2} \cdot M_a + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: M_a 和 M_b 分别为地上和地下生物量,属于误差变量; A 为植冠面积, X 为丛生枝个数 N (柠条)或植株高度 H (山杏),视为无误差变量; a_i, b_i, c_i 为参数, ε_i 为误差。式(4)除包含地上和地下生物量模型以外,还包含了以下根茎比(R_s)模型:

$$R_s = M_b/M_a = c_0 A^{c_1} X^{c_2} + \varepsilon_3 \quad (5)$$

式(5)与式(4)之间的参数存在以下关系:

$$c_0 = \frac{b_0}{a_0}, c_1 = b_1 - a_1, c_2 = b_2 - a_2 \quad (6)$$

在上述式(4)~(6)中,如果 a_2, b_2 和 c_2 均取 0,即在公式中去掉与 X 相关的乘积项,就变成了基于植冠面积的一元模型。

2.2 模型评价

生物量模型的评价指标很多。曾伟生和唐守正^[32]在研究立木生物量建模时针对模型评价问题,对评价指标进行了专题分析,提出采用确定系数 (R^2)、估计值的标准差 (SEE)、平均预估误差 (MPE)、总相对误差 (TRE)、平均系统误差 (MSE) 和平均百分标准误差 ($MPSE$) 6 项指标来综合评估生物量模型。本文拟采用其中的 4 项指标 R^2 、 SEE 、 TRE 和 MPE ,具体计算公式参见文献^[32]。除此之外,还要求模型参数稳定(参数估计值与 0 有显著差异),残差分布随机。

3 结果

3.1 柠条生物量模型

根据初步拟合结果,柠条的地上和地下生物量的主要影响因子是植冠面积,其次是从生枝个数,而植株高度的影响在统计上不显著。利用 ForStat 软件的非线性误差变量联立方程组方法^[28],求解形如(4)式的联立方程组,得到以下相容性模型:

$$\begin{cases} \hat{M}_a = 0.6087A^{0.9233}N^{0.2145} \\ (R^2 = 0.6950, SEE = 0.57, \\ TRE = -0.02\%, MPE = 9.85\%) \\ \hat{M}_b = 1.0481A^{0.6278}N^{0.2145} (R^2 = 0.4824, \\ SEE = 0.98, TRE = -0.43\%, MPE = 10.76\%) \end{cases} \quad (7)$$

与(7)式相对应的根茎比模型为:

$$R_s = 1.7218A^{-0.2955} \quad (8)$$

以上 2 式是联立方程组联合估计的结果,其中地上生物量和地下生物量模型中从生枝个数 N 的指数相同,是因为根茎比模型中该指数接近于 0,从而人为设定(4)式中的 $a_2 = b_2$,保证(5)式中的 $c_2 = 0$ 。

从(7)式看,地上生物量和地下生物量模型的总相对误差 TRE 均接近于 0,平均预估误差 MPE 在 10% 上下,从而保证其预估精度达到了 90% 左右。按照和的误差传播公式进行计算,柠条全株生物量的平均预估误差约为 7.89%,预估精度达到

92.11%。

通过残差分析知,地上生物量和地下生物量的残差和相对残差与植冠面积和丛生枝个数之间的分布是基本随机的。限于篇幅,仅给出地上生物量的相对残差 Re 与植冠面积 A 和丛生枝个数 N 之间的分布图,见图 1 和图 2。

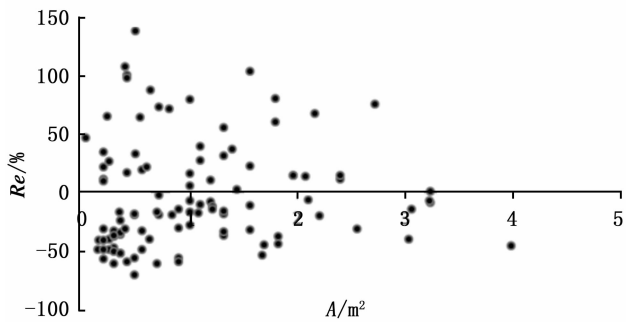


图 1 柠条地上生物量相对残差 Re 随植冠面积 A 的分布

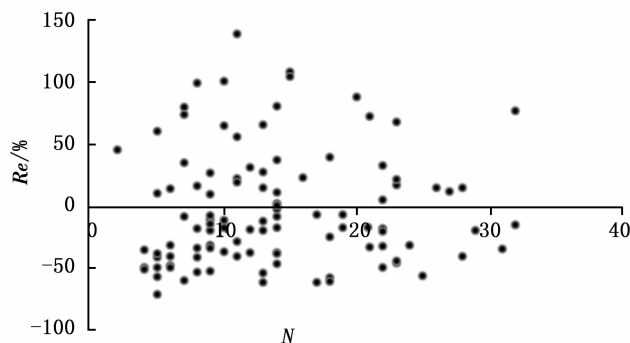


图 2 柠条地上生物量相对残差 Re 随丛生枝个数 N 的分布

3.2 山杏生物量模型

山杏的地上和地下生物量的主要影响因子也是植冠面积,其次是植株高度,而从生枝个数的影响在统计上不显著。利用 ForStat 软件的非线性误差变量联立方程组方法,求解形如(4)式的联立方程组,得到以下相容性模型:

