

# 利用 ALOS PALSAR 双极化数据估测山区森林蓄积量模型

王晓宁, 徐天蜀, 李毅

(西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 合成孔径雷达(SAR)技术以其独特的成像机制及其全天候、全天时成像能力, 在森林生物量估测方面发挥着越来越重要的作用。利用野外实测数据分析了 ALOS PALSAR 双极化数据后向散射系数( $\sigma_{\text{HH}}^0$ ,  $\sigma_{\text{HV}}^0$ ,  $\sigma_{\text{VH}/\text{HH}}^0$ )与云南山区松林蓄积量的关系, 并分别构建简单线性、自然指数和加入地理因子的多元回归模型。研究结果表明: 极化比值( $\sigma_{\text{VH}/\text{HH}}^0$ )与蓄积量的相关系数( $r=-0.407$ )比任何单极化( $\sigma_{\text{HH}}^0$  和  $\sigma_{\text{HV}}^0$  分别为 0.204 和 -0.242)都要高, 加入地理因子的多元回归模型在森林蓄积量估算中有较好的精度。图 3 表 2 参 12

**关键词:** 森林测计学; ALOS PALSAR; 森林蓄积量; 地理因子

中图分类号: S758.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2012)05-0667-04

## Estimating forest volume in hilly regions with the ALOS PALSAR model's dual polarization data

WANG Xiao-ning, XU Tian-shu, LI Yi

(College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** Synthetic Aperture Radar (SAR), having a particular imaging mechanism that can acquire data at any time, has become more and more important for estimating forest biomass. In this research, based on field survey data, correlations between ALOS PALSAR dual polarization data backscattering coefficients ( $\sigma_{\text{HH}}^0$ ,  $\sigma_{\text{HV}}^0$  and  $\sigma_{\text{VH}/\text{HH}}^0$ ) and Yunnan pine forest volume from hilly regions were analyzed. A simple linear model, an exponential model, and a multiple regression model with terrain factors were developed. Results showed that correlation of the polarization ratio ( $\sigma_{\text{VH}/\text{HH}}^0$ ) to forest volume ( $r = -0.407$ ) was higher than any single polarization ( $\sigma_{\text{HH}}^0$  with  $r = 0.204$  and  $\sigma_{\text{HV}}^0$  with  $r = -0.242$ ). Also, the multiple regression model with terrain factors was with highest accuracy. [Ch, 3 fig. 2 tab. 12 ref.]

**Key words:** forest mensuration; ALOS PALSAR; forest volume; geographical factors

森林生物量的定量测算是生态学及相关领域的重要研究问题, 特别是在全球气候变化的背景下, 开展森林生物量的数量、时空分布和动态变化研究, 具有重要的理论意义及实践价值。波长为 1 mm 到 1 m(不含 1 m)的电磁波称为微波。微波遥感具有穿透树冠的能力, 不仅能和树叶发生作用, 而且主要是和森林生物量的主体——枝和树干发生作用, 因而微波遥感为森林生物量全面和精确估测提供了可行的工具。微波遥感分为主动和被动 2 种方式, 合成孔径雷达(SAR)作为主动微波遥感的方式在森林生物量估算中的应用越来越广<sup>[1-4]</sup>。目前, 大量的理论和试验结果都已证实, 长波段雷达后向散射与森林生物量相关性较显著, 后向散射强度随着森林生物量的增加而增加, 当生物量变化为 1 t·hm<sup>-2</sup> 而对应的后向散射系数  $\sigma^0$  变化小于等于 0.01 dB 时, 后向散射趋于饱和, 该生物量水平称作雷达后向散射饱和点<sup>[5]</sup>。雷达后向散射对森林生物量的敏感性随着波长的增加而增加, 以 P 波段与森林生物量的关系最为密切,

---

收稿日期: 2011-10-12; 修回日期: 2012-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30960302)。

