

红壤丘陵区林下灌木生物量估算模型的建立及其应用*

曾慧卿^{1,3,4} 刘琪^{2**} 冯宗炜¹ 马泽清² 胡理乐⁵

(¹中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085; ²中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101; ³中国科学院研究生院,北京 100049; ⁴南昌大学环境科学与工程学院,南昌 330029; ⁵中国科学院沈阳应用生态研究所,沈阳 110016)

摘要 以中国科学院千烟洲生态试验站林下常见的 16种物种作为研究对象,构建了单一物种以植冠面积 (A_c) 为变量的二次方程和以植冠投影体积 (V_c) 为变量的乘幂方程来估算物种生物量,以及 16种物种的混合模型来估算其生物量,并将最佳生物量估算模型应用于不同森林内灌木层生物量的估计. 不同森林的灌木层生物量组成存在较大差异. 以物种单一模型计算的落叶阔叶林、次生林、人工针叶林灌木层的生物量分别为 $4\ 773$ 、 $3\ 175$ 和 $733\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 以物种混合模型估算的结果略低于单一模型,分别为 $3\ 946$ 、 $2\ 772$ 和 $840\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 混合模型在未能对所有物种建立单一模型的情况下估算灌木层生物量时,具有简便、实用性的特点.

关键词 灌木层 生物量 回归方程 红壤丘陵区

文章编号 1001-9332(2007)10-2185-06 **中图分类号** S718.55, S792.39 **文献标识码** A

Estimation models of understory shrub biomass and their applications in red soil hilly region. ZENG Hui-qing^{1,3,4}, LIU Qi-jing², FENG Zong-wei¹, MA Ze-qing², HU Li-le⁵ (¹State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴College of Environmental Science and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China; ⁵Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(10): 2185-2190.

Abstract: With 16 familiar species of understory shrub at Qianyezhou ecological experimental station in red soil hilly region under Chinese Academy of Sciences as test objects, crown area (A_c) and projected volume (V_c) were used as the variables for building quadratic and power allometric equations, respectively, to estimate the biomass of individual populations, and mixed model was used to estimate the biomass of the 16 species. The best-fit models were applied to estimate the biomass of understory shrub in different forest types. The results showed that the biomass of shrub layer varied significantly among different stand types. With species-specific models, the biomass in deciduous, secondary, and coniferous forests was estimated as $4\ 773$, $3\ 175$ and $733\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively; while with mixed model, the estimation result was a little lower, being $3\ 946$, $2\ 772$ and $840\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Under the conditions of species-specific models being not established, mixed model was more convenient and practical in estimating the biomass of understory shrub.

Key words: shrub layer; biomass; allometric equation; red soil hilly region

*国家重点基础研究发展规划项目(2002CB4125)、科技部国际合作项目(2006DFB91920)和中国科学院资源与环境科学管理局生态野外台站基金资助项目.

**通讯作者. E-mail: liuqijing@gmail.com

2006-12-22收稿, 2007-07-16接受.

1 引言

中国科学院千烟洲生态试验站(简称千烟洲站)位于我国亚热带红壤丘陵区.建站前,由于长期的人为干扰等不合理利用,森林植被已破坏殆尽,以草丛为主,伴有少量灌丛^[18].自1983年建站至今,经过20多年的综合开发治理,森林覆盖率显著增加,植被类型由原来的荒草坡变成茂密的森林,林下灌木层发育良好.林下灌木层不仅对红壤丘陵的水土保持起着重要作用,也为探讨红壤丘陵区退化植被的恢复重建提供了良好的研究基地.然而,目前关于红壤丘陵区灌丛的研究报道较少^[6-7,19-22],尤其是林下灌木层在碳蓄积中贡献的研究未见报道.因此,研究林下灌木的生物学特性,揭示灌木在碳循环中的功能,对于进一步开展红壤丘陵区生态恢复具有重要意义.生物量是整个生态系统运行的能量基础,是群落结构和功能的主要指标之一,也是生态系统生产力的重要组成部分^[2,11].对生物量的测定是深入研究许多林业和生态问题的重要基础.近年来,如何准确测定森林生物量、降低碳蓄积估算的不确定性格外受到关注^[15-17].本研究从生物量模型入手,阐述灌木层种群的物质结构特征,并基于千烟洲站2003年大量野外调查的基础数据,建立了红壤丘陵区分布比较广泛的林下灌木层树种单一模型和混合模型,并将模型用于不同森林内灌木层生物量的估算,为评价红壤丘陵区灌丛植被的生态功能、保护生物多样性和恢复重建植被提供科学依据.

