

# 大兴安岭植被生物量的 ALOS PALSAR 估算\*

宋茜 范文义\*\*

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要** 利用野外实测调查数据,系统分析了 ALOS PALSAR L 波段 HH(L-HH)极化数据与大兴安岭地区森林各成分参数的关系,并采用简单线性模型、指数模型和加入地理因子模型建立森林生物量的估算模型进行最优反演.结果表明:后向散射系数与树木地上部分总生物量相关性最大,其次是干生物量,L-HH 数据可以用来反演正确的树木地上部分总生物量.3种模型中,加入地理因子模型降低了植被生物量估算的误差,精度达 0.851,反演结果与实际相符.在 41.5°入射角 L-HH 极化数据下,大兴安岭塔河林业局和阿木尔林业局的森林生物量饱和点在 15.4 kg·m<sup>-2</sup>.

**关键词** 森林生物量 后向散射系数 地理因子 ALOS PALSAR 大兴安岭

**文章编号** 1001-9332(2011)02-0303-06 **中图分类号** TP79 **文献标识码** A

**ALOS PALSAR estimation of vegetation biomass in Daxing'anling region.** SONG Qian, FAN Wen-yi (*School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(2): 303-308.

**Abstract:** Based on field survey data, the correlations between the ALOS PALSAR L-band HH (L-HH) polarization data and the parameters of forest components in Daxing'anling region were systematically analyzed, and by adopting forest biomass estimation models, including simple linear model, exponential model, and model with terrain factors, optimal inversion was conducted. The results showed that backscattering coefficient had the greatest correlation with total forest biomass, and secondly, with trunk biomass, suggesting that the L-HH data could be used to estimate the total forest aboveground biomass. Among the three models adopted, the model with terrain factors could greatly reduce the biomass estimation error, with the accuracy reached 0.851, and the inversion result coincided best with the actual situation. It was forecasted that under the 41.5° incidence angle L-HH polarization, the vegetation biomass saturation point within the Tahe and Amuer forest bureaus of Daxing'anling was at about 15.4 kg·m<sup>-2</sup>.

**Key words:** forest biomass; backscattering coefficient; geographical factor; ALOS PALSAR; Daxing'anling

森林生物量是森林生态系统中重要的特征数据.区域和全球生物量估测对于监测气候变化和人类活动对森林生态系统的影响具有重大意义,因此备受关注<sup>[1-3]</sup>.研究发现,现有的技术手段中,光学和近红外光谱只与叶生物量发生反应<sup>[4-6]</sup>,对植被垂直方向上的信息反映不足;微波具有穿透树冠的能力,不仅能作用于树叶,而且与森林生物量的主体——枝和树干也发生作用;而雷达遥感采取侧视成像,使用的波长比光学遥感长,不受天气条件和

时间的限制,能够充分反映植被的结构特征,且微波后向散射强度对森林生物量极其敏感,因而成为较精确地估测森林生物量的前提和基础<sup>[7]</sup>.

20世纪90年代,许多研究者结合森林后向散射模型进行了 SAR 数据的森林生物量估测与制图<sup>[8-10]</sup>,结果表明,微波波段雷达后向散射与地上生物量显著相关<sup>[11-12]</sup>.Luckman 等<sup>[13]</sup>在新生热带森林使用 ERS-1/2 tandem 相干数据与 0~10 kg·m<sup>-2</sup>的森林生物量进行相关分析,相关系数( $R^2$ )高达 0.805,之后又采用 JERS-1 SAR 数据估算热带森林生物量时发现,当生物量达 6 kg·m<sup>-2</sup>时,后向散射系数达到饱和<sup>[14]</sup>.Kuplich 等<sup>[15]</sup>发现,JERS-1 SAR

\* 国家高技术研究发展计划项目(2006AA12Z104)和国家林业局“948 计划”项目(2011-4-80)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: fanwy@163.com

2010-05-04 收稿,2010-11-23 接受.

