

遥感技术估算森林生物量的研究进展

李德仁¹ 王长委^{1,2} 胡月明² 刘曙光³

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 华南农业大学信息学院,广州市五山路 486 号,510061)

(3 美国地质勘探局地球资源观测和科学数据中心,美国苏福尔斯市 252 号街道,57198)

摘 要:从单传感器和多传感器遥感数据集成两个方面介绍和阐述了遥感技术估算森林生物量的发展现状,以此提炼遥感技术估算森林生物量研究面临的问题。

关键词:生物量;遥感;估算

中图法分类号:P237.9

森林生物量是森林生态系统固碳能力的重要指标,它又和森林生态系统的碳源和碳汇息息相关,准确地估算大区域森林生物量对研究陆地生态系统碳循环具有重要意义。遥感具有宏观、综合、动态、快速、可重复等特点,其波段信息和森林生物量结构具有一定的相关性,已经成为区域森林生物量估算的主要方法。本文根据目前遥感技术的发展现状,从单传感器和多传感器角度论述了遥感技术估算森林生物量的发展现状。

1 单传感器遥感影像估算森林生物量研究现状

1.1 光学遥感估算森林生物量

1.1.1 低分辨率光学遥感估算森林生物量

低分辨率光学遥感影像常用来研究全球、大陆或者国家区域的大尺度森林生物量。文献[1]根据 MODIS 数据和 FIA 调查数据估算了美国密歇根州、明尼苏达州和威斯康星州 3 个州的森林生物量;文献[2]采用 AVHRR 数据估测了南非克鲁格国家公园的森林生物量;文献[3]根据 MODIS 数据监测了巴西圣保罗州的桉树的生物量变化。

1.1.2 中分辨率光学遥感估算森林生物量

中分辨率光学遥感数据可以更加准确、方便地提取森林生态系统的林种、群落特征等信息。

文献[4]利用 Landsat ETM 数据的植被指数和波段值估算了孟加拉国东南部热带森林的生物量。文献[5]通过对比不同时期阿根廷 LandSat ETM 数据的植被指数,发现植被指数和生物量在干旱季节的相关性比较强,在夏季和冬季比较差。文献[6]利用 SPOT 数据的 NDVI 构建树冠反射模型估算山区森林生物量。

1.1.3 高分辨率光学遥感估算森林生物量

高分辨率光学遥感影像可以充分利用空间特征、纹理、植被指数信息以及光谱信息反映更详细的森林遥感信息。文献[7]通过解译航空影像获取树高和树冠直径,分析了 1978 年和 2003 年之间以色列南部森林生物量变化情况。文献[8]根据 IKONOS 数据的光谱信息和纹理信息构建回归模型估算湿地的生物量。文献[9]根据 Quick-Bird 影像和野外样点调查数据建立 K 邻近和线性回归模型预测森林生物量。

1.2 雷达估算森林生物量

雷达遥感具有全天候、全天时等特点,并且雷达对树冠有穿透力,能获取森林内部结构信息,在森林生物量估算中具有一定优势。

1.2.1 SAR 估算森林生物量

SAR 主要是根据后向散射系数估算森林生物量。不同波长、不同极化方式的 SAR 后向散射分别来自于树的不同部位,所以,不同波长和极化方式的 SAR 数据估算生物量的能力也不同。文

献[10]发现 HH 极化数据和树干、树冠的生物量关系比较密切,VV 和 HV 的极化数据和树冠的生物量关系比较密切。文献[11]对比 C 波段和 L 波段的多极化数据雷达,发现 LVV 和松树的生物量关系比 LHV 和 CHH 数据之间的关系要密切。

1.2.2 干涉雷达估算森林生物量

干涉雷达(InSAR)可以获取森林树高信息,从而进一步估算森林生物量。文献[12]根据 InSAR 数据提取树高和郁闭度两个森林结构参数,间接地计算森林生物量。文献[13]模拟分析了西伯利亚中部针叶林 ERS-1/2 干涉相干性与森林生物量的关系。文献[14]采用 X 波段的 InSAR 估算挪威南部寒带森林生物量。

1.2.3 极化干涉雷达估算森林生物量

极化干涉合成孔径雷达(POLInSAR)将极化和干涉结合在一起,提供比单纯的极化或干涉更为丰富的信息,对提取树高、衰减系数等森林参数的反演具有重要意义。文献[15]最早采用 POLInSAR 估算森林高度,提出基于 POLInSAR 的森林高度反演三阶段策略。文献[16]采用多基线的 POLInSAR 估算森林结构、地面和树冠层的相关信息。文献[17]采用 POLInSAR 数据估算了巴西桉树的森林生物量。

