

森林生物量模型综述

王维枫, 雷渊才*, 王雪峰, 赵浩彦

(中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091)

摘要:根据研究对象尺度不同将生物量模型分为单木生物量模型和大尺度森林生物量模型。分别介绍了这两类生物量模型的历史和现状,简要概括了生物量模型特点和存在的一些问题,并且对未来的发展趋势做了预测。

关键词:森林生物量; 单木生物量模型; 大尺度森林生物量模型; 材积源生物量模型; 遥感
中图分类号:S718.556 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-7461(2008)02-0058-06

A Review of Forest Biomass Models

WANG Wei-feng, LEI Yuan-cai*, WANG Xue-feng, ZHAO Hao-yan

(The Research Institute of Forest Resource Information and Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Depending on the different scaling of study object, biomass models are divided into single tree biomass model and large-scale forest biomass model. Both development and status were presented separately, and some problems of biomass model were pointed out. Furthermore, the research tendency of biomass models which are applied in forestry was discussed.

Key words: forest biomass; single tree biomass model; large-scale forest biomass model; volume-derived biomass model; remote sensing

森林生物量约占全球陆地植被生物量的 90% 以上^[1],是森林固碳能力的重要标志,也是评估森林碳收支的重要参数,是研究很多林业问题和生态问题的基础。因而,森林生物量的测定和估计成为当代林业生产和科研的热点问题。利用生物量模型估计法是目前比较流行的方法^[2]。本文旨在综述当前国内外森林生物量模型研究现状,希望能对森林生物量模型方法和技术的研究和应用有所帮助。

1 生物量模型

生物量模型(biomass model)是确定森林生物量的主要方法,是一种有效并且相对准确的调查方法。按照研究对象尺度不同分为:单木生物量模型、大尺度森林生物量模型。

1.1 单木生物量模型

单木生物量模型是以模拟林分内每株树木各分量(干、枝、叶、皮、根等)干物质重量为基础的一类模

型。它是通过样本观测值,建立树木各分量干重与其他测树因子(直径、树高)之间的一个或一组数学表达式,而该表达式一定要尽量反映和表达树木各分量干重与其他测树因子之间的内在联系,从而达到利用树木易测因子的调查,来估计生物量的目的。虽然在建模过程中需要测定一定数量样木的生物量作为基础数据,但是一旦模型建立,在同类的林分中就可以利用森林资源清查数据来估计整个林分生物量,而且具有一定的精度。因此,单木生物量模型的研究工作一直是研究的热点。

自 Kitterge^[3]首次将相对生长模型引入到树木上,利用叶重和胸径的拟合关系,成功拟合并建立了白松等树种叶生物量的对数回归方程,许多研究者^[4-11]已经利用多种模型来估计单木生物量,总的来说有下列 3 种形式^[11]:

②) 收稿日期:2007-06-22 修回日期:2008-01-08
基金项目:“十一五”国家科技支撑重点项目(2006BAD 23B01);国家科技基础平台建设项目“林业科学数据共享中心”(2005DKA32200);科技部社会公益研究专项(2005DIB5J142)。
作者简介:王维枫(1982-),男,山东烟台人,硕士,从事森林经理学研究。
* 通讯作者:雷渊才(1957-),男,湖南嘉禾人,研究员,博士,博士生导师,主要从事森林生长模型、森林抽样研究。

线性模型(加性误差):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_j X_j + \epsilon \quad (1)$$

非线性模型(加性误差):

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \cdots X_j^{\beta_j} + \epsilon \quad (2)$$

非线性模型(乘性误差):

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \cdots X_j^{\beta_j} \epsilon \quad (3)$$

Y 表示生物量, X_j 表示第 j 个变量, β_j 表示第 j 个模型参数, ϵ 表示误差项。

模型(1)通常使用最小二乘法的多元线性回归进行估算。模型(2)使用迭代参数估计法的非线性回归方程进行估算。模型(3)通常经过对数变换,转化为线性回归方程,形式如下:

$$\ln Y = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \cdots + \beta_j \ln X_j + \ln \epsilon \quad (4)$$