的后向散射数据适用于在皆伐迹地上更新的热带次生林生物量研究,与生物量的相关性为 0.77. 国外学者对多频率多极化雷达数据的研究获取了大量信息<sup>[16-18]</sup>,国内李增元等和车学俭研究发现了雷达遥感在森林参数估测中的潜力<sup>[19-20]</sup>. 目前应用雷达遥感数据进行森林生物量估测的方法已被用于快速获取植被生物量信息<sup>[21-22]</sup>,针对 SAR 数据建立雷达影像后向散射系数和森林生物量估算模型<sup>[23-25]</sup>. 王臣立等<sup>[26]</sup>研究发现,采用 c 波段 HH 数据的后向散射系数与森林生物量的相关性较强. Eric 等<sup>[27]</sup>采用 BCEF(Bonanza Create Experimental Forest) SAR 数据在不同雷达视角下观测发现,P 波段数据的标定不如 L 波段精确. 本研究采用 L 波段 HH 极化数据研究其后向散射系数与森林生物量的关系,建立简单线性模型和指数模型,再加入地形因子建立多元估算模型,通过精度评价选取最佳反演模型.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于黑龙江大兴安岭地区的塔河林业局和阿穆尔林业局境内,是国家重要的林业生产基地. 塔河林业局位于大兴安岭伊勒呼里山北坡,黑龙江以南,地理坐标为 123°20'—125°07' E,52°09'—53°23' N,平均海拔 521 m,境内多低山丘陵,地势西高东低,森林覆盖率 76.69%;阿穆尔林业局地处祖国北部边疆黑龙江上游,漠河县境内(122°38'—124°05' E,52°15'—53°33' N),海拔最高为 1369.7 m,最低为 247.6 m,林木总蓄积量  $3.517 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)蓄积量占总蓄积量的 90% 以上,全年无霜期 70 d 左右,结冰期 7 个月左右. 该研究区地处高纬度山地,地势起伏不大,属大陆性气候,年平均气温 -5℃,林分结构简单,植物种类单一,主要乔木有:樟子松、落叶松、蒙古栎(*Querus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、云杉(*Picea asperata*)、赤松(*Pinus densiflora*)和黑桦(*Betula dahurica*)等.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地生物量计算** 试验样地为研究区域内均匀分布的固定样地(2005 年野外调查数据,图 1),面积均为 20 m×30 m,平均胸径在 1.2~27.4 cm,平均树高在 4.5~21.8 m,郁闭度在 0.1~0.9,总生物量在 0.5~227 t·hm<sup>-2</sup>. 利用样地内各乔木树种(不包括灌木和草本)每木检尺数据代入文献[28]

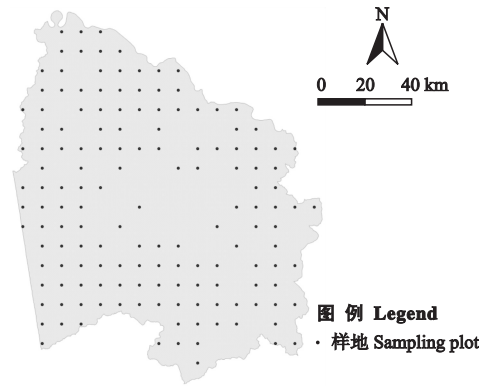


图 1 研究区内样地分布

Fig. 1 Plot distribution in the study area.

(同一研究范围)建立的树种生物量模型,分别计算各树种的生物量,以固定样地为单位,合计样地内各株树木的生物量,即为本文中固定样地的生物量.

**1.2.2 ALOS PALSAR 数据预处理** 试验所用 ALOS PALSAR 数据成像为 2006 年 7—9 月共 16 景影像,采用 41.5°入射角,L 波段(1.275 GHz),HH 极化方式,像素大小为 12.5 m,幅宽为 70.5 km,数据格式为 CEOS. PALSAR 传感器有多种模式,其中的高分辨率模式分为 FBS(fine beam single polarisation)和 FBD(fine beam double polarisation)2 种,按照处理级别分为 Level 1.0、Level 1.1 和 Level 1.5 共 3 级,本文选择 FBS 模式的 Level 1.5 级别产品,是经过距离和方位(多视)压缩、辐射与几何纠正、地图投影等处理过的地理编码数据. 处理过程主要包括辐射定标和噪声消除.

辐射定标的目的是将原始影像记录的振幅数据转换为反映能量值的后向散射系数,其数量级较小,并且随地表参数的变化较小,为了扩大散射系数的动态范围,通常以分贝表示,其方法是将得到的后向散射系数取以 10 为底的对数,再乘以 10,最终 PALSAR 数据辐射绝对定标公式为:

$$\sigma_{ij}^0 = 10 \times \lg(DN_{ij}^2) + K \quad (1)$$

式中: $\sigma_{ij}^0$  为后向散射系数; $DN_{ij}$  为像元灰度值; $K$  为绝对定标常数,这里为 -83 dB.

斑点噪声是雷达影像的固有特性,可使图像判译变得复杂,有效的滤波是雷达影像应用的基础. Gamma 滤波器可以保留边缘信息;局部 Sigma 滤波器在对比度较低的区域也能很好地保留细节. 同时使用 Gamma 滤波和 Sigma 滤波去除图像中的斑点噪声,可以兼顾二者的优点并提高了信息提取的有效性.

