

DOI: 10.11929/j.swfu.201907029

引文格式: 欧光龙, 胥辉. 森林生物量模型研究综述 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020, 40(1): 1-10.

森林生物量模型研究综述

欧光龙 胥辉

(西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室, 云南昆明 650233)

摘要: 从单木和林分两个水平系统综述了森林生物量模型特点及其构建方法, 总结了单木生物量模型的基本特点及其构建方法, 重点阐述了相容性森林生物量模型构建; 从林分生物量模型、林分生物量因子模型及林分生物量遥感估测模型三个方面对在林分水平森林生物量模型进行了总结探讨。提出了新模型技术在森林生物量模型构建中的应用、整合环境因子的高精度森林生物量模型研究、森林生物量遥感模型构建的不确定性、基于相容性模型的主要树种生物量数表的编制研究展望。

关键词: 单木; 林分; 遥感; 生物量

中图分类号: S757; S758

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2020)01-0001-10

A Review on Forest Biomass Models

Ou Guanglong, Xu Hui

(Key Laboratory of State Forestry Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China,
Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China)

Abstract: Forest biomass models were reviewed systematically at both single tree and stand scale. The basic characteristics and the main construction methods of individual biomass models were elaborated at the single tree level, especially for the construction of compatible forest biomass models. Meanwhile, the biomass models at the stand level were summarized from 3 aspects, including biomass model using stand factors, biomass factor models and stand biomass estimation using remote sensing data. Finally, we prospected the research directions of forest biomass models from 4 aspects which include new modeling technology application in constructing forest biomass models, high accuracy forest biomass models by incorporating environmental factors, uncertainties on forest biomass estimation using remote sensing data, and compilation of biomass tables for the main tree species or species groups based on compatible biomass models.

Key words: individual; stand; remote sensing; biomass

森林生物量作为森林生态系统的基本属性数据^[1-2], 其测定和估计成为森林研究及林业生产应用的热点问题。生物量模型是估算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^[3-4], 并成为森林生物量研究的一个热点领域。

本研究从单木水平上总结单木生物量模型的基本特点及其构建方法, 并重点阐述相容性森林生物量模型及其构建, 从林分生物量模型构建、林分生物量因子模型及林分生物量遥感估测模型 3 个方面对在林分水平森林生物量模型进行了总结,

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760206, 31770677, 31560209, 31660202) 资助; 林业公益性行业科研专项 (201404309) 资助; 云南省唐守正院士工作站 (2018IC066) 资助; 云南省王广兴专家工作站 (2018IC100) 资助; 云南省“万人计划”青年拔尖人才专项 (YNWR-QNBJ-2018-184) 资助。

第 1 作者: 欧光龙 (1983—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师。研究方向: 森林生物量模型。Email: olg2007621@126.com。

通信作者: 胥辉 (1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 森林生物量模型。Email: swfc213@126.com。

并对森林生物量模型研究趋势进行了展望。

1 单木生物量模型

1.1 单木生物量模型概述

全球已经建立的生物量模型超过 3 000 个, 涉及树种在 100 个以上^[5-14]。依据单木变量(自变量)个数, 可以把单木生物量模型分为一元、二元和多元生物量模型^[15-16], 一元生物量模型多选择林木胸径作为自变量, 二元生物量模型则多选择胸径和树高。但在生物量模型中, 尤其是对树枝、树叶部分生物量而言, 仅靠一个或两个自变量很难控制模型的估计精度, 因为其生长受林木大小、林分密度等因素影响较大, 欲提高模型估计精度, 可以考虑冠幅、冠长等反映林木树冠生长特征的变量, 从而构建多元生物量模型^[17]。此外, 枝下高等测树因子, 甚至一些表征林分密度和立地质量的林分因子, 以及气候因子、地形因子等环境因子也被引入模型, 进而构建环境灵敏的单木生物量模型, 从而提高了模型拟合的精度^[14, 18]。

从单木生物量模型形式来看, 大致可以分为线性、非线性和多项式模型 3 种基本类型。线性模型和非线性模型根据自变量的多少, 也可分为一元或多元模型^[3]。非线性模型应用最为广泛, 尤以相对生长模型最具有代表性, 其多以幂函数形式(相对生长方程)为基本形式^[3, 10-11, 15-16], 应用最为普遍, 常被用来建立林木生物量各维量(总量、干、皮、枝、叶、根)的独立估计模型^[3, 15]。

从单木生物量的模型结构来看, 模型结构确定是模型构建的关键^[15-16]。一般来说, 单木生物量模型结构通常可分为线性、加性误差的非线性和乘积误差的非线性 3 种类型^[19-20], 且树种类型不同、生物量维量不同, 模型结构就可能不同^[10, 21-24]。

