

森林地上生物量估测方法研究综述

张 志¹ 田 昕² 陈尔学² 何祺胜³

(1 国家林业局调查规划设计院 2 中国林业科学研究院资源信息研究所 3 河海大学地球科学与工程学院地理信息科学系)

摘要: 根据所采用数据源的不同,介绍了当前国内外森林地上生物量测算中所用的主要方法,即基于森林资源清查的方法和基于遥感估测的方法。根据国内外前期研究成果,概括了这两种方法的特点及其存在的一些不足,初步探讨了结合多源数据联合估测森林地上生物量的方法。结合当前森林地上生物量研究中存在的问题,讨论了估测方法的尺度、模型与参数化以及精度与验证的问题,最后提出了今后森林地上生物量研究中应重点开展的工作。

关键词: 森林地上生物量; 森林资源清查; 遥感; 估测方法

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2011)05-0144-07

ZHANG Zhi¹; TIAN Xin²; CHEN Er-xue²; HE Qi-sheng³. **Review of methods on estimating forest above ground biomass.** *Journal of Beijing Forestry University* (2011) 33(5) 144-150 [Ch, 41 ref.]

1 Academy of Forestry Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing, 100714, P. R. China;

2 Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

3 Department of Geographical Information Science, School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, P. R. China.

According to the data source used, the major methods globally used to estimate forest above-ground biomass were introduced in this paper. The methods can be categorized into forest inventory data based method and remote sensing based method. Based on previous studies conducted in China and abroad, we summarized the characteristics and the deficiencies of these two kinds of methods and then preliminarily explored the synergetic method in estimating forest aboveground biomass using multi-source data. In accordance with the deficiencies of estimation methods, some discussions about the scale, parameterization and validation of the models were given and some work concerning the estimation of forest aboveground biomass in the future was stressed.

Key words forest biomass above ground; forest inventory; remote sensing; estimation method

森林是陆地生态系统的重要组成部分,是最大的陆地碳库,储存了大约 80% 的地表碳和 40% 的地下碳,而森林生态系统碳库的大小与系统生物量直接相关。2007 年 6 月我国发布了《中国应对气候变化国家方案》。这是中国第一份应对气候变化的政策性文件,也是发展中国家在该领域的第一份国家方案^[1]。该方案把林业纳入中国减缓和适应气候变化的重点领域。为积极配合该方案,经过两年多的编制,国家林业局于 2009 年 11 月发布了《应对气

候变化林业行动计划》,该计划确定了包括坚持增加碳汇和控制排放相结合的原则以及保持森林碳汇能力相对稳定的阶段性目标^[2]。作为“亚太森林恢复与可持续管理网络”和“亚太空间合作组织”的发起和领导者,为了更好地履行各种国际环境公约,特别是在未来国际“碳”贸易谈判中处于有利地位,及时准确地获取区域森林生物量计量信息已成为我国当前的重大需求之一,也为减少砍伐森林和森林退化导致的温室气体排放(REDD) 计划的评估

收稿日期: 2011-03-29

基金项目: 中央级公益性科研院所基金重点项目(IFRIT200902)。

第一作者: 张志,工程师。主要研究方向: 森林经理。电话: 010-84238072 Email: zhangzhibjfu@163.com 地址: 100714 北京市和平里东街 18 号国家林业局调查规划设计院工程咨询设计处。

责任作者: 田昕,助理研究员。主要研究方向: 林业遥感。电话: 010-62889804 Email: tianxin@caf.ac.cn 地址: 100091 北京市海淀区东小府 2 号中国林业科学研究院资源信息研究所。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

提供支持,有助于政府制定有关的林业和土地利用政策,对我国的经济发展和政治地位提升具有实际指导作用。当前,森林生物量估算已成为森林可持续经营、生态水文模拟、木材管理、森林生态系统生产力评估、碳汇和森林在全球碳循环中的地位研究等学科中重要研究课题。