**1.2.3 样地像元值的提取** 在提取固定样地对应的 PALSAR 影像上的遥感信息时,通过 GPS 野外测量的样地中心点的坐标将样地生物量数据与遥感数据一一对应。由于固定样地面积为 600 m<sup>2</sup>,采用的微波数据像元大小为 12.5 m,平均 3.84 个像元代表一个样地的大小。实测样地形状并不规则,所以在提取样地对应的遥感信息时,采用四邻域平均法提取,即取样地点对应像元,以及包括相邻的正南、正北、正东、正西 4 个方向的 5 个像元值求平均,即为该固定样地对应的遥感信息值。

**1.2.4 最佳森林生物参数反演模型变量的选择** 通常,树木越大,散射体越多,生物量越大,导致的后向散射越强。有研究者认为,单波段单极化情况下饱和点低,使得 SAR 监测地表生物量变化能力有限<sup>[29]</sup>,但事实上,SAR 后向散射系数除受树木本身的影响外,还与树木各器官(如树枝、树叶、树干)的生物量以及树的物理结构参数(如树高、森林面积)有关,大尺度研究时还同时受到地形、湿度、温度等环境因子的影响<sup>[30]</sup>,这为单波段、单极化、非大尺度研究提供可能性。范凤云等<sup>[31]</sup>利用 PALSAR 数据研究发现,地形校正后 HH 极化后向散射与生物物理参数的相关性系数低于地形校正前,因此,本研究区在对利用 L-HH 数据反演森林生物物理参数时可暂且不计地形的影响。基于以上原因,利用 SPASS 统计软件,分析后向散射系数与成分参数的相关性,以及总生物量与多个变量因子的相关性,以解释采用逐步回归法构建反演模型中变量因子。

## 2 结果与分析

### 2.1 PALSAR 数据与生物量的相关性

**2.1.1 后向散射系数与成分参数的相关性** 成分参数是指构成树的各种成分的参数,包括叶、花、果实、树枝和树干。它们均接受太阳的直接照射而不断生长,各个部分散射回波强度被记录下来,信号中携带着地物信息,雷达后向散射系数和森林生物量的相

关系数见表 1。

由表 1 可以看出,森林总生物量( $b_{tot}$ )、干生物量( $b_t$ )、叶生物量( $b_l$ )、干枝生物量( $b_b$ )、叶枝生物量( $b_{lb}$ )与雷达后向散射系数在 0.01 水平上极显著相关,雷达后向散射系数与枝生物量( $b_b$ )在 0.05 水平上显著相关。后向散射系数与总生物量相关性最高, $R^2$  达到 0.324,与干生物量的相关系数次之,这说明 L 波段的穿透性较强,微波信号不仅包含了冠层信息,而且可以穿过树冠到达树干,全面反映总生物量的变化,同时也说明引用 L 波段 HH 反演总生物量的可行性。

**2.1.2 总生物量与敏感变量因子的相关性** 采用经过预处理的影像上记录的后向散射系数以及地学信息(经度、纬度、高程、坡度、坡向)及其派生出来的因子(如高程与高程、坡度与坡度、坡向与坡向、高程与坡度、高程与坡向、坡度与坡向的乘积),在实验区内选出与生物量较为敏感的自变量,用于估算大兴安岭地区塔河和阿木尔林业局部分地区的总生物量,建立不同类型的模型。初步选出 12 个自变量因子,与对应的样地上总生物量(包括干生物量、叶生物量和枝生物量)进行相关性分析,结果见表 2。

由表 2 可以看出,后向散射系数、高程、坡度、高程×高程、坡度×坡度、高程×坡度与总生物量极显著相关,高程×坡向、坡度×坡向与总生物量显著相关。纬度和总生物量成负相关,随着纬度的增大,生物量

表 1 训练数据库中雷达后向散射系数和森林生物量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between radar backscattering coefficients and forest biomass in training database ( $n=150$ )

	$b_{tot}$	$b_t$	$b_l$	$b_b$	$b_{lb}$	$b_{lb}$
后向散射系数 Backscattering coefficient	0.324 **	0.322 **	0.297 **	0.204 *	0.319 **	0.306 **

$b_{tot}$ :总生物量 Total biomass;  $b_t$ :干生物量 Truck biomass;  $b_l$ :叶生物量 Leaf biomass;  $b_b$ :枝生物量 Branch biomass;  $b_{lb}$ :干枝生物量 Truck and branch biomass;  $b_{lb}$ :叶枝生物量 Leaf and branch biomass. \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ . 下同 The same below.