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

千烟洲站位于江西省泰和县境内(26°44'48"N, 115°04'13"E),具有典型亚热带季风气候特征.根据千烟洲站1985—2004年气象资料,该地区年平均降水量1487 mm,年平均气温18.0℃,活动积温6523℃·h,10℃活动积温6015℃·h,年均日照时数1406 h,年均日照百分率43%,年均太阳总辐射量4349 MJ·m⁻²,无霜期323 d.站内平均海拔多在100 m左右,相对高度20~50 m,属典型的红壤丘陵地貌.地带性土壤为红壤,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物.千烟洲站植被主要为人工林或草、灌次生植被,以人工林为主.

2.2 研究方法

2.2.1 数据获取 采用样方法于2003年8月在千烟洲站进行野外调查,样方面积为2 m × 2 m,样方

总数为44.测量内容:高度(H , cm)、冠幅(C , cm)(平均冠幅为长短径之均值),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,根系迅速洗净称其鲜质量,然后在80℃通风干燥箱内烘干48 h至恒量,计算含水率及全株生物量(W , g).

2.2.2 数据处理 选用常见的16种灌木(含乔木树种幼树)进行生物量建模,建模方程为:

$$W = a + bA_c + cA_c^2 \quad (1)$$

$$W = aV_c^b \quad (2)$$

式中: W 为样本生物量(干质量); A_c 为植冠面积($A_c = C^2/4, m^2$); V_c 为植冠投影体积($V_c = A_c \times H, m^3$).建模分为:单一物种的独立建模(建立单一物种生物量与 A_c 、 V_c 的回归方程)和多个物种的混合建模(建立多个物种生物量与 A_c 、 V_c 的回归方程)两类.回归方程均进行“ t 检验($P < 0.05$).分析计算采用SPSS 10.0软件^[5].16种常见物种的重要值^[7]和生物量模型自变量范围见表1.

用判定系数(R^2)和标准误(SE)的大小及回归检验显著水平($P < 0.001$)来评价方程的优劣,选出拟合度最好、相关最密切的数学模型来估算物种生物量,并对单一模型和混合模型进行比较.在进行乘幂方程与二次方程最佳模型选择时,选用标准误修正因子(CF)^[13]和适合指数(FI)^[11]来替代对数方程的SE和 R^2 值作为模型优劣的判断指标.当乘幂方程的FI值接近二次方程的 R^2 值时,选择乘幂方程为最佳估测模型.计算公式如下:

$$CF = \exp(S_{y,x}^2/2) \quad (3)$$

$$SE = \frac{((Y_i - Y_i)^2 / (n - k))^{1/2}}{\bar{Y}} \quad (4)$$

$$FI = 1 - \left[\frac{(Y_i - Y_i)^2}{(Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right] \quad (5)$$

式中: y 是因变量(干质量); x 是自变量; $S_{y,x}^2$ 是方程 $\ln y = \ln a + b \ln x$ 的标准误(SE),其计算公式见方程(4); Y_i 是第 i 个物种的生物量观测值; Y_i 、 \bar{Y}_i 是第 i 个物种生物量的预测值和平均值; n 是第 i 个物种的观测个数; k 是自由度.