从模型参数估计方法来看, 线性模型可用普通最小二乘法进行估计, 而非线性的模型可以采用参数估计的迭代程序^[16]; 由于林木生物量模型构建中, 普遍存在建模数据的方差不齐, 故而加权最小二乘估计方法也常应用于生物量模型参数的估计^[16], 单木生物量模型构建的参数估计方法主要包含传统回归方法^[6, 12, 25]、非线性似然不相关回归方法^[20, 26]、线性或非线性联合估计方法^[23, 27]、哑变量方法^[28-29]、混合效应模型方法^[14, 18, 30-34]、度量误差模型方法^[35-37]、空间回归方法^[38]等。

1.2 相容性生物量模型

相容性生物量模型主要包含两类, 即与材积相容的生物量模型和总量与分量相容的生物量模型。

1.2.1 与材积相容的生物量模型

由于林业调查数据多数基于材积调查, 且以前大量林业调查数据均包含林木材积或林分蓄积数据^[39], 因此建立与材积相容的生物量模型对于实现从蓄积量至生物量的转换, 有效整合生物量调查与森林蓄积量调查具有重要意义^[3, 17, 40]。与材积相容的生物量模型的建模设计主要是依据树木地上部分生物量树干占林木总生物量的绝大部分, 且树干生物量可以通过密度换算系数与树干材积来计算的基本观点, 基于传统生物量可变相对生长模型, 其通式可表达为 $m=f(D, H, Cw, Cl)$ 或 $m=f(D, H)$, 进而引进材积因子(V), 将通式变为 $m=f(D, H, Cw, Cl)V$ 或 $m=f(D, H)V$, 通过对变量逐步筛选, 获得最佳模型, 从而构建了生物量模型与树木材积的相容性模型^[3, 17, 40], 实现蓄积量至生物量兼容, 确保了森林调查的蓄积数据和生物量数据的一致性。

1.2.2 总量与分量相容的生物量模型

对于林木生物量而言, 若林木总生物量及各分量单独建模, 则会出现基于各分量模型估算值之和不等于总量模型预估值, 从而出现总量和分量模型不相容的问题, 确保各分量之和与总量相容对于生物量模型系统构建具有重要意义^[17, 23, 40-44]。为了得到更为准确的参数估计, 诸如简单最小二乘法、最大似然法、线性及非线性度量误差联立方程组、线性及非线性似乎不相关回归等估计方法, 被用于相容性生物量模型参数估计^[20, 23, 27, 45-48]。其中非线性度量误差联立方程组和非线性似乎不相关回归是最常用的估计可加性生物量模型参数的方法, 非线性联立方程组法是将各分量进行联合建模, 联立求解, 既保证了各分量生物量之间的相容性, 又能得到更优化的参数估计, 预测精度更高、稳定性更强^[47]; 而非线性似然不相关回归法是通过对各分量生物量相加解决相容性问题, 其模型形式灵活, 基于传统最小二乘的非线性比例平差法则相对较差^[48]。

此外, 在构建相容性生物量模型时, 总量和各分项生物量方程的可加性是模型形式选择的关键。对于不可加性生物量方程, 其实质是分别拟合立木总量和各分量生物量, 且总量等于各分量

之和的逻辑关系不成立；而可加性生物量方程则基于同一样木总量、各分项生物量之间的内在相关性，同时拟合总量和各分项生物量，并确保立木总生物量等于各分项生物量之和^[43-44, 48]。目前，根据模型构建思想可以将可加性相容生物量模型分为分解型可加性相容生物量模型和聚合型可加性相容生物量模型^[48]。

1) 分解型可加性相容生物量模型

分解型可加性相容生物量模型是我国使用较多的一类相容性生物量模型^[48]，该模型基于总量和各分量的独立模型，并根据分配层次的不同，提出相容的估计方案^[23]。其估计方案主要有1级比例拟合分配、2级比例拟合分配、2级代数和拟合分配3种方案^[23]。其中1级比例拟合分配（方法1）是以总量作控制，木材、树皮、树枝、树叶联合估计；2级比例拟合分配（方法2）则是先以总量作控制，树干和树冠联合估计，再分别以树干和树冠作控制，对木材和树皮、树枝和树叶分别进行联合估计；2级代数和拟合分配（方法3）则直接控制各维量之和等于总量。方法3以树干生物量为基础，将总量表述为树干和树冠生物量之和，固定树干生物量模型，联合估计总量和树干生物量，并得到树冠相容性生物量模型；随后采取树干和木材相减、树冠和树枝相减的方式来表征树皮、树叶生物量，再将分别联合估计木材和树皮生物量、树枝和树叶生物量，进而所有维量相容的生物量模型^[23]。