1 森林生物量/碳储量

国际气候变化研究委员会(IPCC)对农业、林业和其他土地利用行业(AFOLU)的碳库作了明确的界定。森林碳储量是包括根系、土壤碳储量、地上植被部分以及森林凋落物中的碳储量,而森林生物量的定义为“包括地上、地下的,活的有机质,如树木、农作物、草、枯枝落叶、根系等”。地上生物量是指所有的地上活物质,包括树干、树桩、树枝、种子和叶;地下生物量是指除直径小于2 mm的细根以外的所有活着的根和其他土壤有机质。森林生物量计算公式为: $BT = BA + BB$, 式中: BT 为整体生物量, BA 和 BB 分别指地上生物量和地下生物量。

森林生物量的数量变化是受多种因素影响的,如土地利用、地表覆盖、土地经营、生态系统干扰、气候变化、 CO_2 增加和氮肥施用等。森林碳储量的估测研究普遍采用基于森林生物量的计算方法,即直接或间接测定森林植被的生产量与生物现存量,再乘以生物量中碳含量百分比推算而得,并且在森林生物量研究中,目前主要针对占据了森林生态系统所积累生物量绝大部分的地上生物量。因此本文着重介绍目前国内外森林地上生物量的两种基本估测方法:基于森林资源清查的方法和基于遥感估测的方法。

2 基于森林资源清查的方法

基于森林资源清查的方法是利用森林调查这一常用手段,进行高密度样地调查,获取森林调查数据(如树种、垂直结构、林分高度和林分密度等),建立树种单木异速生长方程,从而测算各级尺度的森林地上生物量。因此各类型树种的单木异速生长方程是推算森林地上生物量的基础。根据模型所用参数,可将异速生长方程分为3种:经验模型,半经验模型以及理论模型。经验模型需要通过收获法来对生长方程进行参数化;后两者依赖于分形几何分析,通常假设存在常数指数关系,因此在应用之前需谨慎进行测试。常规收获法首先依据所选的样地标准木进行树木结构参数测量;然后将砍伐后的标准木各结构组织(干、枝、叶、果实等)进行实验室相关参数测定,如木质比质量、鲜/干比质量

等;最后对该树种生长方程进行拟合。在收获法中一般采取3种样木选择方法:皆伐法、平均木法和相对生长法。

结合森林资源调查数据以及各类型树种的异速生长方程,就可对样地尺度、小班尺度来进行森林地上生物量的估测。其中一些测算方法已经被广泛运用,这些方法主要有平均生物量法(MBM)、生物量扩展因子法(BEFM)、连续生物量扩展因子法(CBEFM)和IPCC法等,但采用不同方法,对同一地域森林地上生物量的研究结果却存在一定差别。

2.1 平均生物量法(MBM)

平均生物量法是指基于野外实测样地的平均生物量与该类型森林面积来求取森林生物量的方法^[3]。其具体测算生物量的公式为: $B = \bar{B}A$, 式中: \bar{B} 是平均生物量密度, A 是森林面积。

该方法在点的测算精度较高,适用于小面积林分的测算,大面积森林生物量测算难以保证结果的准确性。

2.2 生物量扩展因子法(BEFM)

在早期生物量研究中,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^[4-5]。其具体测算生物量的公式为: $B = V \cdot BEF$, 式中: V 为树干材积; BEF 为林分生物量与木材材积的转换因子。

Brown等^[6]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和50 t/hm²。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。说明将 BEF 取作常数不符合实际情况,不能用于精确估算大尺度森林生物量。

2.3 连续生物量扩展因子法(CBEFM)

为了克服将 BEF 取作常数的不足, Brown等^[7]利用幂指数函数来表示 BEF 与林分材积(x)的关系,即 $BEF = ax^{-b}$, 式中: a 、 b 为常数。但将这种由实测资料建立的 BEF 值与材积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。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^[8]。

方精云等^[9-10]基于地面调查数据,利用一次导数关系式来测算 BEF ,称之为 $CBEF$,其计算公式为: $BEF = a + b/x$, 式中: a 和 b 是表示特定森林类型或森林组的常数。相关研究表明,这一简单的数学关系符合生物的相关生长理论,几乎适合所有的森林类型,具有普遍性,可实现由样地调查向区域推