模型建立后,将单一模型与混合模型应用于红壤丘陵区落叶阔叶林、次生林、人工针叶林林下灌木层的生物量研究,分析不同森林内灌木层生物量的大小及其物种组成情况,并对两类模型结果进行差异性检验(配对样本 t 检验, $P < 0.05$).不同林分下灌木样方数均为3组,每组5个2 m × 2 m样方.

3 结果与分析

3.1 灌木物种生物量最佳模型

以方程(1)、(2)对物种生物量进行回归分析,选出各物种的最佳估算模型及多物种的最佳混合模型(表2)。从中可以看出,对于单一物种来说,不同物种的最佳估算模型的方程类型是不同的。栀子(*Gardenia jasminoides*)、满树星(*Ilex aculeolata*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、山莓(*Rubus corchorifolius*)、长托菝葜(*Smilax ferox*)、白檀(*Symplocos paniculata*)和牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)的最佳估算模型类型为方程(1),并且模型有较高的 R^2 值($R^2 > 0.70$)和较小的SE值,回归关系显著(F 检验);四川红淡比(*Adinandra bockiana*)、格药铃(*Eurya muricata*)、木

(*Loropetalum chinense*)、白栎(*Rhododendron simsii*)、杜鹃(*Quercus fabri*)、山矾(*Symplocos chinensis*)、三叶赤楠(*Syzygium grijsii*)、乌饭树(*Vaccinium bracteatum*)的最佳估算模型类型为方程(2)。对于混合模型,最佳估算模型类型为方程(2),并通过统计检验,且相关关系显著。

由表2可以看出,无论是单一模型还是混合模

表1 供试种群的基本参数

Tab 1 General parameters of the test plant populations

序号 Code	物种 Species	重要值 ^[7] Importance value	样本数 No of sample	高度 H (cm)		冠幅 C (cm)	
				平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD
1	四川红淡比 <i>Adinandra bockiana</i>	2.1	20	88.70	60.22	56.33	29.35
2	格药铃 <i>Eurya muricata</i>	2.2	19	149.58	90.30	93.32	53.66
3	栀子 <i>Gardenia jasminoides</i>	1.6	33	70.31	54.22	37.23	28.90
4	满树星 <i>Ilex aculeolata</i>	2.3	26	78.11	23.33	55.92	28.92
5	美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i>	2.8	23	47.13	21.66	26.39	11.01
6	木 <i>Loropetalum chinense</i>	10.8	56	141.64	77.77	64.48	39.45
7	白栎 <i>Quercus fabri</i> **	8.3	34	162.41	75.36	66.94	41.63
8	杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	0.6	13	173.62	69.68	51.42	34.41
9	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	3.2	18	79.41	88.66	62.29	46.10
10	山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	4.2	26	48.68	21.05	39.19	22.43
11	长托菝葜 <i>Smilax ferox</i>	2.9	32	38.20	12.80	28.30	12.06
12	山矾 <i>Symplocos chinensis</i> **	-	24	81.38	49.28	51.44	43.16
13	白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	2.8	19	49.42	22.22	47.34	22.89
14	三叶赤楠 <i>Syzygium grijsii</i>	1.0	21	61.00	21.36	98.62	49.08
15	乌饭树 <i>Vaccinium bracteatum</i>	4.2	13	181.31	67.77	46.91	16.70
16	牡荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i>	3.5	35	87.23	28.88	32.03	17.27

* **乔木树种,但在研究地点多数为灌木状,故和其他灌木同样处理 Arbor species The data of arbor species were deal with as the same to shrub species because arbor species in study region were shrub-like type