$$\begin{cases} \hat{M}_a = 1.6518A^{1.0817}H^{-0.6523} (R^2 = 0.6718, \\ SEE = 3.59, TRE = -3.13\%, MPE = 19.46\%) \\ \hat{M}_b = 2.5807A^{0.7332}H^{-0.3510} (R^2 = 0.3636, \\ SEE = 3.59, TRE = -4.93\%, MPE = 19.32\%) \end{cases} \quad (9)$$

与(9)式相对应的根茎比模型为:

$$R_s = 1.5624A^{-0.3485}H^{0.3013} \quad (10)$$

以上 2 式是联立方程组联合估计的结果。从(9)式看,地上生物量和地下生物量模型的总相对误差 TRE 均在 $\pm 5\%$ 以内,平均预估误差 MPE 都未超过 20%,从而保证其平均预估精度达到了 80% 以

上。两个模型的确定系数 R^2 相差很大,但平均预估误差 MPE 非常接近,主要是因为山杏地下生物量的变动系数要小于地上生物量。与柠条生物量模型(7)相比,山杏样本量减少不多,但预估精度下降较多,主要是山杏生物量的变动系数要显著大于柠条(见表1)。因此,在同等精度要求下,样本量的多少主要取决于各种灌木生物量的变动系数大小。按照和的误差传播公式进行计算,山杏全株生物量的平均预估误差约为13.71%,平均预估精度达到86.29%。

通过残差分析知,地上生物量和地下生物量的残差和相对残差与植冠面积和植株高度之间也大体呈随机分布,限于篇幅,残差图略。

4 结论

本研究以内蒙古自治区的2种常见灌木柠条和山杏为研究对象,基于大样本的实测生物量数据,利用非线性误差变量联立方程组方法,建立了相容性地上生物量、地下生物量和根茎比模型。根据前述研究结果,能得出以下主要结论:

(1)对于无明显主干的丛生状灌木,不论是地上生物量还是地下生物量,植冠投影面积是首要的相关因子,其次才是丛生枝个数和植株高度。基于植冠投影面积和丛生枝个数(或植株高度)的二元地上生物量模型,其确定系数 R^2 可达到0.67以上,但地下生物量模型的确定系数要明显低些,最小的仅达到0.36。

(2)利用非线性误差变量联立方程组方法,能有效解决地上生物量与地下生物量的相容性问题,同步建立地上生物量模型及其相容的地下生物量模型和根茎比模型。如果将地上生物量再分解为干、枝、叶生物量,则还可一并建立包含各分量的可加性方程组。

(3)本研究所建的2种灌木的生物量模型,柠条地上生物量和地下生物量的平均预估精度均能达到90%左右,全株生物量的平均预估精度能达到92%以上;山杏地上生物量和地下生物量的平均预估精度均能达到80%以上,全株生物量的平均预估精度能达到86%以上,完全可以应用于内蒙古自治区范围内柠条和山杏的生物量估计。