从 60 年代至今已发表的文献中可以发现,相对生长方程的拟合采用对数形式较多。原因有两点:一方面对数转换后的数据容易进行统计处理;另一方面经对数转换后的数据能满足线性化的假设,可用线性模型理论估计生物量,使问题简化^[2]。目前为止,常用的模型变量和变量形式有:胸径(D), D^2 , 树高(H), $D^2 H$, 也有的模型加上树龄、树冠等变量。实际生产中,采用较多的回归关系式有:

$$W = aD^b \quad (5)$$
$$W = a(D^2 H)^b \quad (6)$$

式中, W 表示生物量, a 、 b 为方程中的估计参数。

但是,相对生长模型理论上存在的疑点是林木各部分与其总和的关系问题。在以往生物量模型研究与应用中,各分量模型(总量、树干、树皮、树根、树枝和树叶)都是独立进行的。这种建模方式在生物量模型研建中导致一个严重的问题,各分量模型估计值之和不等于总量模型估计值。即各分量模型与总量模型不相容^[2,12-13]。

如何解决生物量模型相容性问题,一直是生物量估计面临的一个难题。Cunia 等^[14-15]提出了联立方程估计方法解决这一问题。唐守正等^[12]以长白落叶松为实例,提出了一种与现行森林蓄积量资源清查方法相结合的相容性单木生物量模型及估计方法,即非线性联合估计法,尝试解决这一问题。

总的来说,对相对生长模型的总体评价存在着很大的分歧。一种观点认为相对生长模型完全是一种描述生长的经验公式^[16];而另一种观点则认为相对生长模型是独一无二的并具有内在意义的模型,因为它能恰当的描述在大范围条件下,不同器官的生长关系^[17]。

1.2 大尺度森林生物量模型

大尺度森林生物量的估算方法一直是人们关注的焦点,自 20 世纪 70 年代起很多学者就开始对全球范围内的生物量进行估测。然而早期的研究主要是根据国际生物学计划(IBP)时代在全球各地的实测资料,采用平均生物量的方法估算得到,由于当时各类森林的实测资料较少,而人们在进行生物量的实测时,又往往选择林分生长较为良好的样地,其生物量都较高,从而使得平均生物量偏大,导致全球和区域生物量的估算结果偏高^[18]。80 年代,随着国际地圈与生物圈计划(ICBP)的提出,在全球变化的研究中,利用以往在斑块水平的生态研究系统成果和生物量数据扩展到景观、区域乃至全球的空间尺度上^[2]。

1.2.1 基于材积转化的生物量模型 生物量与材积的比值法常被人们用作推算森林生物量的一种简易方法,一些研究往往把这一比值看作是一恒定的常数。但实际情况是,该比值随着材积的变化而变化,只有当材积达到很大的程度时,该值才是常数^[19]。随着全球各地有关生物量实测资料的大量增加,人们对提高森林生物量估算的精度变得更加可能,并由此提出一系列研究方法^[18-24],其中主要有生物量转换因子法、生物量转换因子连续函数法。

1.2.1.1 生物量转换因子法(biomass expansion factor, BEF) 是利用林分生物量与木材材积比值的平均值,乘以该森林类型的总蓄积量,得到该类型森林的总生物量的方法^[18,26]。在森林生物量的组成当中,树干(材积)只是其中的一部分,并且所占的比率因树种和立地条件不同而有很大的差异^[22]。1984 年 Brown 等^[22]基于该方法,采用由联合国粮农组织提供的主要森林类型蓄积量资料,估算了全球森林地上生物量,指出热带郁闭森林和非郁闭森林的平均地上生物量分别为 150、50 t · hm⁻²。与实际资料相比,该估算结果对于非郁闭森林较好,而对于郁闭森林则误差较大。原因在于,未能准确地估算热带郁闭森林的林下部分。生物量转换因子法的不足主要反映在生物量转换因子,例如木材密度(WD)和总生物量与地上生物量的转换系数均取作常数。