表2 16物种最佳单一模型和混合模型

Tab 2 Best-fit models for specific species and mixed species

序号 Code	物种 Species	方程 Equation	a	b	c	CF	R^2	FI	SE
1	四川红淡比 <i>A. bockiana</i>	$W = aV_c^b$	287.598	0.888	-	1.222	0.849**	0.671	0.633
2	格药铃 <i>E. muricata</i>	$W = aV_c^b$	166.050	0.773	-	1.178	0.885**	0.932	0.572
3	栀子 <i>G. jasminoides</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	1.888	73.454	144.254	-	0.996**	0.996	7.171
4	满树星 <i>I. aculeolata</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	10.658	15.652	170.237	-	0.904**	0.904	16.026
5	美丽胡枝子 <i>L. formosa</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	2.170	9.462	266.309	-	0.825**	0.825	2.161
6	木 <i>L. chinense</i>	$W = aV_c^b$	141.660	0.689	-	1.207	0.848**	0.762	0.613
7	白栎 <i>Q. fabri</i>	$W = aV_c^b$	590.603	0.797	-	1.367	0.794**	0.531	0.791
8	杜鹃 <i>R. simsii</i>	$W = aV_c^b$	195.326	0.714	-	1.388	0.703**	0.524	0.810
9	盐肤木 <i>R. chinensis</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	3.493	74.514	41.635	-	0.999**	0.999	11.055
10	山莓 <i>R. corchorifolius</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	4.133	33.846	0.908	-	0.740**	0.740	4.165
11	长托菝葜 <i>S. ferox</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	3.209	58.633	127.311	-	0.789**	0.789	3.324
12	山矾 <i>S. chinensis</i>	$W = aV_c^b$	96.086	0.745	-	1.158	0.895**	0.810	0.538
13	白檀 <i>S. paniculata</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	2.736	56.085	119.763	-	0.933**	0.933	9.377
14	三叶赤楠 <i>S. grijsii</i>	$W = aV_c^b$	218.475	0.900	-	1.113	0.830**	0.833	0.463
15	乌饭树 <i>V. bracteatum</i>	$W = aV_c^b$	264.773	0.748	-	1.268	0.729**	0.645	0.689
16	牡荆 <i>V. negundo</i> var. <i>cannabifolia</i>	$W = a + bA_c + cA_c^2$	3.481	156.458	14.630	-	0.848**	0.848	7.526
	混合物种模型 Mixed-species model (total)	$W = aV_c^b$	165.515	0.817	-	1.360	0.807**	0.715	0.784

** $P < 0.001$.

型,其生物量最佳估测模型均有较高的 R^2 值和较小的 SE 值, R^2 值的范围在 0.703(杜鹃)~0.999(盐肤木)之间.混合模型的 R^2 值为 0.807,高于白栎、杜鹃、山莓、长托菝葜和乌饭树等物种单一模型的 R^2 值.由此可见,对于大部分物种而言,单一模型的估测精度高于混合模型,只有小部分物种的混合模型优于单一模型.

3.2 生物量模型在林下灌木层研究中的应用

将表 2 中物种生物量最佳估测模型(单一模型和混合模型)应用于红壤丘陵区人工针叶林(AF)、落叶阔叶林(DF)和次生林(SF)3种不同森林内灌木层进行生物量估算(表 3).结果表明:林下灌木层近 30 种的物种均为亚热带森林灌丛较常见物种.格药铃、木、白栎、杜鹃和乌饭树等物种分布于灌木层的高层,美丽胡枝子、山莓和长托菝葜等物种分布于灌木层的低层.不同森林内灌木层的物种分布有一定的差异,四川红淡比、格药铃、木、白栎、长托菝葜和乌饭树等物种在 3 种森林内均有分布;山矾分布于落叶阔叶林内;满树星、白檀等物种分布于人工针叶林内.

表 3 3种森林基本情况表

森林类型 Forest type	森林密度 Forest density (trees · hm ⁻²)	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均树高 Mean height (m)
AF	1632	18.70	13.10
DF	2425	8.76	7.48
SF	933	13.20	8.20

AF: 人工针叶林 Artificial coniferous forest; DF: 落叶阔叶林 Deciduous broadleaved forest; SF: 次生林 Secondary forest 下同 The same below.