算的尺度转换。Guo 等^[10]通过对中国主要森林类型的补充调查,对相关方法的测算参数进行了更新。

2.4 IPCC 法

IPCC 法是通过商用蓄积量,借助一个转换因子,来测算地上生物量及其变化方法^[11]。其应用主要是通过以下两个途径:一是通过立木蓄积、蓄积年净增加量或木材采伐量中的商品材材积(干质量)来推算树木、林分 and 森林的非商品材蓄积量,这时转换因子(BEF)是没有量纲的质量转换系数。在应用 BEF 之前,必须乘以基本木材密度(D),将商品材材积转换为干质量。如应用区域的基本木材密度是已知的,由于 BEF 决定于干质量,因此这种方法的应用效果很好。二是利用转换参数(BCEF),直接将立木蓄积、蓄积年净增加量或木材采伐量转换为地上生物量、地上生物量增长量或生物量消耗量。这样可以更加方便的直接应用森林调查数据和日常经营记录,而不需借助基本木材密度。当 BCEF 由应用区域的商品材材积确定时,将会有很好的应用效果。但在用 $BCEF = BEF \cdot D$ 测算 BCEF 时,应注意基本木材密度和生物量转换因子是相关的。如果用同一批样木来确定 D 、BEF 或 BCEF 时,转换不会引入误差。然而,当基本木材密度不确定时,转换可能会引起误差,导致 BCEF 对应一个确定的基本木材密度。理想情况下,所有转换和扩展因子应测算出来或经过应用区域的适用性检验。

IPCC 在其技术报告中,给出了森林生物量的详细测算标准,并定义了第 1~3 层的测算因子和扩展系数。通常,采用更高层的方法可提高调查的精确性,减少不确定性,但更高层的方法也意味着复杂性和调查所需资源的增加。有些情况下,可采用多层方法的组合,如用第 2 层方法测算生物量,用第 1 层方法测算土壤碳储量。但在我国利用 IPCC 法估算森林生物量,还存在一些问题,如我国森林资源清查没有对被管理的或受人为干扰森林的有关信息进行统计。同时 IPCC 提供的默认参数,多来自欧洲和北美,不适用于我国的情况,尽管我国已经开展了许多研究工作,测定了大量的数据,但大多数参数的不确定性仍很高^[12]。

3 基于遥感估测的方法

随着遥感技术的发展,在各种尺度上,多源遥感数据已经作为一种替代手段来进行定量化森林地上生物量/碳储量。然而在景观异质性较强的地区(如地形、环境因素、树种、样地密度、冠层郁闭度等的差异),森林地上生物量/碳储量的估测存在着

复杂的难以解决的问题。在各种遥感估测的方法中,最常用到的是基于回归的方法,即利用多光谱卫星遥感数据及其相关的植被指数与森林样地生物量建立经验关系。另外,基于冠层反射率的反演模型为森林样地结构与地形、卫星入射角、地面属性以及卫星数据辐亮度等之间建立了更具有物理意义的联系。近年来,由于采用较常规统计方法更为灵活的假设,一些基于非参数的方法,如 k -近邻法、支持向量机、人工神经网络方法被用来估测森林地上生物量。