1.3 LiDAR 激光雷达估算森林生物量

LiDAR 对森林具有一定的穿透力,可以测定地表和林冠的高度信息以及平均树冠面积、树木密度等信息,在估算森林生物量方面表现出巨大的优势。文献[18]最早采用离散回波的大光斑 LiDAR 估算了美国佐治亚州南部松树的生物量。文献[19]根据激光雷达系统提取的树高和郁闭度建立了几种森林生物量的估算模型。文献[20]采用 LiDAR 成功区分活树和死树,并计算了相应的生物量。文献[21]采用小光斑激光雷达估算了黑河流域祁连山大野口典型森林区的生物量。

2 多传感器遥感数据估算森林生物量研究现状

随着遥感技术的进一步发展,多传感器遥感数据集成估算森林生物量成为发展趋势。

2.1 光学遥感和雷达集成估算森林生物量

由于光学遥感数据存在混合像元、饱和度等问题,将光学遥感数据和雷达数据集成,可以有效地减少此类问题对估算森林生物量的影响。文献[22]在研究美国俄勒冈州安德鲁斯森林时,将

AIRSAR 和 TM 数据集成估算森林生物量的精度要比各自估算森林生物量的高。同样,文献[23]研究伊朗北部的森林生物量时,发现将 JERS-1/SAR 数据和 Alos 的 AVNIR-2 和 PRISM 集成估算森林生物量比各自估算森林生物量的精度要高。

2.2 光学遥感和 LiDAR 估算森林生物量

LiDAR 数据一般只有三维信息,缺少光谱信息,往往需要和光学遥感一起应用估算森林生物量。文献[24]采用 LiDAR 数据和高光谱数据估算热带雨林的森林生物量。文献[25]采用 LiDAR 数据和 QucikBird 数据估算了美国加州生物量较高区域的森林碳密度。文献[26]根据 IKONOS 立体像对提取的数字地面模型和 LiDAR 提取的数字高程模型计算树冠高度模型,估算了加拿大魁北克省试验森林的生物量。

2.3 雷达和 LiDAR 估算森林生物量

由于雷达和 LiDAR 在估算森林生物量方面都有很大的优势,最近几年将两者结合估算森林生物量的研究比较多。文献[27]发现,SAR 数据对 LiDAR 数据估算美国黄松生物量的精度具有一定的提升作用。文献[28]的研究表明,SAR 数据和 LiDAR 数据集成估算阔叶林和混合林的生物量精度明显高于各自估算的精度。文献[29]采用 LiDAR 和 SAR 数据估算了哥斯达黎加东北部的生物监测站附近热带森林的生物量,并模拟该区域 4 a 内森林生物量的变化情况。

2.4 光学遥感、雷达和 LiDAR 估算森林生物量

为提高遥感技术估算森林生物量的能力,应充分利用每种传感器的优点,如用 LiDAR 数据获取详细的森林垂直信息,利用光学遥感数据获取大范围的光谱信息,利用雷达数据获取比较粗的森林垂直信息和水平信息,将这些信息结合在一起可以更有效地估算森林生物量。文献[30]将 LVIS、SRTM INSAR、TM 和地面调查辅助数据集成,估算了切萨皮克湾地区的森林生物量。文献[31]根据野外样点调查数据比较 LiDAR、SAR 和光学影像估算的森林生物量,发现 LandSat ETM 影像可以帮助提高 LiDAR 估算森林生物量的精度。

3 遥感技术估算森林生物量存在的问题

3.1 估算精度的问题

每种遥感数据在空间、光谱和辐射分辨率方

面都存在一定局限性,影响了遥感技术估算森林生物量的能力。同时,调查样地的位置精度、遥感影像几何纠正的精度、遥感数据和样地调查时间的同步性、遥感数据辐射纠正的精度、地形阴影的影响、样地生物量的范围以及地面植被、土壤反射等因素也会影响遥感技术估算森林生物量的能力,导致了不同遥感数据估算地面森林生物量的精度不稳定。将生态因子、地形因子、环境因子和遥感数据结合在一起,构建多源数据的森林生物量估算模型,可以抑制这些因素的影响。

3.2 遥感信息饱和的问题

光学遥感数据和雷达数据在估算森林生物量比较高的地区时,存在遥感信息饱和的问题,不能准确地反映生物量的变化,成为遥感方法估算森林生物量的瓶颈。文献[32]发现 LandSat TM 影像在估测生物量时有饱和度的问题,其饱和度阈值为 $15\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,文献[33]在估算巴西亚马逊河流域时也发现了该问题。雷达数据在估算森林生物量时也存在类似的问题^[34]。多传感器遥感数据集成和非传统的估算方法可以在一定程度上解决该问题。