在3种方案中，方法1变量和参数多，模型结构相对复杂，且参数变动系数大，预估精度低于方法2，尤其是树冠、树枝和树叶生物量的预估精度大大降低；方法2、3均为2级分配控制，但前者基于总量控制，按比例系数逐级分配，后者则是以树干生物量为基础，按代数和分配。在各分量及总量的独立模型中，树干生物量模型的预估精度常高于总生物量，因此采用方法3不仅确保树干生物量较高的预估精度，还提高了总量及树冠的预估精度，且该方法的模型拟合参数变动系数较小^[23, 48]。

2) 聚合型可加性相容生物量模型

Parresol^[19-20]提出了一种聚合型非线性和线性可加性生物量模型，与分解型可加性相容生物量模型相比，该类模型系统中各分量均具有独立模型，生物量相容是通过设定总量等于各分量之和来实现。根据限制条件个数的不同，该类模型可分为单限制条件聚合型可加性生物量模型和多限

制条件聚合型可加性生物量模型，选用哪种限制条件可加性生物量模型取决于研究数据所给出的信息量^[45, 48]。单限制条件聚合型可加性生物量模型的限制条件为各分项生物量之和等于总生物量；多限制条件聚合型可加性生物量模型则除满足总量可加或相容外，如树冠、树干和地上部分等分项生物量也需要进行联合估计，确保各分项生物量也相容。其建模思想也决定了聚合型可加性生物量模型系统中没有总量，或者地上生物量、树干生物量和树冠生物量等分项的独立模型，其模型则是由各分量模型来组成^[43-45, 48]。

在两类模型的估算中，分解型模型的异方差消除方法只能用加权回归，而聚合型模型除用加权回归外，还可使用对数转换来消除异方差^[45]。聚合型可加性生物量模型似乎更好，不仅满足林木总生物量等于各分项生物量之和的逻辑关系，也符合同一样木植株与各器官之间的内在关系^[43-45, 48]。

2 林分生物量模型

2.1 基于林分因子的林分生物量模型

该方法和单木生物量模型的构建方法一致，只是在自变量和因变量上与单木水平的生物量有所不同。林分生物量模型的因变量常为林分各器官维量的单位面积生物量，而自变量则为主要选择林分总胸高断面积（Gt）、林分优势高（Ht）、林分平均高（Hm）等变量来构建林分生物量各维量模型^[49]。由于林分水平的生物量的测定很少采用皆伐获得林分实测数据，而多是基于单木生物量模型套算或选择标准木测定进而获得林分生物量数据，或者基于生物量转换因子来实现转换^[49-50]，且在林分生物量研究中基于单木数据向林分尺度数据转化过程中的不确定性分析也是研究的一个重要方面^[51-52]。

2.2 林分生物量因子模型

由于生物存在相对生长关系，因而生物量因子（Biomass factors, BFs）常常用作生物量的估算。生物量因子法作为IPCC重点推荐的生物量估测方法之一^[53-54]，广泛应用于区域森林生物量的估测，也可用于项目级森林生物量的计算，目前常用的生物量因子主要有生物量转换与扩展因子（BCEF）、生物量扩展因子（BEF）和根茎比（R）等^[14, 45, 55]。

生物量因子法的发展过程经历了平均生物量因子法和生物量因子连续函数法两个阶段。平均

生物量因子法认为某一森林类型生物量因子是固定值,但研究发现,生物量因子值不仅会随森林类型的不同而不同,且即使同类森林,其值也会随林分年龄、林分密度、立地条件、气候及其他环境因子而变化,因此采用平均生物量因子或某一恒定值估算会带来较大的估算误差^[56-67]。为了提高生物量因子估算林木生物量的准确性,降低不确定性,生物量因子连续函数法应运而生,方精云等^[62-64]认为生物量与蓄积量的关系呈连续函数变化,以蓄积量为基础数据构建了不同森林的生物量因子函数,反映了生物量因子的连续变化,从而构建了生物量因子连续函数法估算森林生物量;张会儒等^[40]将全国森林类型按照林分优势树种归并为9类,通过收集野外实测调查资料,系统构建了全国主要树种组林木与材积相容的单木生物量回归模型。