3.1 基于光学遥感数据反演森林生物量

在遥感数据应用方面,国内外对用光学数据进行地上生物量反演都进行了大量的研究。Curran 等^[13]发现 TM 数据的红光、近红光波段与叶生物量较为敏感。Hame 等^[14]基于森林样地数据构建了 TM3、TM4 数据的波段及它们的组合与森林蓄积量的关系,将用该经验模型应用到 NOAA/AVHRR 数据的 AVHRR1 和 AVHRR2 波段,进而估算了芬兰北部地区的森林碳储量分布。Jong 等^[15]采用对数/指数非线性变换,增强了它们的关系。Dong 等^[16]基于生长期内 NOAA-VHRR 数据计算的累积植被指数值,进行与森林生物量回归拟合,估测了 6 国(加拿大、芬兰、挪威、俄罗斯、美国和瑞典)省级的生物量总量。在国内,邢素丽等^[17]研究了利用 LANDSAT ETM+ 数据估测落叶松(*Larix* sp.)林生物量的方法,建立了其与 LANDSAT ETM+ 数据的回归模型。通过敏感性分析,对落叶松林生物量最具影响的因子是 ETM+3,二者存在双曲函数关系,而 ETM+3 的倒数与生物量呈直线相关。国庆喜等^[18]在大兴安岭南坡,利用 LANDSAT TM 数据,基于森林清查样地数据建立了多元回归关系,进而构建了 TM 各波段及其植被指数(如归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)和环境植被指数(EVI))与森林生物量之间的光谱模型。

3.2 基于 SAR 数据反演森林生物量

作为主动遥感,合成孔径雷达卫星数据的应用也非常广泛。20 世纪 80 年代起,多种星载和机载 SAR 传感器研制成功后,SAR 数据已被广泛用于植被生物量的估测。Sader^[19]基于机载 AIRSAR 的 L-波段数据进行了森林生物量制图的研究,发现长叶松(*Pinus palustris*)和湿地松(*P. elliotii*)的地上生物量与 HV 极化相关系数为 0.76。Le Toan 等^[20]基于多波段(L 以及 P-波段)多极化(VH/HH/VV 极化)的 AIRSAR 进行了森林生物量估测研究,结果表明 P-波段的 VH、HH、VV 极化与反演结果的相关系数分别为 0.95、0.90、0.88。Imhoft^[21]利用 MIMICS 模

型和代表了热带和亚热带阔叶林森林冠层生物学统计数据,对生物量水平相同而结构显著不同的森林的雷达回波强度进行了研究,更加深入地分析了林分结构对生物量估测的影响。Castel等^[22]通过模型校正由于地形起伏引起的角度影响,通过对地形的校正,可以得到与平地上近似的结果。但是此模型对于当地入射角小于 10° 和大于 80° 的地形条件不适用。在用SAR估测森林生物量时,经常遇到的一个问题是地形对SAR信号的影响。地形对SAR信号的影响及其纠正是一个非常复杂的问题^[23]。

3.3 基于激光雷达数据反演森林生物量

由于其具有高效的测量三维结构信息的能力,激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)已经被成功的应用到森林参数反演中,尤其在估测林木高度及林木空间结构方面具有独特的优势。而国内由于受数据源的限制, LiDAR数据在林业中的应用研究处于起步阶段。国外已经就激光雷达在林业上的应用进行了大量成功的尝试, Aardt等^[24]采用低密度的激光雷达点云数据来反演林分平均高和林分蓄积量,方法是首先得到归一化的点云数据,然后对点云数据的均值,变差系数,峰度,最大最小值,高度分位数等统计量进行计算,最后分阔叶和针叶林建立点云统计量和森林生物量的多元线性回归方程。Bortolot等^[25]在单木识别的基础上估测了森林生物量,对样地内识别树高的25%、50%、75%分位数与生物量进行回归分析,用回归方程来估测区域的生物量。结果表明,实际和预测地上生物量之间的相关性范围在0.59和0.82之间, RMSE在13.6和140.4 t/hm²之间,估计生物量时包括了胸径最小的树。Hall等^[26]使用LiDAR点云数据估测了美国中部科罗拉多州山区森林的生物量。Thomas等^[27]使用不同采样密度LiDAR点云数据估测了加拿大安大略省北方混交林生物量。结果表明,高采样密度和低采样密度的分位数模型与平均地上生物量之间的相关性都很好(R^2 分别为0.91和0.92)。

