

不同方法计算湿地松林生物量的比较^{*}

李轩然^{1,2,3} 刘琪^{2**} 王景^{2**} 胡理乐⁴ 马泽清^{2,3}

(¹ 赤峰学院环境与资源管理系, 赤峰 024001; 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 100039; ⁴ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要 利用实测值建模法、估计值建模法和平均标准木法计算中国科学院千烟洲试验站湿地松(*Pinus elliotii*)人工林各器官生物量和总地上生物量, 并与利用文献中的湿地松相对生长方程计算的结果进行比较。结果表明, 枝条基径与该枝条叶生物量及总生物量之间存在显著的相关关系; 不同方法计算的总地上生物量存在一定的差别, 其中实测值建模法和估计值建模法的计算结果最接近, 分别为 7.9×10^4 和 $8.0 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 利用平均标准木法得到的生物量偏低, 为 $7.41 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 3种方法得到的各器官生物量差别较大, 尤其是叶生物量, 利用实测值建模法的计算结果为 $8450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 估计值建模法和平均标准木法的计算结果分别为 6 580 和 $1.0 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中平均标准木法的计算结果因取样的不同而有所差异; 直接利用他人建立的相对生长方程计算的生物量与以上3种方法计算结果相比差异较大, 使用时须谨慎。计算总地上生物量时, 实测值建模法是最可靠的方法, 估计值建模法在一定程度上可以代替实测值建模法。

关键词 湿地松, 生物量, 方法, 比较

中图分类号 S718.5

文献标识码 A

文章编号 1000-4890(2006)12-1594-05

Calculation of *Pinus elliotii* biomass: A comparison of different methods. LI Xuanran^{1,2,3}, LIU Qijing², HU Lile⁴, MA Zeqing^{2,3} (¹Department of Environment and Resources Management, Chifeng College, Chifeng 024001, China; ²Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; ⁴Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1594~1598.

In this paper, three methods including allometry with observed data (AMOD), allometry with calculated data (AMCD), and average sample tree determination (ASTD) were used to estimate the foliage biomass, branch biomass, trunk biomass, and total biomass of *Pinus elliotii* in Qianyanzhou station. The results showed that branch diameter was highly correlated to branch biomass and branch leaf biomass, and the linear equation with single parameter (d^3) was the best type of equation to describe the correlation. The total biomass calculated by these three methods was adjacent, being $7.9 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ by AMOD, $8.0 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ by AMCD, and $7.41 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ by ASTD. The foliage biomass, branch biomass and trunk biomass, especially the foliage biomass, had a distinct difference when estimated by the three methods, being $> 20\%$ higher or lower by ASTD than by the other two methods. In related literatures, allometric equations were also used to estimate the total biomass and apparatus biomass of *P. elliotii*, but the calculated values were all higher than those by the three methods. AMOD was most reliable when estimating forest biomass, while AMCD could take the place of AMOD in some extent.

Key words *Pinus elliotii*, biomass, method, comparison.

1 引言

生物量是单位面积上所有生物有机体的干重总量^[6], 它是衡量生态系统在一定时间内固碳能力大小的重要指标。从生物生产能力与气候之间的关系角度考虑, 碳蓄积主要发生在热带亚热带地区^[26]; 从植被类型角度考虑, 森林控制着陆地生态系统地上碳蓄积的 80% 和地下碳蓄积的 40%^[22], 在地圈、生物圈的地球化学循环中起着重要的缓冲器作

用^[19]。湿地松(*Pinus elliotii*)是中国亚热带地区的常见树种, 原产美国, 具有适应性强、耐贫瘠等优点^[7,8], 20世纪60年代以后在中国南方地区普遍引种^[9]。据统计, 截止到1999年中国湿地松人工林面积已经超过 $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[14]。研究湿地松人工林的生物量及其分配特征, 对准确估测亚热带森林的生物量和固碳能力具有重要意义。