本研究除了建立上述2个灌木种的生物量模型,另一个主要目的是探索灌木生物量调查建模的技术方法。从建模结果分析,山杏生物量模型的预

估精度之所以明显低于柠条,除了样本量较少有所影响外,样本构成也是重要的影响因素之一。山杏的建模样本按测定因子(或解释变量)的分布结构没有柠条理想,这应该是造成其变动系数偏大的重要原因。另外,本研究只考虑了单株生物量的建模,没有考虑林分水平生物量模型的构建。从方便大范围应用的角度考虑,建立与灌木覆盖度和平均高度等特征因子之间的灌木林生物量模型是必要的,这有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 国家林业局. 中国森林资源报告(2009-2013)[M]. 北京:中国林业出版社,2014.
- [2] Whittaker R H. Estimation of net primary production of forest and shrub communities[J]. Ecology, 1961, 42: 177-180.
- [3] Whittaker R H. Net production relations of shrubs in the Great Smoky Mountains[J]. Ecology, 1962, 43: 357-377.
- [4] 姜凤歧,卢风勇. 小叶锦鸡儿灌丛地上生物量的预测模型[J]. 生态学报, 1982, 2(2): 103-110.
- [5] Singh A, Madan M, Vasudevan P. Estimation of the aerial biomass of weedy shrubs by regression methods: studies on *Adhatoda vasica* [J]. Forest Ecology and Management, 1990, 32(2-4): 167-172.
- [6] 于九如,韦少敏,朱灵益,等. 4种灌木树种生物量的估测[J]. 林业科技通讯,1993(10): 11-12.
- [7] Haase P, Haase R. Aboveground biomass estimates for invasive trees and shrubs in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil[J]. Forest Ecology and Management, 1995, 73(1-3): 29-35.
- [8] 何方,王义强,吕芳德,等. 油茶林生物量与养分生物循环的研究[J]. 林业科学, 1996, 32(5): 403-410.
- [9] 李钢铁,秦富仓,贾守义,等. 旱生灌木生物量预测模型的研究[J]. 内蒙古林学院学报:自然科学版, 1998(2): 24-31.
- [10] Rosenschein A, Tietema T, Hall D O. Biomass measurement and monitoring of trees and shrubs in a semi-arid region of central Kenya [J]. Journal of Arid Environments, 1999, 42(2): 97-116.
- [11] 陈遐林,马钦彦,康峰峰,等. 山西太岳山典型灌木林生物量及生产力研究[J]. 林业科学研究,2002,15(3): 304-309.
- [12] Návár J, Méndez E, Nájera A, et al. Biomass equations for shrub species of *Tamaulipan thornscrub* of North-eastern Mexico [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59(4): 657-674.
- [13] 王蕾,张宏,哈斯,等. 基于冠幅直径和植株高度的灌木地上生物量估测方法研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2004, 40(5): 700-704.
- [14] Foroughbakhch R, Reyes G, Alvarado-Vázquez M A, et al. Use of quantitative methods to determine leaf biomass on 15 woody shrub species in northeastern Mexico [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 216: 359-366.
- [15] 蔡哲,刘琪璟,欧阳球林. 千烟洲试验区几种灌木生物量估测模型的研究[J]. 中南林学院学报,2006,26(3): 15-18.

- [16] 曾慧卿,刘琪璟,冯宗炜,等. 红壤丘陵区林下灌木生物量估算模型的建立及其应用[J]. 应用生态学报,2007,18(10):2185-2190.
- [17] Castro H, Freitas H. Aboveground biomass and productivity in the Montado: from herbaceous to shrub dominated communities[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(4-5): 506-511.
- [18] Lufafa A, Diédhiou I, Ndiaye N A S, et al. Allometric relationships and peak-season community biomass stocks of native shrubs in Senegal's Peanut Basin[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(3): 260-266.
- [19] 林 伟,李俊生,郑博福,等. 井冈山自然保护区12种常见灌木生物量的估测模型[J]. 武汉植物学研究,2010,28(6):725-729.
- [20] 黄劲松,邸雪颖. 帽儿山地区6种灌木地上生物量估算模型[J]. 东北林业大学学报,2011,39(5):54-57.
- [21] 何列艳,亢新刚,范小莉,等. 长白山区临夏主要灌木生物量估算与分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(5):45-50.
- [22] Estornell J, Ruiz L A, Velázquez-Martí B, et al. Estimation of shrub biomass by airborne LiDAR data in small forest stands[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(9):1697-1703.
- [23] Estornell J, Ruiz L A, Velázquez-Martí B, et al. Estimation of biomass and volume of shrub vegetation using LiDAR and spectral data in a Mediterranean environment [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 46:710-721.
- [24] 赵 蓓,郭泉水,牛树奎,等. 大岗山灌木生物量模型研究[J]. 东北林业大学学报,2012,40(9):28-33.
- [25] Giday K, Eshete G, Barklund P, et al. Wood biomass functions for *Acacia abyssinica* trees and shrubs and implications for provision of ecosystem services in a community managed enclosure in Tigray, Ethiopia[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 94: 83-86.
- [26] 陈富强,罗 勇,李清湖. 粤东地区森林灌木层优势植物生物量估算模型[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(2):5-11.
- [27] 杨昊天,李新荣,王增如,等. 腾格里沙漠东南缘4种灌木的生物量预测模型[J]. 中国沙漠,2013,33(6):1699-1704.
- [28] 曾伟生. 国内外灌木生物量模型研究综述[J]. 世界林业研究,2015,28(1):31-36.
- [29] 唐守正,郎奎建,李海奎. 统计和生物数学模型计算(ForStat教程)[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [30] Zeng W S, Tang S Z. Modeling compatible single-tree aboveground biomass equations of Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China[J]. Journal of Forestry Research, 2012, 23(4): 593-598. doi: 10.1007/s11676-012-0299-4.
- [31] 曾伟生,唐守正. 非线性模型对数回归的偏差校正及与加权回归的对比分析[J]. 林业科学研究,2011,24(2):137-143.
- [32] 曾伟生,唐守正. 立木生物量模型的优度评价和精度分析[J]. 林业科学,2011,47(11):106-113.