3.4 多源遥感数据协同反演森林生物量

Wulder等^[28]利用波形数据与ETM进行了大区域的森林制图研究。Anderson等^[29]将LiDAR与高光谱数据结合进行区域制图。孙国清等^[30]利用激光雷达和多角度频谱成像仪数据估测森林垂直参数,主要使用了LVIS、AirMISR和GLAS数据。通过对GLAS树高的测量与GLAS像元内来自LVIS的平均树高对比,发现存在高度相关性。Smith^[31]对比了LiDAR数据和SAR数据在估测森林蓄积量方

面的研究。Lucas^[32]分析了LiDAR数据在分析森林结构在SAR影像上的表征。Peter等^[33]分析了LiDAR、SAR、InSAR 3种传感器系统预测森林生物量的精度问题以及LiDAR与SAR/InSAR结合与是否能产生更精确的结果。Ross^[34]结合VHF-RaDAR体散射和LiDAR改进很少, LiDAR系统对于森林生物量的估计已经达到相当高的精度。通过光学数据与SAR数据融合处理, Alprone^[35]提高了分类精度进而获取到更多的森林结构参数信息。Holmström等^[36]将k-近邻方法用于森林蓄积量和林分树龄估测,研究结果指出基于多源数据的估测结果精度比任何单一数据源都高。

综上所述,这些多源遥感数据在估测森林地上生物量/碳储量存在着几点差异,如费用、空间分辨率、适用性和连续性。光学遥感对其较为直观、敏感,但其主要获取森林植被的光谱信息,只能用于提供森林水平分布的详细信息而很难提供垂直分布的信息,而且光谱信号在较低的生物量/碳储量水平上即饱和。SAR具有全天候的特点,对森林冠层有一定的穿透性,波长越长穿透性越强,不同波段反映了不同冠层深度的信息,不同的传感器反映了森林不同层面的信息,但SAR信号很大程度依赖于地形和电磁波波长。航空极化干涉SAR可以获取到精确的三维结构信息,然而由于技术原因,我国目前还未能实现真正意义的广泛应用。激光雷达能获取高精度的森林垂直结构信息,在森林结构参数提取和森林资源管理中起到了重要的作用。但目前星载LiDAR只有美国宇航局(NASA)的ICESAT-GLAS,它主要研究高纬度地区冰雪和植被,而且对地球上森林植被的观测的重访频率需要增加。目前广泛使用的激光雷达仍然是机载激光雷达,其最为高效亦最为昂贵。因此与被动光学遥感、主动SAR遥感相比,激光雷达数据在时空分布上不具备优势。

森林生态系统的复杂性确定了必须采用森林资源清查数据、遥感数据等多源数据融合的方法来获取森林地上生物量信息,这是同时达到大面积全覆盖和较高估测精度的最佳方法。当前遥感领域特别注重发展数据融合、协同反演、数据同化等技术。因此利用多源数据进行森林参数估测,实际上就是在专题产品的生产和质量检验中充分应用地面实况数据。基于先进的机器学习算法估测森林地上生物量正是结合了遥感影像信息、产品(LAI, 覆盖度等),区域环境变量(地形,降雨等)以及森林资源清查数据。最具代表性的学习机包括k-近邻法,支持向量机(SVM)等。

k-近邻法是一种非参数统计方法,此算法是一个理论上比较成熟的方法。Tomppo^[37]基于样地资料(MS-NFI)将k-近邻法方法应用到芬兰国家森林资源清查,提出了MS-NFI技术(oMS-NFI),估测结果能够满足应用要求。利用k-近邻法方法进行森林蓄积量的遥感估计反演在一些寒带国家和地区(例如芬兰、挪威、美国北部等)得到了广泛的开展。国内至今只有少数一些报道将k-近邻法算法用于遥感森林生物量的估测。支持向量机(SVM)是在统计学习理论的基础上发展起来的一种机器学习方法,是数据挖掘的一种新方法,广泛用于分类问题和回归问题。在回归问题中的支持向量机被称为支持向量回归机。近年来,虽然支持向量回归机在其他领域已得到了广泛研究,如金融预测、传染病暴发等等,但是用于遥感地球生物物理参数特别是森林参数估测的研究却属于刚刚起步阶段,特别是森林生物量的估测,尚属空白。