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB4125)。

** 通讯作者

收稿日期: 2006-01-07 接受日期: 2006-09-12

通常用于测定乔木生物量的方法有皆伐法、平均标准木法、径级标准木法和相对生长法等^[1, 6, 18]。在这些方法的基础上,也有一些派生的方法,如对某些不能采样实测的物种(如濒危植物)进行生物量研究时,测量枝条、树干的体积和密度间接换算生物量^[20];估算某些不能采样实测地区(如保护区内)的生物量和固碳能力,利用其他地区同一物种或相似物种的相对生长方程计算^[23]。目前国内有关湿地松林生物量和生产力的研究已有一些报道^[4, 5, 10, 11, 16],这些研究或以平均木法求算生物量,或以相对生长法求算,但利用不同方法估算同一区域生物量和生产力的研究未见报道。由于不同方法本身的精度不同,不同研究区域生物量的估算结果相互比较时,既可能是各区域之间确实存在生物量的差别,也可能是由于方法不同造成的计算结果的差别,使结果的可比性较差。本文选择实测值建模法、估计值建模法和平均标准木法3种方法计算千烟洲试验站湿地松人工林的生物量,并与直接引用他人建立的相对生长方程的计算结果进行比较,旨在探讨千烟洲湿地松人工林的生物量大小和不同方法计算同一研究区域同一物种的生物量时,结果会存在多大差别,哪种方法更优。

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

试验地为中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站(简称千烟洲试验站)的核心试验区,位于江西省泰和县灌溪乡境内,115°04'13"E,26°44'48"N。试验区海拔100 m左右,相对高度20~50 m,属典型的红壤丘陵地貌。年平均气温17.9℃,≥0℃活动积温6523℃,多年平均降水量1489 mm,年日照时数1406 h,太阳年总辐射量4349 MJ·m⁻²,无霜期323 d。主要土壤类型为红壤,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物^[2]。土地利用类型以人工林为主,造林时间为1984年,在此以前千烟洲是荒山草坡^[17]。2003年8~9月植被调查结果表明,试验站内林地中乔木层共有49个树种,以人工种植的湿地松林、马尾松(*P. massoniana*)林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林面积最大,其次是人工阔叶林,组成树种有枫香(*Liquidambar formosana*)、木荷(*Schima superba*)等。灌木层物种丰富,共有100余种,主要物种为木(*Loropetalum chinense*)、白栎(*Quercus fabri*)、白马

骨(*Serissa serissoides*)和乌饭树(*Vaccinium bracteatum*)等。

2.2 数据处理

本研究所用数据来自2次采样过程。2003年8月采伐4株生长健康的湿地松,测量地径(D₀)、胸径(D)、树高(H),选择生长健康的156个枝条测量基部直径(简称基径,d)、枝长(L),称量每一枝条的当年生叶、多年生叶、当年生枝和多年生枝重,并分别取样测含水率,建立枝条的地径—生物量关系方程。称量4株树干重量,根据实测木材含水率和木材密度计算树干材积,据此对前人的树干材积方程^[13]进行简单修正。2004年12月伐倒湿地松21株,测量地径、胸径、树高、冠幅和所有一级枝条的基径,称量每株树当年生叶、多年生叶、当年生枝、多年生枝、枯枝和树干鲜重,取样测含水率。在湿地松林中做2个20 m×20 m样地,每木检尺,计算千烟洲湿地松人工林的生物量。

2.3 研究方法

2.3.1 平均标准木法(average sample tree determination method, ASTD) 根据2个样地的每木检尺数据计算湿地松林的平均木直径为16.8 cm,在2004年12月伐倒的21株湿地松中选择与其直径最接近的2株湿地松(直径分别为16.7和17.1 cm)作为平均标准木,求算2株湿地松各器官生物量的均值,结合样地调查数据计算千烟洲湿地松人工林地上各器官的生物量。

2.3.2 实测值建模法(allometric method with observed data, AMOD) 简称实测值法,即通常的相对生长法。根据2004年12月实测的21株湿地松各器官生物量(叶、枝、树干)建立湿地松胸径—各器官生物量相对生长方程,结合样地调查的胸径数据计算千烟洲湿地松人工林地上各器官生物量。

2.3.3 估计值建模法(allometric method with calculated data, AMCD) 简称估计值法,是由相对生长法衍生的方法,其中用于建立相对生长方程的单木各器官生物量和总生物量均是由此推算得到的。利用2003年8月调查的156个枝条建立枝条的基径—生物量关系方程,结合2004年12月测量的21株湿地松所有枝条的基径计算得到每株湿地松的枝条生物量和叶生物量,树干生物量利用简单修正后的树干材积方程计算,总生物量是以上二者的加和。利用这些推算得到的数据拟合胸径—各器官生物量相对生长方程,结合样地调查数据估算千烟洲湿地