作者简介: 王晓宁, 从事遥感技术在林业中的应用研究。E-mail: wxn816@126.com。通信作者: 徐天蜀, 教授, 博士, 从事林业“3S”技术应用研究。E-mail: tsxue64@163.com

C波段则较差<sup>[6-8]</sup>。本研究就 ALOS PALSAR 双极化数据估测山区森林蓄积量的潜力展开初步研究。

## 1 研究区域概况与数据来源

### 1.1 研究区域概况

研究区位于云南中部宜良县花园林场，地势北高南低，海拔为1300~2700 m。山地、谷地与坝子相间分布为地貌总特点。气候属北亚热带季风气候，夏无酷暑，冬无严寒，年平均气温为16.3℃。森林起源以天然林为主，主要树种有云南松 *Pinus yunnanensis*，华山松 *Pinus armandii*，杉木 *Cunninghamia lanceolata* 和云南油杉 *Kereleeria evelyniana* 等。

### 1.2 数据来源与处理方法

外业调查主要以云南松林为主，在研究区内采用典型抽样的方法布设样地，用全球定位系统(GPS)记录样地的精确坐标，利用角规控制检尺的方法量算出样地的单位面积蓄积量。

实验所用的L波段ALOS PALSAR 1.1级数据获取的时间为2010年7月3日，高分辨率模式下的单视复数影像，极化方式为双极化，距离向分辨率为9.37 m，方位向分辨率为3.18 m，入射角38.7°，数据格式为CEOS。在商业软件GAMMA中，首先对单视复数(SLC)数据进行多视处理，生成多视强度图。设置距离向和方位相视数分别为1和4，距离向和方位向分辨率为9.3 m×12.7 m。然后进行辐射定标，把图像转换成以dB表示的后向散射系数图像，便于对图像进行点目标的定量度量和分析。SAR系统侧视成像的几何特点会导致叠掩、透视收缩、阴影等几何变形，因此，最后必须采用数字高程模型(DEM)数据进行正射校正。将ASTGTM\_DEM重采样到15 m×15 m，利用DEM进行三维构像建立SAR影像的模拟影像，再利用模拟的SAR影像对原始的SAR图像进行正射校正。最终预处理结果影像像元大小为15 m×15 m。处理后PALSAR影像( $\sigma_{\text{HH}}^0$ )及样地分布见图1。

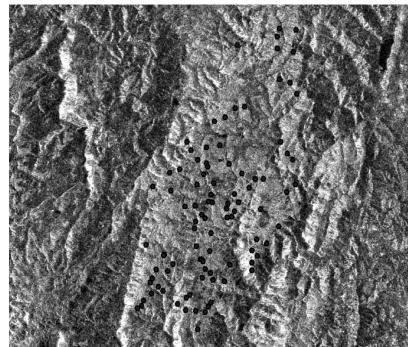


图1 处理后 PALSAR 影像( $\sigma_{\text{HH}}^0$ )及样地分布

Figure 1 Processed PALSAR image ( $\sigma_{\text{HH}}^0$ ) and plot distribution

## 2 森林蓄积量估测

### 2.1 蓄积量与自变量因子的相关性

由于角规绕测计算得到的是每公顷蓄积量，以实测角规点坐标对应的像元为中心，提取5×5共25个像元的均值作为该样地的后向散射系数值。实测蓄积量与 $\sigma_{\text{HH}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0$ 关系如图2。采用经过预处理的PALSAR后向散射系数( $\sigma_{\text{HH}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0$ )以及地理信息系统因子(高程、坡度、坡向)及其派生出来的因子(高程与高程、坡度与坡度、坡向与坡向的乘积)共9个自变量因子与对应的蓄积量进行相关性分析(表1)。由表1得知：极化比值与蓄积量的相关系数比任何单极化都要高，这与范凤云等<sup>[9]</sup>的研究结果是一致的。 $\sigma_{\text{HH}}^0$ 表现出正相关， $\sigma_{\text{HV}}^0$ 则相反，说明云南松林对同极化、交叉极化散射有不同的作用机理。在地形因子影响中，由于PALSAR是侧视雷达，所以坡度可能是对后向散射系数影响最大的地形