4 不确定性分析

不确定性分析评价是森林资源评估的一个重要环节,也是将这些信息为国家政策的制定服务的必须环节。当利用复杂的模型方法来作为政策或经营管理活动的基础时,重要的是要保持这些方法的一致性,可验证性以及透明性。因此,模型方法的验证建议采用敏感性分析,专家评审等。IPCC^[11]推荐了一些技术、方法来发展评估温室气体报告,这些技术及方法同样也可集成应用到森林地上生物量/碳储量的估测。这些评估依据可来自实地测量数据,公开发表的数据,建模方法以及专家论证等。在这些方法中,常用到蒙特卡洛模拟建模方法,在此模型中变量被假设某种概率分布而不是单一的确定值。当模型运行多次后从可能的分布中抽取可能的变量值。比如,IPCC^[11]为模型模拟定义了一系列总体分布函数,模型多次运行后提供的是结果的分布区间,这样就允许结果值是在这个区间变动。另外一些经验可来自别的评估方法。当用相对量(比如与相对平均估测的比值)来表述不确定时,在较小水平的碳库中往往会偏高。同样,对于地理空间范畴意义上的大、小子集也存在这样的问题。比如,在国家级尺度上的森林资源清查数据存在较小的相对偏差^[38]。Kim等^[39]描述了当从区县到国家进行评估时如何利用减小变异系数(跟置信区间相关)减小估测结果的误差传递。在上述这些例子中,生物量估测需借助置信空间来进行不确定性表述。空间建模同样可以用来表征模型模拟结果或专题图的不确定性。这样,不确定性的空

间格局和联系能得以体现,反过来可以进一步理解模型从而提高估测结果,如Blackard^[40]利用误差百分比图来描述生物量估测结果差异的地理空间分布。

5 结论与讨论

总体来说,森林地上生物量估测发展趋势表现在如下两个方面:首先是由不同尺度的光学遥感提取植被指数、地物类型、LAI、覆盖度等产品,然后用于森林生物量的估测;其次是将森林样地数据、光学遥感产品与LIDAR、SAR数据综合应用于地上生物量的估测。但由于森林生态系统的复杂性、时空异质性以及内部联系,要精确估测森林地上生物量存在不可避免的难度,具体如下。

5.1 尺度问题

森林类型的多样性决定了森林地上生物量在各个尺度上的差异,单一模型或算法在特定区域符合某一树种生物量测算要求,但在不同地理种源,自然地带有出现较大的差异。现阶段的森林生物量估测在小尺度上获得的数据是比较可靠的(如固定样地,林分尺度上),而区域、省级乃至国家尺度的森林地上生物量估算一般以森林资源连续清查数据为基础,通过结合遥感技术,环境梯度分析,将获取到的生长方程进行生物量计算,根据样地生物量计算结果,进行空间插值获取得到。但由于这种中、大尺度上森林生态系统内部的异质性较强,森林植被在遥感影像上表现各异(分辨率各异、同物异谱、同谱异物、信号饱和等),自然、地理环境梯度复杂,采用不同插值方法都会造成估算结果存在很大的差异。同时这些数据的多源化必然导致数据尺度的多样性,因此和多源数据应用伴随的多源数据尺度转换问题也成了当前的发展趋势和研究热点。这样造成森林地上生物量的估算存在着很大的不确定性,消除这种不确定性的基本途径是提高多源数据的质量;如发展基于不同环境梯度下的各类型单木、样地以及林分尺度的生长方程,通过以实地测量数据检验,优化生物量计算模型,为综合森林资源清查数据,多源遥感技术,地学统计等多学科知识,因时、因地的改善生物量模型测算方法和尺度扩展方法提供基础。

5.2 模型及其参数问题

我国南北纬度横跨多个气候带,分布着多种森林植物带,IPCC提供的默认参数,多来自欧洲和北美,且以气候带和森林类型为依据,不适宜我国复杂多变的森林生态系统生物量估测^[12]。各种估算模型及其使用的参数并不一致,没有形成统一标