松人工林地上各器官生物量。

2.3.4 比较研究 比较以上 3 种方法的计算结果与直接引用他人建立方程的计算结果有何差异。从前人关于湿地松胸径、树高和各器官生物量相关关系的报道中,选择杨桦等^[13]建立的江西吉水县湿地松相对生长方程,不做任何修正,根据样地调查的胸径、树高数据计算干烟洲湿地松人工林的生物量(表 1)。

表 1 引用的湿地松各器官生物量方程^[13]

Tab. 1 Cited allometric equations

| 器官 | 方程 | R | 适用范围 |
|----|-------------------------------|-------|----------------|
| 树叶 | $W=0.000341(D^2H)^{1.33939}$ | 0.986 | D: 8.1~20.1 cm |
| 树枝 | $W=0.010467(D^2H)^{0.994674}$ | 0.998 | H: 6.9~9.6 m |
| 树干 | $W=0.014339(D^2H)^{0.9969}$ | 0.933 | |
| 总 | $W=0.01007(D^2H)^{1.109621}$ | 0.988 | |

3 结果与分析

3.1 枝条基径—生物量方程和树干材积方程

利用估计值法计算生物量,需要先建立单个枝条基径与枝条叶生物量、总生物量的关系方程和树干材积方程。分别选择枝条基径 d、枝长 L、 d^3 、 d^2L 为自变量,利用线性函数、幂函数和指数函数对 156 个生长健康枝条的总生物量、叶生物量模拟发现,以 d^3 为自变量的线性方程模拟结果相关系数最高。在现实中当直径趋近于 0 时,生物量也应该接近 0。为使计算结果与实际情况相符,令截距取 0,此时线性方程的相关系数仍高于其他 2 种函数。经 F 检验,枝条基径与枝条总生物量、叶生物量相关关系极显著。根据以上结果,本文选择截距为 0 的以 d^3 为自变量的线性方程计算枝条生物量和叶生物量(图 1)。

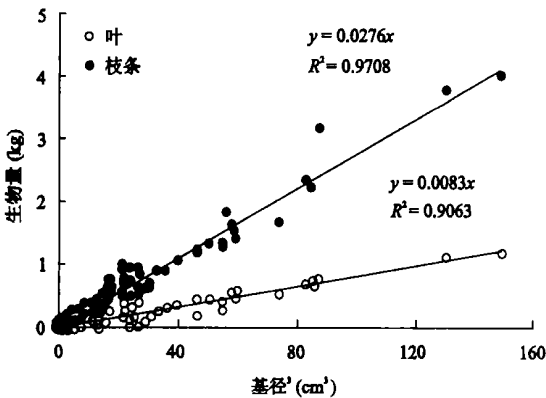


图 1 枝条基径—生物量关系

Fig. 1 Relationship between branch diameter and biomass

许多省市和地区的林业部门都有本地区常见树种的立木材积表和材积方程。前人的文献中也很容

易找到类似的方程,但是在实际应用时由于各地的立地条件不同,直接引用前人的方程可能给结果带来一定的误差,需要预先对其修正。本文选择郑郁善等^[15]建立的湿地松优化立木材积方程进行修正并计算单木材积。根据 2003 年 8 月实测 4 株湿地松的树干鲜重、含水率(70.56%)计算树干干重,利用实测木材干重密度($298.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)计算材积(V),将胸径和树高代入引用的材积方程计算材积(V_c),利用线性函数、幂函数和指数函数模拟 V 和 V_c 之间的相关关系发现,利用幂函数 $V = 0.8652 V_c^{1.0312}$ 进行简单修正时相关系数最高,为 0.9972,经 F 检验二者之间的相关关系极显著。引用的原始方程和修正后的材积方程如表 2。

表 2 计算材积的方程

Tab. 2 Equations for log volume

| 类别 | 方程 | 胸径(cm) |
|-------|---|-----------|
| 原始方程 | $V_c = 0.00059398D^{2.159967}H^{0.6678276}$ | 5.65~31.3 |
| 修正后方程 | $V = 0.00037934D^{2.2274}H^{0.6887}$ | 10.7~25.9 |