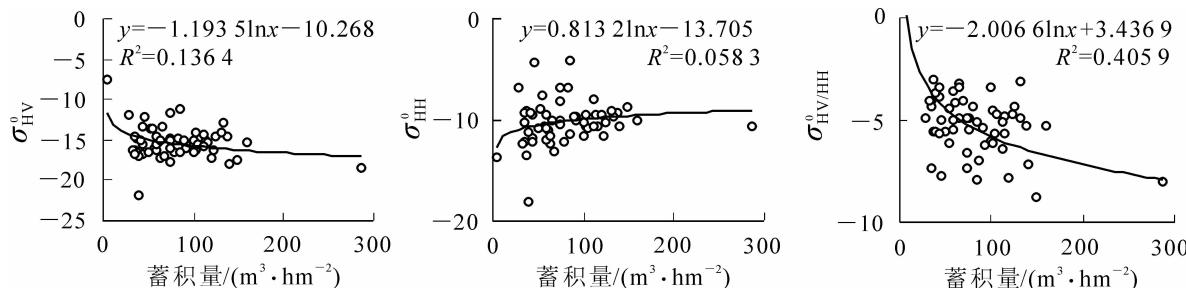


图2 实测蓄积量与 $\sigma_{\text{HH}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0$ 关系

Figure 2 Relationship of measured value and backscattering coefficients ( $\sigma_{\text{HH}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}}^0$ ， $\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0$ )

因子, 坡度与蓄积量的相关性也最大, 负相关说明在滇中坡度较陡的地区不适合云南松的生长。地形因子与蓄积量的相关性并不随着次数的升高而增大, 这与宋茜等<sup>[10]</sup>的结论是稍有不同的。

## 2.2 构建反演模型

使用统计方法分析遥感和地学因子与森林蓄积量之间关系。根据模型简单化原则, 建立并优选统计方程, 完成森林蓄积量的估测。简单线性:  $V=ax+\varepsilon$ 。其中:  $V$  为单位面积蓄积量,  $x$  为遥感因子,  $a$  为方程的系数,  $\varepsilon$  为误差。该模型只能分析 1 个因变量和 1 个自变量的关系, 而多元回归分析可以解决一个因变量与多个自变量之间的数量关系问题:  $V=a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_ix_i+\varepsilon$  ( $i=1, 2, 3\cdots$ )。其中:  $x_1, x_2, \dots, x_i$  为回归模型的自变量 (即遥感和地学因子),  $a_1,$

$a_2, \dots, a_i$  为回归系数。由森林蓄积量与后向散射系数之间的散点图 (图 2) 可知, 两者之间的关系可用指数模型描述:  $V=a\cdot\exp(bx)$ 。其中:  $x$  为后向散射系数,  $a, b$  为回归系数。本研究以 40(67%) 个云南松纯林地面样地数据和对应的遥感数据构建模型, 20(33%) 个地面样地数据进行模型精度评价分析。在 SPSS 17.0 中分别构建只含极化比值的简单线性模型、自然指数模型和加入地学因子的多元回归模型。多元回归模型是通过分析表 1 中 9 个自变量因子由逐步回归法求得, 分别将显著性水平 0.05 和 0.10 作为挑选和剔除变量的条件。各模型参数见表 2。从建模修正后的决定系数 (adjusted  $R^2$ ) 来看, 多元回归模型的  $R^2$  值最高, 相关性分别比简单线性模型和指数模型高 71% 和 18%。多元回归模型的  $F=15.357 > F_{0.01}(5, 34)=3.61$ , 在 0.01 水平下  $F$  检验是显著的, 表明多元回归为估测云南松林蓄积量最佳模型。