准。因此,应针对我国各级森林资源清查资料和生物量实测数据,整合出一套符合我国林业发展现状的参数标准。其次,构建、优化我国各主要森林类型地上生物量估算参数与林分调查指标的函数关系^[38]。最后,分析和量化森林生态系统以外的干扰因素对生物量估算参数的影响程度。但我国的森林资源清查数据往往只给出森林转化数据,没有森林与其他各地类的详细转化描述,森林内部之间类型的转换也无从查询。因此还应建立起完整的有关森林生物量变化过程的资料记录。

5.3 精度及其验证问题

不同时期的研究,采用不同的测算方法和手段所得出的估算结论存在较大的差异。而森林系统的特殊性,决定了地面真实验证的困难。收获法虽然可以最大准确度地验证估算结果,但对森林生态系统的破坏性大,因此不能应用到多尺度的验证中。并且基于遥感技术估算结果的验证也只能借助常规抽样调查或存档的森林资源清查资料,样地的布设需科学、合理并具有代表性。这种相对资源清查数据的对比只是一个“无真实值”交叉验证。我国森林有关的数据是按省或地区统计的,由于各省或地区的林业发展程度不同,这些数据的质量也存在较大的差异。

综上所述,为提高森林地上生物量的估算精确性,建议业务化开展以下工作:布设永久样地,用来测量主要碳库生物量的变化,样地需覆盖所有森林类型,包括乔木林、灌木林、稀树草原和山地森林等;确定活立木生物量组成部分和其他碳库(如枯立木、枯枝落叶、土壤碳贮量)与较容易测量变量(如胸径)相关的生长方程及因子;并通过收获法抽样,整合并检验已有文献报道的各类树种的相关生长方程;通过地面生物量样地的实测值和监测分类体系,借助遥感和GIS来建立一个合适的算法,来进行森林类型制图并且及时监测森林覆盖或类型改变;建立一个综合信息系统,从而实时为提出增加我国森林生态系统固碳、减少碳排放的对策及相应技术提供科学依据,为REDD定期提供关于森林生物量和地表覆盖改变的报告。

参 考 文 献

- [1] 中国国家发展和改革委员会. 中国应对气候变化国家方案 [EB/OL]. (2007-06) [2011-03-15]. <http://www.ccchina.gov.cn/WebSite/CCChina/UpFile/File189.pdf>.
- [2] 国家林业局. 应对气候变化林业行动计划 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [3] 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): 1468-1472.
- [4] 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(5525): 2320-2322.
- [5] KAUPPI P E, MIELIKINEN K, KUNSELA K. Biomass and carbon budget of european forests 1971 to 1990 [J]. *Science*, 1992, 256(5053): 70-84.
- [6] BROWN S, LUGO A E. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes [J]. *Science*, 1984, 223(4642): 1290-1293.
- [7] BROWN S, LUGO A E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon [J]. *Interclencia*, 1992, 17(1): 8-18.
- [8] 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.
- [9] FANG J Y, WANG Z M. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass [J]. *Ecological Research*, 2001, 16(3): 587-592.
- [10] GUO Z D, FANG J Y, PAN Y D, et al. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1225-1231.
- [11] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Hayama, Japan: IPCC/IGES, 2006.
- [12] 张小全, 朱建华, 侯振宏. 主要发达国家林业有关碳源汇及其计量方法与参数 [J]. 林业科学研究, 2009, 22(2): 285-293.
- [13] CURRAN P J, DUNGAN J L, GHOLZ H L. Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39(1): 3-13.
- [14] 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]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 18(15): 11-32.
- [15] JONG S M, PEBESMA E, LACAZE B. Above-ground biomass assessment of mediterranean forests using airborne imaging spectrometry [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(7): 1505-1520.
- [16] DONG A J, 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 Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 393-410.
- [17] 邢素丽, 张广录, 刘慧涛, 等. 基于 Landsat ETM 数据的落叶松生物量估算模式 [J]. 福建林学院学报, 2004, 24(2): 153-156.
- [18] 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.
- [19] SADER S. Forest biomass, canopy structure, and species composition relationships with multipolarization L-band synthetic aperture radar [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1987, 53(2): 193-202.
- [20] LE TOAN T, BEAUDOIN A, RIOM J, et al. Relating forest biomass to SAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 403-411.
- [21] IMHOFF M L. Radar backscatter and biomass saturation: Ramifications for global biomass inventory [J]. *IEEE Transactions*