3.2 单木胸径—生物量方程

已有研究表明,某一测树因子与生物量(各器官生物量、总生物量)之间的相关关系以幂函数曲线模拟效果最佳^[21, 27]。将 2004 年 12 月伐倒的湿地松样木的所有枝条直径代入枝条基径—生物量方程计算叶生物量、枝条生物量,根据简单修正过的材积方程计算这些湿地松的树干生物量,分别以胸径(D)和 D^2H 为自变量对各器官(叶、枝、干)生物量及总生物量利用幂函数进行拟合。同时拟合同一批样木实测的各器官生物量与 D、 D^2H 之间的相关关系。比较拟合结果发现,以单因子 D 为自变量的幂函数方程相关系数高于以 D^2H 为自变量的方程。整理以 D 为自变量的各器官生物量方程如表 3。

表 3 单木胸径—各器官生物量方程

Tab. 3 Allometric equations of AMOD and AMCD methods

| 方法 | 器官 | 方程 | r^2 | F | P | 样本量 |
|----|----|----------------------|-------|---------|--------|-----|
| 实测 | 叶 | $W=0.0074D^{2.3183}$ | 0.631 | 32.46 | <0.001 | 21 |
| | 枝 | $W=0.0137D^{2.3683}$ | 0.731 | 51.64 | <0.001 | 21 |
| | 干 | $W=0.042D^{2.3455}$ | 0.952 | 380.95 | <0.001 | 21 |
| 估计 | 总 | $W=0.0632D^{2.3496}$ | 0.922 | 224.5 | <0.001 | 21 |
| | 叶 | $W=0.007D^{2.2507}$ | 0.552 | 23.44 | <0.001 | 21 |
| | 枝 | $W=0.0163D^{2.2508}$ | 0.552 | 23.44 | <0.001 | 21 |
| 值法 | 干 | $W=0.0226D^{2.5953}$ | 0.985 | 1244.97 | <0.001 | 21 |
| | 总 | $W=0.0413D^{2.5031}$ | 0.967 | 552.81 | <0.001 | 21 |

3.3 3 种方法计算结果的比较

试验中选择的 2 株平均标准木的基本情况如表

4. 二者之间除叶生物量存在差别外, 其他各器官生物量非常接近。根据标准木法、实测值法、估计值法和直接引用他人方程计算的湿地松人工林地上各器官生物量如表 5。其中根据胸径—总生物量方程计算得到的总生物量为表 5“总 1”部分, “总 2”部分为根据胸径—器官生物量方程计算得到各器官生物量后加和得到的总生物量。

表 4 2 株平均标准木资料

Tab. 4 Information of the two average sample trees

| | 胸径 (cm) | 树高 (m) | 叶重 (kg) | 枝重 (kg) | 树干重 (kg) | 总重 (kg) |
|----|------------|-----------|------------|------------|-------------|------------|
| 1 | 17.1 | 10.40 | 7.63 | 9.73 | 30.26 | 47.62 |
| 2 | 16.7 | 12.38 | 5.00 | 9.80 | 30.33 | 45.12 |
| 平均 | 16.9 | 11.39 | 6.32 | 9.76 | 30.30 | 46.37 |

表 5 湿地松人工林地上各器官生物量 ($t \cdot hm^{-2}$)Tab. 5 Above-ground biomass of *P. elliotii* plantation by different methods

| 方法 | 叶 | 枝 | 干 | 总 1 | 总 2 |
|------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 标准木法 | 10.09 | 15.59 | 48.39 | 74.08 | 74.08 |
| 实测值法 | 8.45 | 18.07 | 51.87 | 78.98 | 78.39 |
| 估计值法 | 6.58 | 15.33 | 57.33 | 80.30 | 79.25 |
| 引用方程 | 25.86 | 47.53 | 66.29 | 116.58 | 139.68 |

由于实测值法利用的数据全部为实测数据, 在几种方法中计算结果具有最高的可靠性。平均标准木法、实测值法和估计值法计算得到的叶生物量差别较大, 平均标准木法的计算结果明显高于其他 2 种方法。从 2 株平均标准木的叶生物量数据可以看到, 即使是胸径相近的 2 株湿地松, 叶生物量也可能存在较大的差别。这说明不同个体之间叶生物量的变动范围较大, 仅用 1 株平均标准木的叶生物量来估测整个群落的叶生物量很有可能给估测结果带来较大的误差。利用枝条基径—叶生物量模型方法计算的叶生物量偏低, 一方面可能由于两次方程的构建存在误差传递的问题; 另一方面, 2 种方法所用数据存在季节上的差异, 虽然有部分多年生叶在秋冬季凋落, 但同时当年生叶也逐渐生长成熟, 积累的有机质增多。实验测得 8 月份当年生叶的干物质率为 36.65%, 在 12 月份为 41.54%, 而多年生叶的干物质率变化不大(分别为 43.17% 和 44.42%)。