相关研究表明,生物量转换因子法估算的生物量较皆伐法高出 20%~40%^[25],而基于实测资料建立的生物量回归模型的估计值与皆伐法非常接近,相对误差在 10%^[25]以内。方精云等^[19]也指出,林分生物量和蓄积量与森林类型、年龄、立地条件和林

分密度等诸多因素有关。可见采用常数的生物量转换因子,不能准确估算森林生物量。

1.2.1.2 生物量转换因子连续函数法 是为克服生物量转换因子法将生物量与蓄积量比值作为常数的不足而提出的。因此,换算因子连续函数法将单一不变的平均换算因子改为分龄级的换算因子,以更准确地估算国家或地区尺度的森林生物量^[22, 26-27]。

林分材积综合反映了林龄、立地、个体密度和林分状况等因素的变化,因此,可以作为换算因子的函数,以表示 BEF 的连续变化。

Brown 等^[28]和 Sehroeder 等^[29]利用幂指数函数来表示 BEF 与林分材积(V)的关系,即:

$$BEF = aV^{-b} \tag{7}$$

$$B = aV^{1-b} \tag{8}$$

式中:B 为生物量,a 和 b 为估计参数。这种关系对于由实测资料建立的 BEF 值与材积之间的关系推广到处理大尺度的森林资源清查资料时,存在严重的数学推理困难,即难以实现由样地调查到区域推算的尺度转换(Scaling-up)。换句话说,理论上,不能利用该式估算区域尺度的森林生物量^[30]。

方精云等^[19,21]利用倒数方程来表示 BEF 与林分材积之间的关系,即:

$$BEF = a + \frac{b}{V} \tag{9}$$

$$B = aV + b \tag{10}$$

当材积很大时(成熟林),BEF 趋向恒定值 a;材积很小时(幼龄林),BEF 很大。研究表明,这一简单的数学关系符合生物的相关生长理论,适合于几乎所有的森林类型,具有普遍性,并且由该式可以非常简单地实现由样地调查向区域推算的尺度转换,而为推算区域尺度的森林生物量提供了理论基础和合理的方法,也使得区域森林生物量的计算方程得以简化。基于该模型,估算森林生物量的方法被称为“换算因子连续函数法”^[31]。

但是,对某一森林类型而言,方精云等^[19]的线性关系存在样本数不足的缺陷。例如,在建立桦木、栎类、桉树等树种的生物量和蓄积量的线性关系时,所用的样本数分别是 4、3 和 4。而对于热带森林所有树种所采用的样本数也仅 8 个。另外方精云等^[19]的关于生物量和蓄积量的估算是一种简单的线性关系还存在着争议^[23-24]。

周广胜等^[23]在总结前人对生物量和蓄积量研究的基础之上,利用收集到的全国 34 组落叶松林实地测量资料,其中包括总生物量和蓄积量,建立了生

物量(B)和蓄积量的双曲线关系模型:

$$BEF = \frac{1}{a + bV} \tag{11}$$

$$B = \frac{V}{a + bV} \tag{12}$$

周广胜等^[23]将 Brown 等^[22]估算模型中的系数 a 看成为蓄积量的函数,既克服了 Brown 等^[22]将生物量与蓄积量之比作为常数的不足,又避免将林分在任一个生长阶段的生物量随蓄积量的变化简单地处理为线形关系。目前,该模型仅对兴安落叶松进行了研究。是否适用于所有的森林类型,有待于进一步研究。

综上所述,如何将森林资源清查的蓄积量转化为生物量,其模型、方法值得研究。生物量与蓄积的转换是近年来的研究热点问题,尚须进一步从地域、树种上进行验证,全面系统地建立 $B=f(V)$ 关系,实现森林蓄积与材积的转换^[32]。