3.3 数据同化问题

多源遥感影像估算森林生物量成为目前的发展趋势,对多源遥感数据进行数据同化已经成为遥感估算森林生物量的研究热点。如何将不同传感器、不同时间、不同空间分辨率、不同光谱分辨率的遥感数据有机地结合,选择最优信息估算森林生物量,是目前遥感数据同化需要进一步研究的问题,也是当代遥感发展面临的问题。

由于野外采样数据需要一个过程,不可能与遥感数据同步,导致野外采样数据和遥感图像成像时间有一定的间隔,存在一定的信息不匹配,也是遥感数据同化面临的问题。

4 结 语

随着遥感技术的进一步发展,各类遥感数据日益丰富,运用遥感技术快速、准确地估算森林生物量的能力将不断提高,尤其是采用多源遥感数据进行生物量的估算将成为研究趋势。在今后研究中,还需要对其估算生物量时遥感信息的饱和度和精度评价、数据同化等方面的问题进行更深入的研究。

参 考 文 献

[1] Zheng D L, Heath L S, Ducey M J. Forest Biomass

Estimated from MODIS and FIA Data in the Lake States; MN, WI and MI, USA [J]. *Forestry*, 2007, 80(3): 265-278

[2] Wessels K J, Prince S D, Zambatis N, et al. Relationship Between Herbaceous Biomass and 1-km² Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(5/6): 951-973

[3] le Maire G, Marsden C, Nouvellon Y, et al. MODIS NDVI Time-Series Allow the Monitoring of Eucalyptus Plantation Biomass[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2 613-2 625

[4] Rahman M M, Csaplovics E, Koch B. Satellite Estimation of Forest Carbon Using Regression Models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(23): 6 917-6 936

[5] Gasparri N I, Parmuchi M G, Bono J, et al. Assessing Multi-temporal Landsat 7 ETM⁺ Images for Estimating Above-ground Biomass in Subtropical dry Forests of Argentina[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1 262-1 270

[6] Soenen S A, Peddle D R, Hall R J, et al. Estimating Aboveground Forest Biomass from Canopy Reflectance Model Inversion in Mountainous Terrain [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1 325-1 337

[7] Bar Massada A, Carmel Y, Tzur G E, et al. Assessment of Temporal Changes in Aboveground Forest Tree Biomass Using Aerial Photographs and Allometric Equations[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(10): 2 585-2 594

[8] Dillabaugh K A, King D J. Riparian Marshland Composition and Biomass Mapping Using Lkonos Imagery[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, 34(2): 143-158

[9] Fuchs H, Magdon P, Kleinn C, et al. Estimating Aboveground Carbon in a Catchment of the Siberian Forest Tundra: Combining Satellite Imagery and Field Inventory[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(3): 518-531

[10] Beaudoin A, Le Toan T, Goze S, et al. Retrieval of Forest Biomass from SAR Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(14): 2 777-2 796

[11] Harrell P A, Kasischke E S, Bourgeau-Chavez L L, et al. Evaluation of Approaches to Estimating Aboveground Biomass in Southern Pine Forests Using SIR-C Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(2): 223-233