2 株标准木的树高相差较大, 而枝条生物量、树干生物量和总生物量差别不大, 说明在用相对生长法计算生物量时胸径比树高具有更高的可靠性。当把树高参数也作为一个变量引入相对生长方程中(即以 D^2H 为自变量)时, 多引入的参数可能反而降

低描述的可靠性, 这与有关的报道^[23, 24]是一致的。

利用平均标准木法得到的枝条生物量、树干生物量和总生物量都小于利用实测值法得到的值, 因为平均标准木法是将胸径与枝条生物量、树干生物量及总生物量之间的关系作为线性函数看待, 而实际上其为幂函数关系^[21, 27]。同时可以发现, 平均标准木法和实测值法的计算结果相差并不是十分明显, 这是由于样地中树木胸径的分布区间相对较小(10.2~26 cm), 当胸径区间增大时, 平均标准木法的计算结果将明显比实际值偏低。利用修正后的树干材积方程估计的树干生物量高于实测树干生物量, 可能有两方面原因。其一为实测树干生物量时为便于称量需将树干分解, 分解过程中有少部分生物量损失; 其二为修正材积方程时可能较小的样本量尚不能达到较好的修正效果, 导致计算结果偏高。对总生物量的计算估计值法和实测值法相差不大, 而且估计值法省时省力, 又可以降低取样时对样地的破坏程度, 在一定条件下可以代替实测值法计算群落的总生物量。利用胸径—总生物量方程计算的总生物量和利用各器官生物量加和得到的总生物量相差不大, 说明模型的模拟结果具有较高的可靠性。

引用前人建立的方程和以上 3 种方法的计算结果相差较多, 明显大于 3 种方法的计算结果。其中叶生物量相差最悬殊, 是实测值法的 3 倍, 总生物量是实测值法的 1.48 倍, 树干生物量最接近, 也比实测值法高 27.8%, 而且利用胸径—总生物量方程计算得到的总生物量和利用各器官生物量加和得到的总生物量结果差别也较大。产生这些差别的原因一方面由于引用的方程和本次调查的样本在适用范围上存在一定的差异, 更主要是由于立地条件不同引起的。当立地条件存在差异时, 直接引用他人方程计算生物量可能给结果带来较大的误差; 即使地方政府颁布的方程在本省内应用, 也可能存在较大的误差, 这一点与前人的研究结果相一致^[3, 12]。

4 结 论

利用枝条基径、枝长等参数对枝条总生物量、叶生物量的模拟结果表明, 枝条基径与生物量之间存在显著的相关关系, 可以利用枝条基径根据相关方程推算枝条的叶生物量和总生物量。

由于各地的立地条件不同, 同一树种的材积方程在不同的地点也必然存在一定的差异, 计算生物量时, 对材积方程如果随意加以引用, 会给结果带来

较大的偏差。所以在引用他人建立的材积方程之前,最好先利用当地实测数据对其进行修正。本文进行修正的样本量偏小,可能对结果造成一定的影响。

利用3种方法计算湿地松林的生物量结果表明,平均标准木法得到的结果偏低,但和实测值法、估计值法相差不大,主要是由于本次试验的胸径区间相对较小,当样本的胸径区间足够大时,平均标准木法的计算结果将显著低于其他2种方法。利用估计值法和实测值法得到的结果最为接近,利用他人建立方程的计算结果和3种方法的结果相差最大。估算一个地区的生物量时,实测值法的计算结果最为可靠,但是需要耗费较多的人力物力,而且对样地的破坏性较大。如果限于人力、物力或其他因素不能对各器官生物量进行实测,可以选择估计值法。估计值法从枝条入手,工作容易开展,而且随时随地扩大模型的拟合区间。同时只需采伐较少样木,能够减少部分工作量,还能充分利用风倒木、雪压倒木和林场伐木资源,减少对植被的破坏,结果可靠性也较高,是一种值得推广的方法。如果研究区域内树木的胸径相差不大,进行样地调查后平均标准木法也是一种可以选择的方法。相对而言可靠性最低的是直接利用他人建立的方程计算生物量,引用异地模型时一定要谨慎。