表 1 森林蓄积量与自变量因子的相关系数

自变量	代码	R	自变量	代码	R
后向散射系数(HH)	$\sigma_{\text{HH}}^0$	0.204	高程	E	-0.010
后向散射系数(HV)	$\sigma_{\text{HV}}^0$	-0.242	高程×高程	$E^2$	-0.009
极化比值(HV/HH)	$\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0$	-0.407**	坡度	S	-0.513**
			坡度×坡度	$S^2$	-0.377**
			坡向	A	-0.233
			坡向×坡向	$A^2$	-0.202

说明: \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 2 蓄积量估测模型比较

Table 2 Comparison of forest volume estimation models

类型	模型	R	$R^2$	adjusted $R^2$	F	显著性
简单线性	$V=25.375-9.963\times\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0$	0.454	0.206	0.185	9.854	0.003
指数	$V=19.662\times\exp((-0.236)\times\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0)$	0.736	0.541	0.529	44.806	0.000
多元回归	$V=307.379-14.81\times\sigma_{\text{HV}/\text{HH}}^0-13.083\times S-0.273\times A+0.287\times S^2+9.13\times\sigma_{\text{HV}}^0$	0.833	0.693	0.648	15.357	0.000

## 2.3 最优回归方程精度检验

利用预留样地数据对多元回归模型进行精度验证, 估测值与实测值相关系数为 0.767, 均方根误差为  $19.2 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均残差为  $9.17 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 相对误差最大为 68%, 最小为 2%, 平均为 24%。多元回归模型估测效果见图 3。从检验结果来看, 实测值和对应反演的蓄积量预测值比较一致, 但是由于林分结构复杂和环境因素的多变, 使反演结果存在一定的偏差。

## 3 结论

本研究就 ALOS PALSAR 双极化数据估测山区森林蓄积量的潜力展开初步探讨, 得出如下结论: ①将 ALOS PALSAR 数据加入地学因子, 对区域内地势起伏的森林蓄积量反演有很好的效果, 从一定程度上克服了侧视雷达对地观测时由于地形对后向散射和地域差异对森林蓄积量分布的影响。②由于样地数量偏少, 部分样地林下枯木和灌木比较杂乱, 定位误差等原因导致估测出现一定的偏差。在  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  水平以下出现高估现象, 这是由于在低蓄积量情况下, 林分郁闭度

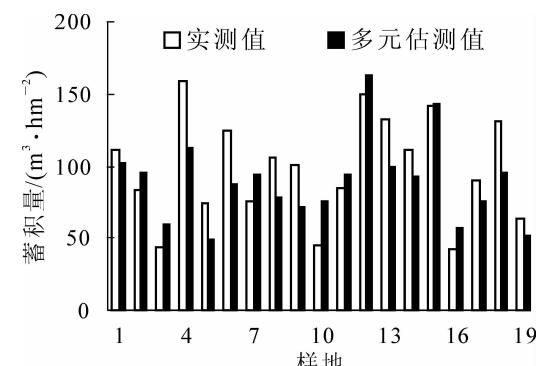


图 3 森林蓄积量多元估测值与实测值拟合图  
Figure 3 Simulation result of forest volume estimation using multiple regression model and surveyed data

一般较低, L波段电磁波很容易穿透植被射向地表, 所以后向散射值有很大一部分来源于地表土壤、地上灌木和草本植物的散射, 这导致除了林木本身外, 还有地表面回波信息能增强回波信号, 以致反演时其蓄积量偏高。蓄积量在 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上时出现明显的低估现象, 这是由于后向散射系数随蓄积量的增加出现饱和现象。饱和点除受森林蓄积量本身的影响外, 还与地形、湿度、温度等环境因子有关。③样点水平的蓄积量估测, 采用极化比值建立估测模型是一个相对较好的方法, 相关系数比任何单极化的结果都要高。