1.2.2 基于遥感技术的生物量模型 通过遥感技术和地理信息系统等先进手段可以测定从林分到区域等不同空间尺度的森林生物量。其原理是:植被的遥感图像信息是由其反射光谱特征决定的,植物的光合作用表现为对红光和蓝紫光的强烈吸收而使其反射光谱曲线在该部分波段呈波谷形态。所以,植物的反射光谱特征反映了植物的叶绿素含量和生长状况。而叶绿素含量与叶生物量相关。叶生物量又与群落生物量相关。所以,利用遥感数据来估算森林植被生物量,首先需要分析森林植被生物量估测的遥感模型机理,从光合作用即森林植被生产力形成的生理生态过程出发,以及森林植被对太阳辐射的吸收、反射、透射及其辐射在植被冠层内及大气中的传输。结合植被生产力的生态影响因子,在卫星接收到的信息与实测生物量之间建立完整的数学模型及其解析式,进而利用这些解析式来估算森林生物量。

遥感可以分为光学和近红外遥感及微波遥感;光学和近红外光谱只对绿叶产生反应,而微波可以穿透林冠,不仅能和叶发生作用,也能和干发生作用,因此微波遥感能对森林生物量进行全面和准确的估测^[33]。基于遥感技术的生物量模型主要包括以下几种:

1) 经验模型,不涉及机理问题,是对观测数据进行经验性的统计描述或者是在对遥感信息参数和地面观测的森林生物量进行统计分析的基础上,建立两者的关系来估算生物量的一种模型。这类模型有线性、幂函数和对数等各种形式,而且自变量也各

不相同。

Dong 等^[34]利用 NOAA-VHRR 数据,分析了森林生长季内的累积植被指数值(normalized difference vegetation index,简称 NDVI)与六国各省森林生物量总量的关系,建立了两者之间的拟合方程:

$$1/Biomass = a + b[(1/NDVI)]/Latitude^2] - C \cdot Latitude \quad (13)$$

Biomass 表示生物量, *Latitude* 表示纬度。Tompson^[35]等通过建立多元非线性回归方程,估算出芬兰森林的材积和地上生物量。郭志华等^[36]利用调查样方材积,建立与光谱响应的回归方程,估算了粤西地区的森林生物量。陈利军等^[37]用遥感技术对中国陆地植被的生物量进行了估测。郑光等^[38]利用 ETM+ 遥感影像,建立了实测叶面积指数(leaf area index,简称 LAI)与实测生物量数据的回归关系:

$$Biomass = a \cdot LAI + b \cdot AGE + c \quad (14)$$

AGE 表示年龄。

这些估算模型的优点是相对简单、便于计算,缺点是形式多种多样,自变量各异,易受植被类型以及非植被因素如土壤背景、大气条件、地形和地表二向性反射特性的影响。

另外,目前人工神经网络模型的应用于森林生物量估算刚刚起步,少数研究者这在该领域进行了有益的探索。2001 年, Foody 等^[39]对婆罗洲热带雨林的生物量进行制图分析时,运用 3 种不同的神经网络,利用 TM 影像 7 个波段进行了回归分析,提高了生物量的估算精度。2003 年, Foody 等^[40]采用多元回归分析和后向神经网络 2 种方法估算了巴西、马来群岛和泰国 3 个地区的森林生物量。国庆喜等^[41]采用小兴安岭南坡 TM 图像和 232 块森林资源一类清查样地数据构建多元回归方程和神经网络模型,用以估测该地区森林生物量。

由于神经网络无法解释变量和输出数据之间的关系,因此神经网络模型难以完全反应生物量与遥感影响的机理问题,但其精度却高于传统的基于多元回归方法进行的估测。

2) 为了克服经验模型的缺陷,许多学者提出了基于植被二向反射特性的物理模型,如考虑辐射传输的 3D 模型、几何光学的间隙率模型。由植被的结构特征和光谱特征计算植被 BRDF(bidirectional reflectance distribution function)是遥感的正向问题;由植被 BRDF 使用相应的计算方法生成植被结