此外,由于生物量因子与林龄、胸径、树高、树干生物量等林分调查指标存在显著的相关性^[58],采用幂函数、线性函数及双曲线函数等形式也被选择用于拟合生物量因子模型,选用的自变量包括除材积或立木蓄积外,林木胸径^[49,66]、树高^[14,66,68-71]、林龄^[72]等也带入模型中,进而分析生物量因子的连续变化规律^[14,49,66-67]。在模型拟合引入的众多变量中,罗云建等^[58]在分析中国森林生态系统生物量扩展系数与林分因子关系中发现,平均树高具有最高的解释能力,可以解释地上和乔木层生物量扩展因子总变异的53.4%和57.9%;欧光龙和胥辉^[67]分析思茅松天然林林分生物量各维量的生物量扩展因子与林分因子间关系时也发现生物量因子与林分平均高的相关性最高。因此,林分因子成为生物量因子模型构建中最为广泛使用的变量^[49-50,67],当然,气候因子、土壤因子和地形因子也被用于生物量因子模型构建来进一步提高预估精度^[67]。

2.3 林分生物量遥感估测模型

由于森林群落存在森林结构和生物物理参数特征差异,可以通过遥感图像上不同的色调、结构和纹理特征来表征,通过从遥感数据中获取与森林蓄积量/生物量密切相关的遥感特征参数,实现森林蓄积量/生物量的遥感估测^[45],且遥感方法可快速、无损地对森林生物量进行估算,尤其是在区域或更大尺度上的估算及宏观监测^[45,73-82],因此成为林分生物量估算的常用方法之一。

从生物量估算的遥感数据源来看,光学遥感数据、雷达数据、激光测量数据等均可用于森林

生物量遥感估测^[74,81],且整合多数据源的遥感数据常可以提高森林生物量估算模型的预估精度^[74,80-81]。如Treuhaft等^[83]通过整合高光谱和雷达数据两类数据来测算叶面积指数和叶面积密度,进而提高了森林生物量估算精度,且认为考虑森林结构的生物量遥感估算比仅考虑微波或光学遥感的方法更精确;Basuki等^[84]分别采用混合像元分解、离散小波变换等将Landsat 7 ETM+和ALOS/PALSAR进行图像融合光学和微波图像,进而估算热带森林地上生物量,获得了更高的估算精度;王新云等^[85]采用几何光学模型和混合像元分解SMA估算贺兰山山地森林生物量,其研究结果表明该方法可有效提高其遥感估测精度。

从生物量的遥感估测方法来看,森林生物量的遥感预估方法主要包含了经验模型、物理模型、综合模型和机理模型等^[45]。经验模型是最为常用的一种林分生物量遥感估测方法,该方法根据实测样地生物量与遥感图像上提取的遥感因子变量存在的相关关系,按像元估算生物量^[74,81]。常用的遥感估算经验模型主要有线性回归模型、非线性回归模型、多元回归模型、K-最邻近分类法、人工神经网络法、支持向量机法、随机森林回归、Cubist回归等模型^[45,74,79]。一般来说,线性回归模型、非线性回归模型、多元回归模型三类模型往往是根据林木生物量和遥感因子之间的相关性,从而采用线性、非线性或多元回归的方法构建其经验模型,从而估算生物量,通过经验公式较为简单直观反映了林木生物量与遥感因子、地形因子以及林分因子间的关系;但模型精度往往不高,如要提高模型精度,需要大量样点观测数据,并且精度受树种和区域背景因子的影响^[45,74,86]。K-最邻近分类法、人工神经网络法、支持向量机法、随机森林回归、Cubist回归等回归方法采取决策树等算法进行模型拟合,在一定程度上获得了较高的模型拟合精度,但很难解释模型变量和输出数据之间的关系,不能像一般回归模型那样通过简单的经验公式直观表达^[45,74,85-86]。

从森林生物量遥感预估的精度看,由于森林生态系统自身的差异及其分布区的地形变化、遥感数据源及其空间分辨率、估算方法等都会带来森林生物量遥感估测的误差,其估算误差为5%~30%^[74,79,87-96],这就使得森林生物量遥感估测中的不确定性受到很多学者的广泛关注^[74,79,81-82,97-106]。Lu等^[74]总结发现森林生物量遥感估测的不确定性分析面临的挑战主要来自野外样地观测数据获