表 2 训练数据库中森林生物量和变量因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between forest biomass and variable factors in training database ( $n=150$ )

变量名称 Variable name	代码 Code	$R$	变量名称 Variable name	代码 Code	$R$
后向散射系数 Backscattering coefficient	$\sigma_0$	0.324 **	高程×高程 Elevation×elevation	gegc	0.269 **
纬度 Latitude	X	-0.048	坡度×坡度 Slope×slope	pdpd	0.218 **
经度 Longitude	Y	-0.105	坡向×坡向 Aspect×aspect	pxpx	0.118
高程 Elevation	gc	0.265 **	高程×坡度 Elevation×slope	gepd	0.242 **
坡度 Slope	pd	0.222 **	高程×坡向 Elevation×aspect	gepx	0.195 *
坡向 Aspect	px	0.113	坡度×坡向 Slope×aspect	pdpx	0.181 *

表3 模型精度对比表

Table 3 Comparison of model accuracy

模型编号 Model index	模型 Model	$R^2$	MRE	RMSE ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	拟合精度 Fitting accuracy
A	$b_{\text{tot}} = 22.441\sigma_0 + 266.422$	0.703	0.250	2.131	0.750
B	$b_{\text{tot}} = 3265.09895807\exp(0.47910994\sigma_0)$	0.739	0.219	2.493	0.748
C	$b_{\text{tot}} = 14.46195443819\sigma_0 + 0.00633069319114\text{pdpx} + 0.0001138507116904\text{gcgc} + 159.2939347707$	0.851	0.227	1.543	0.781

减小。后向散射系数对总生物量的影响最大,地理因子与总生物量的相关性随着次数的升高而增大;高程、坡度、坡向交叉相乘项大于单个因子的相关性。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理因子。

## 2.2 构建反演模型及反演结果

以 112 个(75%)地面样地数据和对应遥感样地数据构建模型,38 个(25%)地面样地数据进行模型精度评价分析。利用 SPSS 13.0 软件,用全回归方法构建简单线性模型和自然指数模型,从表 2 中的 12 个变量中,用逐步回归法筛得加入最敏感地理因子的模型,各模型参数及其检验样本验证模型精度情况见表 3。

将简单线性模型(A)、指数模型(B)和加入地理因子的模型(C)相比较,从建模的确定系数( $R$ )来看,模型 C 的  $R$  值最高,相关性分别比模型 A 和 B 高 17.4% 和 13.2%。38 个检验样本对模型的验证,模型 C 的 MRE 比模型 A 低 9.4%,比模型 B 高 3.5%;C 模型的均方根误差(RMSE)分别比模型 A 和 B 低 27.6% 和 38.1%;C 模型的拟合精度分别比模型 A 和 B 高 4.0% 和 4.3%。综上可见,将 ALOS PALSAR 数据加入地理因子,对区域内地势起伏的森林生物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地形对后向散射和地域差异对森林生物量分布的影响。

在 ENVI 中采用模型 C,运用土地利用类型图做掩膜对研究区域森林覆盖地区进行生物量反演,结果如图 3。根据实验区森林生物量分布情况,按  $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  划分等级,共分为 10 个等级:0~2.0、2.0~4.0、4.0~6.0、6.0~8.0、8.0~10.0、10.0~12.0、12.0~14.0、14.0~16.0、16.0~18.0 和 >18.0(图 2)。从中可以看出,由于 PALSAR 具有高分辨率的特点,加入地理因子的后向散射模型能很好地反映研究区域的生物量的空间变化。

## 2.3 研究区森林总生物量估测结果的精度检验

将预留样本的实测值和对应反演的生物量预测值进行比较(图 3),结果表明,C 模型对大兴安岭地

区塔河和阿木尔林业局的森林生物量的模拟效果很好。预测值均与 1:1 直线大体接近。RMSE =  $1.924 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。估测得到森林生物量与野外实地测量值之间的相关系数为 0.779。