构称为反演问题。植被冠层的反演有两种方案:一是用多光谱信息反演即通过光谱变换得到各种植被系数,这类方法存在着许多问题和困难,精度也不够;二是可通过多角度遥感信息进行反演。

3) 半经验模型综合了经验模型与物理模型的优点,通常使用的参数很少,但这些参数通常具有一定的物理学意义,例如 Roujean 模型、Verstraete 模型、Wanner 核驱动模型等,这种中和模型具有一定的应用前景^[42]。例如, Hame 等^[43]提出了一个生物量估算的半物理方法,即首先利用地面测量和 Landsat TM 数据计算出基本模型,从 AVHRR 数据中创建图像镶嵌;然后利用原始光谱通道的数值(digital number)来确定 Landsat 数据和 AVHRR 数据的关系。

4) 机理模型(或过程模型)是用以描述不同时空尺度下植被生长过程,如光合过程、呼吸作用、植物的分解与氧分循环等,它是根据植物生理、生态学原理,通过对太阳能转化为化学能的过程和植物冠层蒸散与光合作用相伴随的植物体及土壤水分散失的过程进行模拟,从而实现对陆地植被生产力的估算。

在这类模型中,不是仅对生物量作简单估算而是将其纳入全球变化和养分循环的模型之中,生物量只是模型输出量之一。代表性的有 CENTURY、CARAIB、TEM 等全球模型。这些模型的缺点是往往过于复杂,需要输入的变量较多。模型的应用往往取决于所选取的数据的质量,但数据获取又非常困难。但是,同那些只是运用遥感信息参数与生产力简单经验关系来估算生产力的方法相比,机理模型更强调对生态系统内部各种作用过程的描述,估算结果一般也更为可靠^[44]。

与传统的生物量估算方法比较,遥感方法可快速、无损、相对准确的对生物量进行估算,对生态系统进行宏观监测。研究者可以利用遥感的多时相特点定位分析同一样区一段时间后的干扰变化,使传统方法难以解决的问题变得轻而易举,使动态监测成为可能。

2 存在的问题及建议

研究树种仍过于单一,多数研究主要集中在人工林上,而对天然林生物量的研究相对较少。由于生物量实测资料有限,不能够涵盖所有森林类型及其立地状况,将大大降低回归关系式的使用效果。尽管我国实测的各种森林类型的生物量和生产力有

很多,但是有许多是针对人工林(杉木林、马尾松林、桉树等),而对天然林蓄积量和生物量的应用,有一定的局限性。近年来,国内外学者对许多树种的生物量进行了研究,并且逐渐扩大研究的范围,在个体、种群、群落、生态系统、区域、生物圈等多尺度上开展森林生物量的研究。同时,还应针对同一树种的生物量研究更加深入,包括同一树种不同地理种源、不同发育阶段、不同自然地带的生物量差异,以期建立生物量树种权重指标体系,实现对天然林生物量较为精确的估测。但是如何对各种数据进行一体化管理,使其得到充分共享和利用,是一个重要问题。建立长期观测台站网络,强调数据标准化,建立数据的共享机制不失为一种有效的解决办法。

目前,仍缺乏对森林多层次模型的研究。仅对森林中某一直径的活立木生物量进行估算,而对小于某一直径的林木以及林下灌木和草本植物生物量等研究相对较少。因此,明确森林总生物量与活立木生物量的关系,建立林下植被生物量模型,以解决现有模型对小于某一直径的林木以及林下灌木和草本植物生物量忽视的问题。另一方面,在灌、草生物量模型的研究中,通常使用冠幅(C)代替胸径(D),其单位标准化是一个值得注意的问题。