取, 生物量模型的预估表现的影响因素, 预估精度的空间变异等, 这就要求在森林生物量遥感预估中必须考虑这三个方面的不确定性。

值得注意的是, 由于传感器, 尤其是光学传感器图像的光谱值往往不能与森林生物量的变化以及森林复杂的林分结构相匹配, 尤其当森林生物量值较高时, 常常会造成森林生物量的估计精度不高^[45, 74, 107], 因此, 不同传感器遥感数据的饱和点被认为是造成森林生物量估计精度不高的最主要原因之一^[74, 79, 99-100]。对于森林生物量遥感估算中影像数据的饱和点往往受到很多因素的影响^[45, 74, 108-110]。它不仅受到遥感数据本身光谱分辨率、空间分辨率及辐射分辨率差异的影响, 也会因为研究对象森林植被的类型差异, 以及其树种组成和林分结构的不同, 而使得其表面反射产生变化, 从而导致不同的饱和点值^[45, 79, 99, 111]; 此外, 地形因子作为一个间接因子, 因为间接影响植被的分布、林分组成与结构, 以及林木生长, 甚至是植被所反映的光谱特征, 从而也会对饱和点的值产生影响。总之, 森林林分结构的异质性是产生森林生物量遥感估测中饱和点存在的主要原因, 也是带来不同遥感数据源的饱和点值存在差异的主要原因^[45, 79, 99, 111]。但是关于森林生物量遥感估测中遥感影像的饱和点研究多关注或者局限于基于遥感影像提取的植被指数以及纹理参数, 以及其对饱和点的影响上^[74, 112-113]。

3 研究展望

森林生物量作为森林生态系统的重要属性, 对于把握森林生态系统变化规律, 也是开展森林碳储量估算的基础; 而森林生物量模型作为森林生物量研究的重要方面受到了广泛的关注。考虑到森林生物量研究的实际情况, 并结合精度提升和模型可用性一直是模型研究永恒的主题。提出如下研究展望:

1) 新模型技术在森林生物量模型构建中的应用。目前大量的估计方法被应用到森林生物量模型的模拟中, 引进其他学科的新模型技术或探索针对于森林生物量模型中的数学问题, 一直以来, 也将是今后森林生物量模型研究的方向。

2) 整合环境因子的高精度森林生物量模型研究。目前已经构建了大量的基于森林或林木易测因子的森林生物量估测模型, 如何进一步改进模型结构, 引入环境因子等其他信息, 从而提升森林生物量模型精度, 更为准确把握森林生物量变

化规律, 实现对森林生物量的更为精确的估计。

3) 生物量遥感模型构建的不确定性。遥感技术已经被广泛应用与森林生物量的估算, 可以实现基于林分尺度生物量估计的大尺度森林生物量遥感估算, 构建更高精度的遥感估测模型对于提升遥感技术在生物量估测中的可用性至关重要。但是如何克服由遥感数据源、森林异质性、森林分布生境差异等带来的估测不确定性, 探索遥感多数据源的应用, 引入森林相关信息参与模型构建, 提升森林生物量遥感估测模型的准确性和可信度。

4) 基于相容性模型的主要树种生物量数表的编制。目前构建了大量的生物量模型, 曾伟生等编制相容性立木生物量模型构建的国家标准规范了森林生物量模型的技术操作, 同时也开展了国内主要树种的生物量数表的编制工作, 但是按照相容性模型的理念构建的树种不多。因此, 进一步扩展研究对象, 以相容性生物量模型为基础编制与材积表相容, 且总量与分量相容的林木生物量表, 提升森林生物量模型的实用性。

[参 考 文 献]

- [1] Lieth H, Whittaker R H. Primary productivity of the biosphere[M]. Berlin: Springer, 1975.
- [2] West P W. Tree and forest measurement[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2009.
- [3] 胥辉, 张会儒. 林木生物量模型研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002.
- [4] 王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 等. 森林生物量模型综述 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 58-63.
- [5] Chojnacky D C. Allometric scaling theory applied to FIA biomass estimation[R]. Minnesota: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, 2002.
- [6] Jenkins J C, Chojnacky D C, Heath L S, et al. National scale biomass estimators for United States tree species [J]. Forest Science, 2003, 49(1): 12-35.
- [7] Jenkins J C, Chojnacky D C, Heath L S, et al. Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species[R]. Pennsylvania: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 2004.
- [8] Case B S, Hall R J. Assessing prediction errors of generalized tree biomass and volume equations for the