## 4 讨论

尽管合成孔径雷达(SAR)在森林生物量估测中取得了较大发展, 但受目前反演技术的限制, 精度依然不太理想。今后我们应该聚焦于以下几个方面: ①应借助新模型对森林的后向散射机制进行深入研究, 如采用引入地形参数非线性回归模型(BP神经网络模型等)。②研究林分结构对 $\sigma^0$ 的影响, 可以更深入理解蓄积量与 $\sigma^0$ 的相关性, 进一步量化和理解在复杂环境的散射机制, 研究后向散射/蓄积量关系变化的来源。③就估测精度而言, 大面积的天然林估测精度有待提高, 考虑使用干涉数据、SAR纹理信息可以增加估测精度<sup>[11]</sup>。此外, 彻底消除地形影响和估测生物量水平特别高的地区是个挑战<sup>[12]</sup>。

### 参考文献:

- [1] RAUSTE Y. Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping [J]. *Remote Sens Environ*, 2005, **97**: 263–275.
- [2] 杨永恬, 李增元, 陈尔学, 等. 基于 ALOS PALSAR 数据的森林蓄积量估测技术研究[J]. 林业资源管理, 2010 (1): 113–117.  
YANG Yongtian, LI Zengyuan, CHEN Erxue, et al. Forest volume estimation method based on ALOS PALSAR data [J]. *For Resour Manage*, 2010 (1): 113–117.
- [3] 朱海珍, 庞勇. 基于 ENVISAT ASAR 数据的森林蓄积量估测研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, **23** (2): 51–55.  
ZHU Haizhen, PANG Yong. Estimating forest volume using ENVISAT ASAR data [J]. *Geogr Geo Inform Sci*, 2007, **23** (2): 51–55.
- [4] DENGSHENG L. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation [J]. *Int J Rem Sens*, 2006, **27** (7): 1297–1328.
- [5] LUCAS R, ARMSTON J, FAIRFAX R, et al. An evaluation of the ALOS PALSAR L-band backscatter-above ground biomass relationship Queensland, Australia: impacts of surface moisture condition and vegetation structure [J]. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs & Geosci Rem Sens*, 2010, **3** (4): 576–593.
- [6] TANSEY K J, LUCKMAN A J, SKINER L, et al. Classification of forest volume resources using ERS tandem coherence and JERS backscatter data [J]. *Int J Rem Sens*, 2004, **25** (4): 751–768.
- [7] SANTORO M, ERIKSSON L, ASKNE J, et al. Assessment of stand-wise stem volume retrieval in boreal forest from JERS-1 L-band SAR backscatter [J]. *Int J Rem Sens*, 2006, **27** (16): 3425–3454.
- [8] FRANSSON J E, ISRAELSSON H. Estimation of stem volume in boreal forests using ERS-1 C-and JERS-1 L-band SAR data [J]. *Int J Rem Sens*, 1999, **20** (1): 123–137.
- [9] 范凤云, 陈尔学, 李世明. ALOS PALSAR 极化数据对山区森林蓄积量的敏感性评价[C]//中国林学会. 第2届中国林业学术大会——S3 森林经理与林业信息化的新使命论文集. 北京: 中国林业出版社, 2009: 211–216.
- [10] 宋茜, 范文义. 大兴安岭植被生物量的 ALOS PALSAR 估算[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (2): 303–308.  
SONG Qian, FAN Wenyi. ALOS PALSAR estimation of vegetation biomass in Daxing'anling region [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22** (2): 303–308.
- [11] KUPLICH T M. Relating SAR image texture to the biomass of regenerating tropical forests [J]. *Int J Rem Sens*, 2005, **26** (21): 4829–4854.
- [12] SUN G, RANSON K J, KHARUK V I. Radiometric slope correction for forest biomass estimation from SAR data in the Western Sayan Mountains, Siberia [J]. *Rem Sens Environ*, 2002, **79**: 279–287.