对影响森林生物量的主导因素的研究有待进一步完善。森林生物量与许多生物学因素(蓄积量、林龄等)和非生物学因素密切相关,估算森林生物量时对于森林类型的林龄、气温和降水等许多生物和非生物学因素的协同作用没有重视,不能动态估算某一地点森林碳储量动态及其对气候变化的响应^[25]。在今后的模型研建中,应综合考虑森林生物学因素与非生物学因素对森林生物量的作用,特别强调森林蓄积量和林龄以及气候因子在估算森林生物量中的作用。随着计算机技术的发展,可考虑将生物量模型与虚拟现实技术结合起来,融合主要的生物学和非生物学因子,使未来的生物量模型更加可视化。

目前,大多数基于遥感技术的森林生物量估算,仅建立在生物量与遥感数据之间的线性相关分析上,缺乏对机理模型的研究。机理模型结合了树木生长的有关信息(如光合过程、养分循环等),将是今后遥感建模的主要方向。随着生理生态学的发展、实验仪器及分析方法的改进,建立生物生长过程的机理模型已成为可能。

大尺度森林生物量的估算是个相当复杂的问题,涉及地面外业数据采集、遥感数据源、建模及精度验证等,并且,不同地区的数据源和数学建模方法

不同。如何进一步提高大尺度森林生物量的估算精度,是当前森林生态学研究的热点和难点之一。遥感的各波段以及激光都能够应用于生产力与生物量的研究。随着传感器技术的发展,可以充分结合各波段的特点,进行森林生物量的估测。多角度遥感和高光谱遥感都是提高生物量估算精度的有效途径,但其遥感数据量大,需要发展适宜的数据存储、压缩和处理技术^[42]。3S 技术的集成推动了生物量遥感估算的进程,在 GIS 环境下实现包括 RS 信息在内的多种信息的复合,建立生物量模型^[45]。因此,把“3S”技术整合到生物量模型中,也将是未来生物量模型发展的一个主要方向。另外,遥感数据与地面实测数据、地面摄影测量数据相结合也是一个值得探讨的领域。

参考文献:

[1] LIETH H, WHITTAKER R H. Primary Productivity of the Biosphere [M]. New York: Springer-Verlag, 1975.

[2] 胥辉,张会儒. 林木生物量模型的研究[M]. 昆明: 云南科技出版社. 2002.

[3] KITTERGE J. Estimation of amount of foliage of trees and shrubs[J]. J. Forest, 1944 (42):905-912.

[4] 冯宗炜,陈楚莹,张家武. 湖南全国地区马尾松林生物量的测定[J]. 林业科学,1982,18(2):127-134.

[5] 李文华,邓坤枚,李飞. 长白山主要生态系统生物产量的研究[C]//中国科学院长白山森林生态系统定位站主编. 森林生态系统研究(第二卷). 北京:中国林业出版社,1981:34-50.

[6] 胥辉. 一种生物量模型构建的新方法[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2001, 29(3):35-40.

[7] 冯宗炜,王效科,吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京:科学出版社,1999.

[8] NELSON B W, MESQUITA R, PEREIRA, J L G, et al. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon [J]. For. Ecol. Manage, 1999, 117(1/3):149-167.

[9] KETTERINGS Q M, COE R, NOORDWIJK M V, et al. Reducing uncertain in use of allometric biomass equation for predicting above-ground biomass in the mixed secondary forests [J]. For. Ecol. Manage, 2001, 146: 199-209.

[10] 吕晓涛,唐建维,何有才,等. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1):11-22.

[11] 刘兴良,刘世荣,宿以明,等. 巴郎山川滇高山栎灌丛地上生物量及其对海拔梯度的响应[J]. 林业科学, 2006,42(2): 1-7.

[12] PARRESOL B R, Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons[J]. For. Sci. , 1999, 45(4): 573-593.

[13] 唐守正,张会儒,胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究[J]. 林业科学,2000,36(1):19-27.

[14] CUNIA T, B R D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results[J]. Can. J. For. Res, 1984, 14(3):

376-384.

[15] CUNIA T, BRIGGS R D. Forcing additivity of biomass tables: use of the generalized least squares method [J]. Can. J. For. Res. , 1985, 15(1):23-28.