- boreal forest region of West-central Canada [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008, 38(4): 878–889.
- [9] Muukkonen P. Forest inventory-based large-scale forest biomass and carbon budget assessment: new enhanced methods and use of remote sensing for verification[D]. Helsinki: University of Helsinki, 2007.
- [10] Zianis D, Muukkonen P, Makipaa R, et al. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe[G]//The Finnish Society of Forest Science, The Finnish Forest Research Institute. Silva Fennica Monographs 4, Tampere: Tammer-Paino Oy, 2005.
- [11] Ter-Mikaelian M T, Korzukhin M D. Biomass equations for sixty-five North American tree species [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 97(1): 1–24.
- [12] Basuki T M, van Laake P E, Skidmore A K, et al. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(8): 1684–1694.
- [13] Navar J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of Northwestern Mexico [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(2): 427–434.
- [14] 欧光龙. 气候变化背景下思茅松天然林生物量模型构建 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [15] 曾伟生, 唐守正. 利用度量误差模型方法建立相容性立木生物量方程系统 [J]. 林业科学研究, 2010, 23(6): 797–803.
- [16] 曾伟生, 唐守正. 利用混合模型方法建立全国和区域相容性立木生物量方程 [J]. 中南林业调查规划, 2010, 29(4): 1–6.
- [17] 胥辉. 一种与材积相容的生物量模型 [J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(5): 32–36.
- [18] Ou G L, Wang J F, Xu H, et al. Incorporating topographic factors in nonlinear mixed-effects models for aboveground biomass of natural Simao pine in Yunnan, China [J]. Journal of Forestry Research, 2016, 27(1): 119–131.
- [19] Parresol B R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons [J]. Forest Science, 1999, 45(4): 573–593.
- [20] Parresol B R. Additivity of nonlinear biomass equations [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(5): 865–878.
- [21] 胥辉. 立木生物量模型构建及估计方法的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 1998.
- [22] 曾伟生, 骆期邦, 贺东北. 相容性立木生物量非线性模型研究 [J]. 生态学杂志, 1999, 18(4): 19–24.
- [23] 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(S1): 19–27.
- [24] Repola J, Ojansuu R, Kukkola M. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland[C]//The Finnish Forest Research Institute. Working papers of the Finnish Forest Research Institute. Helsinki: The Finnish Forest Research Institute, 2007.
- [25] Vallet P, Dhote J, Mogueedec G L, et al. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 229(1/2/3): 98–110.
- [26] Bi H Q, Turner J, Lambert M. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia [J]. Trees, 2004, 18(4): 467–479.
- [27] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北, 等. 立木地上部分生物量模型的建立及其应用研究 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 271–277.
- [28] Zeng W S, Zhang H R, Tang S Z. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales: a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(7): 1547–1554.
- [29] Fu L Y, Zeng W S, Tang S Z, et al. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales – A case study for Masson pine in Southern China [J]. Journal of Forest Science, 2012, 58(3): 101–115.
- [30] Zhang Y J, Borders B E. Using a system mixed-effects modeling method to estimate tree compartment biomass for intensively managed loblolly pines: an allometric approach [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 194(1/2/3): 145–157.
- [31] Fehrmann L, Lehtonen A, Kleinn C, et al. Comparison of linear and mixed-effect regression models and a k-nearest neighbour approach for estimation of single-tree biomass [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008, 38(1): 1–9.
- [32] 曾伟生, 唐守正, 夏忠胜, 等. 利用线性混合模型和哑变量模型方法建立贵州省通用性生物量方程 [J]. 林业科学研究, 2011, 24(3): 285–291.