参考文献

- [1] 于贵瑞. 2003. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 480.
- [2] 中国科学院南方山区综合科学考察队, 江西省吉安地区自然资源开发治理办公室. 1989. 红壤丘陵开发和治理——千烟洲综合开发治理试验研究[M]. 北京: 科学出版社.
- [3] 王文全, 王进茂, 王世绩, 等. 1996. 欧美杨人工幼林地上生物量估测方法的探讨[J]. 河北林学院学报, 11(2): 102~108.
- [4] 王舒凤, 郑郁善, 陈雄, 等. 2001. 木麻黄湿地松混交林生物量研究[J]. 福建林学院学报, 21(2): 153~156.
- [5] 田大伦, 项文化, 闫文德. 2004. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征[J]. 生态学报, 24(10): 2207~2210.
- [6] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 1999. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 241.
- [7] 任宪威. 1997. 树木学[M]. 北京: 中国林业出版社, 65.
- [8] 成俊卿. 1985. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社.

- [9] 吴中伦. 1983. 国外树种引种概论[M]. 北京: 科学出版社, 116~120.
- [10] 张连水, 庄志贤, 李秀全. 2001. 湿地松地上生物量变化研究[J]. 林业科技开发, 15(增刊): 42~43.
- [11] 李大益. 2004. 福建柏与杉木、湿地松混交林分结构和生物量的研究[J]. 福建林业科技, 31(4): 51~53.
- [12] 李朝栋, 陈友风, 王春相. 1994. 江西省杉木人工林二元立木材积表适应性研究[J]. 江西林业科技, (2): 23~25.
- [13] 杨桦, 詹有生, 曾志光, 等. 2004. 吉水三种造林模式林分生物量及生长量研究[J]. 江西农业大学学报, 26(2): 164~168.
- [14] 邵卓平, 董宏敏, 张治国. 2000. 湿地松木材物理力学性质研究[J]. 安徽农业大学学报, 27(1): 64~66.
- [15] 郑郁善, 董建文, 陈礼光. 1999. 湿地松优化立木材积表的编制[J]. 江西农业大学学报, 21(4): 586~591.
- [16] 胡理乐, 刘琪珊, 廖迎春. 2005. 小流域治理20年后千烟洲生物量的变化[J]. 江西科学, 23(1): 34~38.
- [17] 程彤, 李家永. 1998. 红壤丘陵生态系统恢复与农业持续发展研究[J]. 资源科学, 20: 1~9.
- [18] 董明. 1997. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社.
- [19] 蒋有绪. 1996. 中国森林生态系统结构与功能规律研究[M]. 北京: 中国林业出版社.
- [20] Aboal JR, Arévalo JR, Ferrández A. 2005. Allometric relationships of different tree species and stand above ground biomass in the Gomera laurel forest (Canary Islands) [J]. *Flora*, 200: 264~274.
- [21] Clough BF, Scott K. 1989. Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species [J]. *For. Ecol. Manage.*, 27: 117~127.
- [22] Dixon RK, Brown S, Houghton RA, et al. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 263: 185~190.
- [23] Nelson BW, Mesquita R, Pereira JLG, et al. 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon [J]. *For. Ecol. Manage.*, 117(1~3): 149~167.
- [24] Neter J, Wasserman W. 1974. Applied Linear Statistical Models [M]. Chicago: Irwin Inc, 501~506.
- [25] Van YS, Law BE, Tumer DP, Gitelman AI. 2005. Variability in net primary production and carbon storage in biomass across Oregon forests: An assessment integrating data from forest inventories, intensive sites, and remote sensing [J]. *For. Ecol. Manage.*, 209: 273~291.
- [26] Watson RT, Verardo DJ. 2000. Land-use Change and Forestry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 97~102.
- [27] Whittaker RH, Marks PL. 1975. Methods for assessing terrestrial productivity [A]. In: Lieth H, Whittaker RH, eds. Primary Productivity of the Biosphere [C]. New York: Springer, 55~118.

作者简介 李轩然, 男, 1981年生, 硕士研究生, 主要从事森林生态与遥感研究. E-mail: lxuanr@163.com
责任编辑 李凤芹