- on *Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 511–518.
- [22] CASTEL T, BEAUDOIN A, STSCH N, et al. Sensitivity of Space-borne SAR data to forest parameters over sloping terrain theory and experiment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2351–2376.
- [23] LUCKMAN A, BAKER J, HONZAK M, et al. Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR: Seasonal variation, confidence limits, and application to image mosaics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 63(2): 126–139.
- [24] AARDT J A N, WYNNE R H, ODERWALD R G. Forest volume and biomass estimation using small-footprint Lidar-distributional parameters on a Per-Segment Basis[J]. *Forest Science*, 2006, 52(6): 636–649.
- [25] BORTOLOTT Z J, WYNNE R H. Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data ISPRS [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2005, 59(6): 342–360.
- [26] HALL S A, BURKE I C, BOX D O, et al. Estimating stand structure using discrete-return lidar: An example from low density, fire prone ponderosa pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 208(1–3): 189–209.
- [27] THOMAS V, TREITZ P, MCCAUGHEY J H, et al. Mapping stand-level forest biophysical variables for a mixedwood boreal forest using lidar: An examination of scanning density[J]. *Can J For Res*, 2006, 36(1): 34–47.
- [28] WULDER M A, HAN T, WHITE J C, et al. Integrating profiling LIDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007(11): 123–137.
- [29] ANDERSON J E, PLOURDE L C, MARTIN M E, et al. Integrating waveform lidar with hyperspectral imagery for inventory of a northern temperate forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1856–1870.
- [30] 孙国清, RANSON K J, 张钟军. 利用激光雷达和多角度频谱成像仪数据估测森林垂直参数[J]. *遥感学报*, 2006, 10(4): 523–530.
- [31] SMITH G, PERSSON A, HOLMGREN J. Forest stem volume estimation using high-resolution Lidar and SAR data[C]//IEEE. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002) /24th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Toronto, Canada: IEEE, 2002: 2084–2086.
- [32] LUCAS R, LEE A, WILLIAMS M. The role of LiDAR data in understanding the relation between forest structure and SAR imagery[C]//25th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2005). Seoul, South Korea: IEEE, 2005: 2101–2104.
- [33] PETER H, ROSS N, DAN K, et al. Exploring LiDAR-RaDAR synergy-predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 28–38.
- [34] ROSS F, NELSON P H, PATRICK J, et al. Investigating RaDAR-LiDAR synergy in a north Carolina pine forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(1): 98–108.
- [35] ALPRONE L. Landsat ETM+ and SAR image fusion based on generalized intensity modulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2832–2839.
- [36] HOLMSTRÖM H, FRANSSON J E S. Combining remotely sensed optical and radar data in k-NN estimation of forest variables[J]. *Forest Science*, 2003, 49(3): 409–418.
- [37] TOMPPA E. Satellite imagery-based national inventory of Finland[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1991, 28(7–1): 419–424.
- [38] REAMS G A, SMITH W D, HANSEN M H, et al. The forest inventory and analysis sampling frame[C]//BECHTOLD W A, PATTERSON P L. *The enhanced forest inventory and analysis program-National sampling design and estimation procedures*. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station General Technical Report, 2010: 11–26.
- [39] KIM M K, MCCARL B A. Uncertainty discounting for land-based carbon sequestration[J]. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 2009, 41: 1–11.
- [40] BLACKARD J A, FINCO M V, HELMER E H, et al. Mapping U. S. forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 1658–1677.
- [41] 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.

(责任编辑 赵 勃)