- [33] 符利勇, 曾伟生, 唐守正. 利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5797-5808.
- [34] 符利勇, 李永慈, 李春明, 等. 两水平非线性混合模型对杉木林优势高生长量研究 [J]. 林业科学研究, 2011, 24(6): 720-726.
- [35] 曾伟生, 张会儒, 唐守正. 立木生物量建模方法 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [36] 李海奎, 宁金魁. 基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型 [J]. 生态学报, 2012, 32(3): 740-757.
- [37] Zeng W S, Tang S Z. Modeling compatible single-tree aboveground biomass equations for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China [J]. Journal of Forestry Research, 2012, 23(4): 593-598.
- [38] 欧光龙, 王俊峰, 肖义发, 等. 思茅松天然林单木生物量地理加权回归模型构建 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(2): 213-218.
- [39] 李文华. 森林生物生产量的概念及其研究的基本途径 [J]. 自然资源, 1978(1): 71-92.
- [40] 张会儒, 唐守正, 王奉瑜. 与材积兼容的生物量模型的建立及其估计方法研究 [J]. 林业科学研究, 1999, 12(1): 53-59.
- [41] António N, Tomé M, Tomé J, et al. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37(5): 895-906.
- [42] 董利虎, 李凤日, 贾炜玮. 东北林区天然白桦相容性生物量模型 [J]. 林业科学, 2013, 49(7): 75-85.
- [43] 董利虎, 张连军, 李凤日. 立木生物量模型的误差结构和可加性 [J]. 林业科学, 2015, 51(2): 28-36.
- [44] 董利虎, 李凤日, 宋玉文. 东北林区4个天然针叶树种单木生物量模型误差结构及可加性模型 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 704-714.
- [45] 张会儒. 森林经理学研究方法与实践 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2018.
- [46] 胥辉, 刘伟平. 相容性生物量模型研究 [J]. 福建林业学院学报, 2001, 21(1): 18-23.
- [47] 符利勇, 雷渊才, 曾伟生. 几种相容性生物量模型及估计方法的比较 [J]. 林业科学, 2014, 50(6): 42-54.
- [48] 董利虎. 东北林区主要树种及林分类型生物量模型研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [49] 罗云建, 张小全, 王效科, 等. 森林生物量的估算方法及其研究进展 [J]. 林业科学, 2009, 45(8): 129-134.
- [50] 董利虎, 李凤日. 三种林分生物量估算方法的比较 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3862-3870.
- [51] 傅煜, 雷渊才, 曾伟生. 单木生物量模型估计区域尺度生物量的不确定性 [J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7738-7747.
- [52] 秦立厚, 张茂震, 钟世红, 等. 森林生物量估算中模型不确定性分析 [J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7912-7919.
- [53] Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, et al. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry [R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2003.
- [54] Eggleston S, Buendia L, Miwa K, et al. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories (Volume 4): Agriculture, Forestry and other Landuse [R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [55] 郑海妹, 欧光龙, 胥辉, 等. 森林生物量扩展因子研究进展 [J]. 广东农业科学, 2014, 41(20): 145-149.
- [56] Kramer H. Nutzungsplanung in set Forsteinrichtung [M]. Frankfurt: J. D. Sauerländer's Verlag, 1982.
- [57] Koehl M. Reliability and Comparability of TBFRA 2000 Result [R]. Geneva: UN-ECE/FAO, 2000.
- [58] 罗云建, 王效科, 张小全. 中国森林生态系统生物量及其分配研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [59] Brown S L, Schroeder P E. Spatial patterns of aboveground production and mortality of woody biomass for Eastern US forest [J]. Ecological Applications, 1999, 9(3): 968-980.
- [60] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. New Phytologist, 2012, 193(1): 30-50.
- [61] 罗云建, 张小全, 侯振宏, 等. 我国落叶松林生物量碳计量参数的初步研究 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1111-1118.
- [62] Fang J Y. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [63] Fang J Y, Wang G G, Liu G H, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship [J]. Ecological Applications, 1998, 8(4): 1084-1091.
- [64] 方精云, 陈安平, 赵淑清. 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.

- [65] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [66] 罗云建. 华北落叶松人工林生物量碳计量参数研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [67] 欧光龙, 胥辉. 环境灵敏的思茅松天然林生物量模型构建 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [68] Pajtik J, Konôpka B, Lukac M. Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*Picea abies*[L.] Karst) trees [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(5): 1096–1103.
- [69] Levy P E, Hale S E, Nieotl B C. Biomass expansion factors and root: shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain [J]. *Forestry*, 2004, 77(5): 421–430.
- [70] Segura M, Kanninen M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in costa Rica [J]. *Biotropica*, 2005, 37(1): 2–8.
- [71] 欧光龙, 胥辉, 王俊峰, 等. 思茅松天然林分生物量混合效应模型构建 [J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(3): 101–110.
- [72] Lehtonen A, Mäkipää R, Heikkinen J, et al. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 188(1/2/3): 211–224.
- [73] Rochow J J. Estimates of above-ground biomass and primary productivity in a Missouri forest [J]. *The Journal of Ecology*, 1974, 62(2): 567–577.
- [74] Lu D S, Chen Q, Wang G X, et al. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(1): 63–105.
- [75] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945–958.
- [76] Gibbs H K, Brown S, Niles J O, et al. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality [J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(4): 045023.
- [77] Schimel D, Pavlick R, Fisher J B, et al. Observing terrestrial ecosystems and the carbon cycle from space [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(5): 1762–1776.
- [78] Myeong S, Nowak D J, Duggin M J. A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(2): 277–282.
- [79] Ou G L, Li C, Lv Y, et al. Improving aboveground biomass estimation of *Pinus densata* forests in Yunnan using landsat 8 imagery by incorporating age dummy variable and method comparison [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 738.
- [80] Lu D S, Chen Q, Wang G X, et al. Aboveground forest biomass estimation with landsat and LiDAR data and uncertainty analysis of the estimates [J]. *International Journal of Forestry Research*, 2012, 2012: 1–16.
- [81] Wang G X, Zhang M Z, Gertner G Z, et al. Uncertainties of mapping aboveground forest carbon due to plot locations using national forest inventory plot and remotely sensed data [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011, 26(4): 360–373.
- [82] Sun H, Qie G P, Wang G X, et al. Increasing the accuracy of mapping urban forest carbon density by combining spatial modeling and spectral unmixing analysis [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(11): 15114–15139.
- [83] Treuhaft R N, Asner G P, Law B E. Structure-based forest biomass from fusion of radar and hyperspectral observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(9): 1472–1475.
- [84] Basuki T M, Skidmore A K, Hussin Y A, et al. Estimating tropical forest biomass more accurately by integrating ALOS PALSAR and Landsat-7 ETM+ data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(13): 4871–4888.
- [85] 王新云, 郭艺歌, 何杰. 基于 HJ1B 和 ALOS/PALSAR 数据的森林地上生物量遥感估算 [J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 4109–4121.
- [86] Elvidge C D, Lyon R J P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(3): 265–279.
- [87] Chen W J, Chen J, Liu J, et al. Approaches for reducing uncertainties in regional forest carbon balance [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 827–838.
- [88] Heath L S, Smith J E. An assessment of uncertainty in forest carbon budget projections [J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(2/3): 73–82.
- [89] Keller M, Palace M, Hurtt G. Biomass estimation in