单一模型与混合模型生物量估计值的配对样本 t 检验 $P = 0.088 > 0.05$,说明 2 类模型对生物量的估测没有明显差异. AF、DF、SF 灌木层生物量之间具有较大差异(表 4).以单一模型估算的生物量为例,其生物量在 316 ~ 6 031 kg · hm⁻², AF、DF、SF 灌木层生物量的平均值分别为 733、4 773 和 3 175 kg · hm⁻².单一模型和混合模型对灌木层生物量的估算结果表明,3 种森林内灌木层生物量平均值相差 12.69% ~ 17.33%,与前人的研究相比(误差范围在 10% ~ 30%)^[12],本研究的误差范围较小,说明在精度允许的范围内,混合模型在林下灌木层生物量的研究能够满足要求.

不同森林内灌木层物种生物量的组成情况见图 1.白栎生物量对 SF 灌木层生物量的贡献率最高,为 73.86%,在 DF 和 AF 中分别占 26.3% 和 39.2%.

表 4 单一模型和混合模型估算不同森林内灌木层生物量
Tab 4 Biomass of shrub layer estimated with specific-species and mixed-species allometric equations in three forests

森林类型 Forest type	样方代码 Plot code	生物量 Biomass (kg · hm ⁻²)	
		单一模型 Single model	混合模型 Mixed model
AF	1	1 075	1 162
AF	2	316	347
AF	3	981	801
AF	Mean	733	840
DF	4	2 453	2 487
DF	5	5 808	3 879
DF	6	6 031	5 361
DF	Mean	4 773	3 946
SF	7	4 111	4 138
SF	8	3 180	2 265
SF	9	2 233	1 888
SF	Mean	3 175	2 772

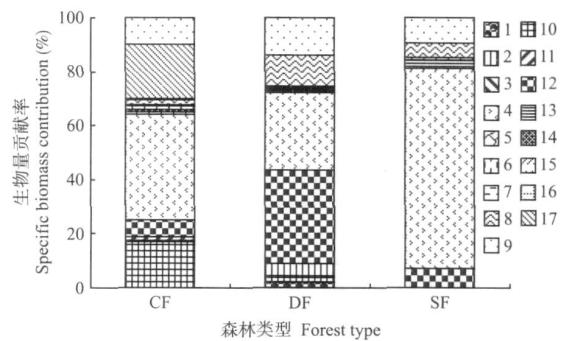


图 1 不同森林灌木层生物量组成

Fig 1 Biomass proportions of shrub layer in three forests
AF: 人工针叶林 Artificial coniferous forest; DF: 落叶阔叶林 Deciduous broadleaved forest; SF: 次生林 Secondary forest 1)四川红淡比 *A. bockiana*; 2)格药铃 *E. muricata*; 3)椴树 *G. jussinoidea*; 4)满树星 *I. aculeolata*; 5)美丽胡枝子 *L. formosa*; 6)木 *L. chinense*; 7)白栎 *Q. fabri*; 8)杜鹃 *R. simsii*; 9)盐肤木 *R. chinensis*; 10)山莓 *R. corchorifolius*; 11)长托菝葜 *S. ferox*; 12)山矾 *S. chinensis*; 13)白檀 *S. paniculata*; 14)三叶赤楠 *S. grijsii*; 15)乌饭树 *V. bracteatum*; 16)牡荆 *V. negundo* var. *cannabifolia*; 17)其他物种 Others

木对 DF 灌木层生物量贡献率为 31.1%,在 SF、AF 中贡献率分别为 7.05% 和 6.28%.在 DF 中,几种主要物种的生物量贡献率之间虽然没有太大的差异,木、乌饭树、白栎生物量贡献率分别为 31.1%、10.98% 和 26.3%,但 3 个物种的贡献率之和接近 70%.在 AF 中,牡荆、格药铃、白栎生物量贡献率分别为 20.34%、17.08%、39.20%,其贡献率之和超过了 75%.可见,不同森林内灌木层生物量的贡献率存在着比较大的差异.此外,在 3 种不同森林中,木和白栎为林下灌木层的优势树种.