[12] Treuhaft R N, Siqueira P R. The Calculated Per-

- formance of Forest Structure and Biomass Estimates from Interferometric Radar[J]. *Waves in Random Media*, 2004, 14(2): 345-358
- [13] Gaveau D. Modelling the Dynamics of ERS-1/2 Coherence with Increasing Woody Biomass over Boreal Forests[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(18): 3 879-3 885
- [14] Solberg S, Astrup R, Gobakken T, et al. Estimating Spruce and Pine Biomass with Interferometric X-band SAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2 353-2 360
- [15] Cloude S R, Williams M L. A Coherent EM Scattering Model for Dual Baseline POLInSAR [C]. *IGARSS'03*, Tou Louse, France, 2003
- [16] Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Estimation of Forest Structure, Ground, and Canopy Layer Characteristics From Multibaseline Polarimetric Interferometric SAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1 086-1 104
- [17] Gama F F, Dos Santos J R, Mura J C. Eucalyptus Biomass and Volume Estimation Using Interferometric and Polarimetric SAR Data [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(4): 939-956
- [18] Nelson R, Krabill W, Tonelli J. Estimating Forest Biomass and Volume Using Airborne Laser Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(2): 247-267
- [19] Garcia M, Riano D, Chuvieco E, et al. Estimating Biomass Carbon Stocks for a Mediterranean Forest in Central Spain Using LiDAR Height and Intensity Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(4): 816-830
- [20] Kim Y, Yang Z, Cohen W B, et al. Distinguishing Between Live and Dead Standing Tree Biomass on the North Rim of Grand Canyon National Park, USA Using Small-footprint LiDAR Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(11): 2 499-2 510
- [21] 何祺胜,陈尔学,曹春香,等. 基于 LiDAR 数据的森林参数反演方法研究[J]. *地球科学进展*, 2009(7): 748-755
- [22] Moghaddam M, Dungan J L, Acker S. Forest Variable Estimation from Fusion of SAR and Multispectral Optical Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2 176-2 187
- [23] Amini J, Sumantyo J T S. Employing a Method on SAR and Optical Images for Forest Biomass Estimation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 4 020-4 026
- [24] Clark M L, Roberts D A, Ewel J J, et al. Estimation of Tropical Rain Forest Aboveground Biomass with Small-footprint LiDAR and Hyperspectral Sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(11): 2 931-2 942
- [25] 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): 1 561-1 575
- [26] St-Onge B, Hu Y, Vega C. Mapping the Height and Above Ground Biomass of a Mixed Forest Using LiDAR and Stereo Ikonos Images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(5): 1 277-1 294
- [27] Hyde P, Nelson R, Kimes D, 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
- [28] Banskota A, Wynne R H, Johnson P, et al. Synergistic Use of Very High-Frequency Radar and Discrete-return LiDAR for Estimating Biomass in Temperate Hardwood and Mixed Forests[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68: 1-10
- [29] Antonarakis A S, Saatchi S S, Chazdon R L, et al. Using LiDAR and Radar Measurements to Constrain Predictions of Forest Ecosystem Structure and Function[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(4): 1 120-1 137
- [30] Kellndorfer J M, Walker W S, Lapoint E, et al. Statistical Fusion of LiDAR, InSAR, and Optical Remote Sensing Data for Forest Stand Height Characterization; a Regional-Scale Method Based on LVIS, SRTM, Landsat ETM⁺, and Ancillary Data Sets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: 8-18
- [31] Hyde P, Dubayah R, Walker W, et al. Mapping Forest Structure for Wildlife Habitat Analysis Using Multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM⁺, Quickbird) Synergy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1/2): 63-73
- [32] Steininger M K. Satellite Estimation of Tropical Secondary Forest Above-Ground Biomass: Data from Brazil and Bolivia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6/7): 1 139-1 157
- [33] Lu D. Aboveground Biomass Estimation Using Landsat TM Data in the Brazilian Amazon[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(12): 2 509-2 525
- [34] Wang H, Ouchi K, Watanabe M, et al. In Search

of the Statistical Properties of High-resolution Polarimetric SAR Data for the Measurements of Forest Biomass Beyond the RCS Saturation Limits[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(4): 495-499

第一作者简介:李德仁,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士。主要从事以 RS、GPS 和 GIS 为代表的空间信息科学与多媒体通讯技术的科研和教学工作。
E-mail:drli@whu.edu.cn

General Review on Remote Sensing-Based Biomass Estimation

LI Deren¹ WANG Changwei^{1,2} HU Yueming² LIU Shuguang³

(1 State Key Laboratory of Information Engineering of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 College of Informatics, South China Agricultural University, 486 Wushan Road, Guangzhou 510061, China)

(3 US Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center, 252 Road, Sioux Falls 57198, USA)

Abstract: To further confirm the role that forest ecological system plays on global warming and global carbon cycle, quantitative study on forest biomass of large scale areas is needed. Traditional approaches based on field measurement are highly accurate, while they are only fit for small place and difficult to implement in large place. With the breakthrough progress in quantitatively obtaining forest parameters such as height of forest, canopy density, etc. , remote sensing has become the primary source for biomass estimation. We review research progress of remote sensing-based biomass estimation from single- and multi-sensor data, and discuss existing issues influencing biomass estimation.

Key words: biomass; remote sensing; estimation

About the first author: LI Deren, professor, Ph.D supervisor, Academician of Chinese Academy of Sciences, Academician of Chinese Academy of Engineering, Academician of Euro-Asia International Academy of Sciences. He is concentrated on the research and education in spatial information science and technology represented by RS, GPS and GIS.
E-mail: drli@whu.edu.cn

“地理空间信息科学全球领袖”奖花落武大

2012 年 4 月 23 日至 25 日,李德仁院士、朱宜萱教授赴荷兰阿姆斯特丹参加地理空间信息世界论坛,代表武汉大学领取“地理空间信息科学全球领袖”奖。

地理空间信息世界论坛由《地理空间信息世界》杂志主办,每年一次,旨在为地理空间信息科学领域的学者专家、企业、组织和学术机构提供一个充分交流的平台。论坛设立了“地理空间信息科学全球领袖”(Geospatial World Leadership)奖,奖励为地理空间信息科学、技术、产品研发、应用的发展和能力提升作出了重要贡献,并积极帮助相关企业成长的学者专家、企业、组织和学术机构。武汉大学由于在该领域的基础研究和能力提升方面作出了重要贡献,被授予该奖。此前仅美国加州大学伯克利分校和德国汉诺威大学曾获此奖。