- the tapajos national forest, Brazil [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 154(3): 371–382.
- [90] Chave J, Condit R, Aguilar S, et al. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 2004, 359(1443): 409–420.
- [91] Saatchi S S, Houghton R A, dos Santos Alvalá R C, et al. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 816–837.
- [92] Nabuurs G J, van Putten B, Knippers T S, et al. Comparison of uncertainties in carbon sequestration estimates for a tropical and a temperate forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 237–245.
- [93] Asner G P, Hughes R F, Varga T A, et al. Environmental and biotic controls over aboveground biomass throughout a tropical rain forest [J]. *Ecosystems*, 2009, 12(2): 261–278.
- [94] Asner G P, Hughes R F, Mascaro J, et al. High-resolution carbon mapping on the million-hectare island of Hawaii [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(8): 434–439.
- [95] Tian X, Su Z B, Chen E X, et al. Estimation of forest above-ground biomass using multi-parameter remote sensing data over a cold and arid area [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1): 160–168.
- [96] 宋巍巍, 管东生, 王刚. 地形对植被生物量遥感反演的影响: 以广州市为例 [J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7440–7451.
- [97] Gahegan M, Ehlers M. A framework for the modelling of uncertainty between remote sensing and geographic information systems [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 55(3): 176–188.
- [98] Crosetto M, Moreno-Ruiz J A, Crippa B. Uncertainty propagation in models driven by remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(3): 373–385.
- [99] Zhao P P, Lu D S, Wang G X, et al. Examining spectral reflectance saturation in landsat imagery and corresponding solutions to improve forest aboveground biomass estimation [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 469.
- [100] Zhao P P, Lu D S, Wang G X, et al. Forest above-ground biomass estimation in Zhejiang Province using the integration of Landsat TM and ALOS PALSAR data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 53: 1–15.
- [101] Wang G X, Oyana T, Zhang M Z, et al. Mapping and spatial uncertainty analysis of forest vegetation carbon by combining national forest inventory data and satellite images [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(7): 1275–1283.
- [102] Gonzalez P, Asner G P, Battles J J, et al. Forest carbon densities and uncertainties from lidar, QuickBird, and field measurements in *California* [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1561–1575.
- [103] Olofsson P, Foody G M, Stehman S V, et al. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129: 122–131.
- [104] Rocchini D, Foody G M, Nagendra H, et al. Uncertainty in ecosystem mapping by remote sensing [J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 50: 128–135.
- [105] Zhang G, Ganguly S, Nemani R R, et al. Estimation of forest aboveground biomass in *California* using canopy height and leaf area index estimated from satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 151: 44–56.
- [106] Montesano P M, Nelson R F, Dubayah R O, et al. The uncertainty of biomass estimates from LiDAR and SAR across a boreal forest structure gradient [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154: 398–407.
- [107] Foody G M, Boyd D S, Cutler M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 463–474.
- [108] Foody G M, Cutler M E, McMorrough J, et al. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(4): 379–387.
- [109] Reese H, Olsson H. C-correction of optical satellite data over alpine vegetation areas: A comparison of sampling strategies for determining the empirical c-parameter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(6): 1387–1400.
- [110] Zhu X L, Liu D S. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-

- series [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 102: 222–231.
- [111] Lu D S, Batistella M. Exploring TM image texture and its relationships with biomass estimation in rondonia, Brazilian Amazon [J]. Acta Amazonica, 2005, 35(2): 249–257.
- [112] Kelsey K, Neff J. Estimates of aboveground biomass from texture analysis of landsat imagery [J]. Remote Sensing, 2014, 6(7): 6407–6422.
- [113] Dube T, Mutanga O. Investigating the robustness of the new Landsat-8 Operational Land Imager derived texture metrics in estimating plantation forest above-ground biomass in resource constrained areas [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 108: 12–32.

(责任编辑 陆 驰)