4 讨 论

为探索林下灌木层种群的物质结构特征,揭示灌木在碳循环中的功能,本研究建立了干烟洲 16种灌木树种单一和混合生物量模型,并估算了该区不同森林类型灌木层生物量。结果表明,以 A_c 为变量的二次方程是栀子等 8种物种生物量的最佳方程类型,引入 H 变量建立的以 V_c 为变量的乘幂方程是四川红淡比等 8种物种生物量的最佳方程类型;同时,乘幂方程亦是 16种物种混合模型的最佳方程类型。各物种生物量最佳估算模型均有较高的 R^2 值,并且 R^2 值的范围与国内外其他物种模型的 R^2 值范围一致^[4,12,14]。将单一模型和混合模型应用于不同森林类型灌木层生物量的估算,生物量从大到小依次为落叶阔叶林、次生林、人工针叶林,并且不同森林内灌木层生物量的贡献率存在较大差异。

对于生物量估测参数的选择,有研究认为主要与植物自身形态关系密切^[10]。较为矮小的多分枝树种、形态类似于藤本的物种及高度年际生长较小的树种,以冠幅直径或冠幅面积为变量来估算生物量可行并具较高的精度^[3-4]。 H 变量的引入在乔木的生物量估算研究中应用得较多^[8-9],而对于白栎、山矾等乔木树种和四川红淡比等灌木树种的形态更接近于圆柱形,其生长并不只是表现在冠幅的横向生长,还包括纵向树高的生长,因此,采用冠幅直径和植株高度复合因子 V_c 为变量估算其生物量精度较高。显然,选择方程时必须考虑植株形态。此外,对于林下灌木层和草本层密度较大、凋落物、地被物较厚的地区,测定树高和冠幅比测定地径及其他因子更简便、省时、省力^[20]。从实用性、简便性综合考虑估测参数的选择,采用冠幅直径和植株高度复合因子作为变量来估测生物量是行之有效的。

通常认为,物种的单一生物量模型优于物种的混合模型^[12],但从本研究来看,单一模型并不总是优于混合模型。从模型的 R^2 值来判断,白栎、山莓和乌饭树等树种的混合模型优于单一模型。以单一模型估算不同森林内灌木层生物量分别为 4 773 (DF)、3 175 (SF)和 733 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (AF)。混合模型与单一模型估算灌木层生物量平均值相差在 12.69% ~ 17.33%之间,混合模型在精度允许的范围内对灌木层生物量的估算具有简便性和实用性等优点,尤其是在未能对所有树种一一建立单一模型的情况下获取灌木层生物量时显得更为有效,可应用于亚热带森林灌木层生物量的估算。

灌木层物种的生长状况因其立地条件存在一定的差异,可能出现同物种在不同立地条件下的估算模型不同。因此,在研究区外应用本文建立的回归估算模型时需进一步进行验证,对于 A_c 和 H 超过本文研究中的相应最大值,即进行变量的外推时 also 需做进一步的验证。

致谢 承蒙干烟洲站和蔡哲、李轩然、曾珍英、张海清等同学对本研究给予帮助。

参考文献

- [1] Crow TR, Schlaegel BE. 1988. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. *Northem Journal of Applied Forestry*, 5: 15-22
- [2] Feng Z-W (冯宗炜), Wang X-K (王效科), Wu G (吴刚). 1999. Biomass and Productivity of Forest Ecosystem in China. Beijing: Sciences Press: 8-12 (in Chinese)
- [3] Gehring C, Park S, Denich M. 2004. Liana allometric biomass equations for Amazonian primary and secondary forest. *Forest Ecology and Management*, 195: 69-83
- [4] Hapem CB, Miller EA, Geyer MA. 1996. Equations for predicting above-ground biomass of plant species in early successional forests of the western Cascade Range, Oregon. *Northwest Science*, 70(4): 306-320
- [5] Hong N (洪楠). 2000. SPSS for Windows Statistics Lessons. Beijing: Electronic Industry Press (in Chinese)
- [6] Li X-R (李轩然), Liu Q-J (刘琪), Chen Y-R (陈永瑞), et al. 2006. Aboveground biomass of three conifers in Qianyanzhou plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 17(8): 1382-1388 (in Chinese)
- [7] Liu Q-J (刘琪), Hu L-L (胡理乐), Li X-R (李轩然). 2005. Plant diversity in Qianyanzhou after 20 years of small watershed treatment. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 29(5): 766-774 (in Chinese)
- [8] Nelson BW, Mesquita R, Pereira JLG, et al. 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, 117: 149-167
- [9] Overman JEM, Witte HJL, Saldarriaga JG. 1994. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*, 10: 207-218
- [10] Paton D, Nu ez J, Bao D, et al. 2002. Forage biomass of 22 shrub species from Monfragüe Natural Park (SW Spain) assessed by log-log regression models. *Journal of*