[16] WHITE J F, GOULD S J. Interpretation of the Coefficient in the Allometric Equation [J]. The American Naturalist, 1965, 99:5-18.

[17] WOODWELL G M, WHITAKER R H, REINERS W A, et al. The biota and the world carbon budget [J]. Science, 1978, 199:141-146.

[18] FANG J Y, CHEN A P , PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292:2 320-2 322.

[19] FANG J Y, WANG G G, LIU G H, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship [J]. Ecol. Appl, 1998, 8:1 984-1 991.

[20] BROWN S, LUGO A E. The storage and production of organic matter in tropical forest and their role in the global carbon cycle [J]. Biotropica, 1982, 14:161-187.

[21] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国森林植被生物量和净生产力 [J]. 生态学报. 1996, 16(4):497-508.

[22] BROWN S, LUGO A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes [J]. Science, 1984, 223: 1290-1293.

[23] ZHOU G S, WANG Y H, JANG Y L, et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's Larix forests[J]. For. Ecol. Manage, 2002, 169(2) :149-157.

[24] 王玉辉, 周广胜, 蒋延玲, 等. 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4):420-425.

[25] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8):1 468-1 472.

[26] KAUPI P E, MIELIKINEN K, KUNSELA K. Biomass and carbon budget of European forests 1971 to 1990[J]. Science, 1992, 256:70-84.

[27] TURNER D P, KOEPPER G J, HARMON M E, et al. A carbon budget for forests of the conterminous United States [J]. Ecol. Appl. , 1995, 5(2): 421-436.

[28] BROWN S, LUGO A E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of Brazilian Amazon [J]. Interciencia, 1992, 17: 8-18.

[29] SCHROEDER P, BROWN S. MO J, et al. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data [J]. For. Sci, 1997, 43: 424-434.

[30] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文 (Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(2):243-249.

[31] FANG J Y, WANG Z M. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass [J]. Ecol. Res, 2001, 16: 587-592.

[32] 冯仲科, 罗旭, 石丽萍. 森林生物量研究的若干问题及完善途径[J]. 世界林业研究, 2005, 18(3):25-28.

[33] 陈尔学. 合成孔径雷达森林生物量估测研究进展[J]. 世界林业研究, 1999, 12(6):18-23.

[34] DONG J R, KAUFMANN R K, MYNENI R B, et al. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks [J]. Remote Sens. Environ. , 2003, 84:393-410.

[35] TOMPPO E, NILSSON M, ROSENGREN M, et al. Simultaneous use of Landsat-Tm and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass [J]. Remote Sens. Environ, 2002, 82:156-171.

[36] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪. 利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量[J]. 生态学报, 2002, 22(11):1 832-1 840.

[37] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. 遥感学报, 2002 , 6(2):129-135.

[38] 郑光, 田庆久, 陈镜明, 等. 结合树龄信息的遥感森林生态系统生物量制图[J]. 遥感学报, 2006, 10(6): 932-940.

[39] FOODY G M, CUTLER M E, MCMORROW, et al. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data[J]. Global Ecology & Biogeography, 2001, 10 (4): 379-387.

[40] FOODY G M, BOYD D S, CUTLER M E, Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions[J]. Remote Sens. Environ, 2003, 85(4): 463-474.

[41] 国庆喜, 张锋. 基于遥感信息估测森林的生物量[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(2): 13-16.

[42] 戴小华, 余世孝. 遥感技术支持下的植被生产力与生物量研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23 (4):92-98.

[43] HAME T, SALLI A, ANDERSSON K, et al. A new methodology for the estimation of biomass of conifer dominated boreal forest using NOAA AVHRR data [J]. Int. J. Remote Sensing, 1997, 18 (15): 3 211-3 243.

[44] 徐新良, 曹明奎. 森林生物量遥感估算与应用分析[J]. 地球信息科学, 2006, 8(4): 122-128.

[45] 冯险峰. GIS 支持下的中国陆地生物量遥感动态监测研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2000.