- Arid Environments*, **52**(2): 223- 231
- [11] Roy J, Mooney HA, Saugier B. 2001. Terrestrial Global Productivity, Past, Present, Future. San Diego, California: Academic Press
- [12] Sah JP, Ross MS, Koptur S, *et al* 2004. Estimating aboveground biomass of broadleaved woody plants in the understory of Florida Keys pine forests. *Forest Ecology and Management*, **203**: 319- 329
- [13] Sprugel DG. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, **64**: 209- 210
- [14] Usó JL, Mateu J, Karjalainen T, *et al* 1997. Allometric regression equations to determine aerial biomasses of Mediterranean shrubs. *Plant Ecology*, **132**: 59- 69
- [15] Xing Y-Q (邢艳秋), Wang L-H (王立海). 2007. Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai Mountains based on forest inventory. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **18**(1): 1- 8 (in Chinese)
- [16] Xu H (胥辉). 1997. Review of forest biomass models research. *Forest Resources Management (林业资源管理)*, (5): 33- 36 (in Chinese)
- [17] Yan W-D (闫文德), Tian D-L (田大伦), He G-X (何功秀). 2003. Biomass distribution and dynamics of Chinese fir plantation in Huitong. *Forest Resources Management (林业资源管理)*, (2): 5- 7 (in Chinese)
- [18] Yang B-Z (杨宝珍). 1998. The change of vegetation types and its characteristics of distribution through development and management in Qianyanzhou experimental area// Cheng T (程彤), ed. *Studies of Ecological System Restoration and Agricultural Sustainable Development of Red-soil Hilly Region (Series 2)*. Beijing: Meteorological Press: 34- 43 (in Chinese)
- [19] Zeng H-Q (曾慧卿), Liu Q-J (刘琪), Ma Z-Q (马泽清), *et al* 2006. Model research on shrub biomass in Qianyanzhou. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology (浙江林业科技)*, **26**(1): 13- 17 (in Chinese)
- [20] Zeng H-Q (曾慧卿), Liu Q-J (刘琪), Ma Z-Q (马泽清), *et al* 2006. The regression model of *Loropetalum chinense* biomass based on canopy diameter and plant height. *Journal of Nanjing Forestry University (南京林业大学学报)*, **30**(4): 101- 104 (in Chinese)
- [21] Zeng Z-Y (曾珍英), Liu Q-J (刘琪), Zeng H-Q (曾慧卿). 2005. Study of biomass models of some kinds of shrubs in Qianyanzhou, Jiangxi Province. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology (福建林业科技)*, **32**(4): 68- 72 (in Chinese)
- [22] Zeng Z-Y (曾珍英), Liu Q-J (刘琪), Zhang J-P (张建萍), *et al* 2005. A study on the pertinence of measure factors and organic biomass of shrub. *Acta Agricolae Universitatis Jiangxiensis (江西农业大学学报)*, **27**(5): 694- 699 (in Chinese)

作者简介 曾慧卿,女,1974年生,博士研究生.主要从事森林生态学研究. Email: hqzeng@126.com

责任编辑 李凤琴