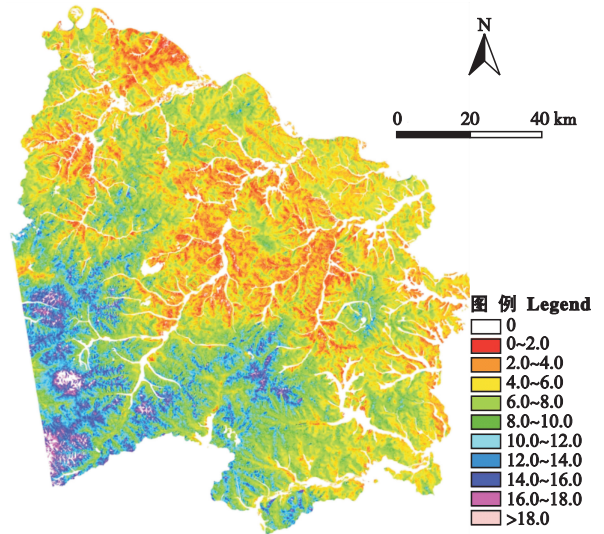


图2 森林生物量分布

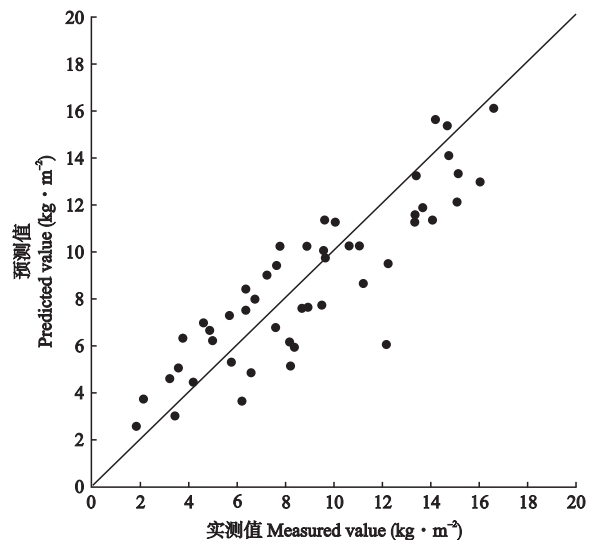
Fig. 2 Forest biomass distribution ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

图3 C模型预测值与实测值的关系

Fig. 3 Relationship of predicted value and measured value based on Model C.

图 3 显示了使用 2006 年的 ALOS PALSAR-HH 极化数据的多元非线性回归方程估测得到的森林生物量与野外实地测量值之间的关系. 野外样地数据为 2005 年 7 月底调查所得, 其森林生物量水平在  $0 \sim 18.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 通过 ALOS PALSAR-HH 极化的回归方程反演得到的生物量值与实际相符.

### 3 讨 论

在森林中, 林木的各个散射体决定了后向散射系数的大小. 从检验结果来看, 实测值和对应反演的生物量预测值比较一致, 但是由于林分结构复杂和环境因素的多变, 使反演得到的森林生物量与野外实地调查的生物量存在一定的偏差:

1) 森林生物量在  $0 \sim 5.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  水平上明显出现一些高估现象. 分析其原因: 一方面, 在低生物量情况下, 由于植被密度较低, 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和地上草本植物的散射. 这导致除了森林植被本身外, 还有地表回波信息能增强回波信号, 以致反演时其生物量偏高. 另一方面, 由于反演森林生物量所用的 ALOS PALSAR 影像数据为 2006 年, 而模型训练和检验用的调查数据是 2005 年的外业调查数据, 存在一定的时间间隔. 从 ALOS PALSAR 影像和土地利用类型图上可以看出, 间隔期内森林恢复状况较好, 原来非林地区域已经或正在向灌木或林地转变.

2) 森林生物量在  $5.0 \sim 11.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  水平上, 反演得到的生物量既有高估, 也有低估现象. 这是由于森林生物量反演时选取训练样本的数目为 112 个样地建立回归方程, 方程中加入的变量因子如高程、坡向和坡度是有限的. 实际上, 影响后向散射系数的因子还有很多, 例如林分的结构和类型等, 因此, 回归方程并不能完全反应其后向散射系数与生物量水平之间的关系.

3) 森林生物量在  $11.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上出现比较明显的低估现象. 这主要是后向散射对生物量水平饱和点的出现, 当生物量越来越大, 后向散射系数的值却增长比较慢, 最后趋于不变. 虽然后向散射系数与生物量之间存在饱和现象<sup>[32]</sup>, 但是由于使用的雷达波长、极化方式、数据时相和入射角不同, 使得饱和点也有所不同. 本研究区内, 使用  $41.5^\circ$  入射角 L 波段 HH 极化下, 可以预测生物量饱和点在  $15.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  左右(图 3).

### 4 结 论

L 波段的 SAR 数据可以全面反映植被的立体信息, 森林总生物量与后向散射系数、地理因子有很好的相关性, 用这些因子建模反演是可行的, 其精度高于简单线性和指数模型, 结果符合实际情况. 后向散射系数除受树木本身的影响外, 还与树木的物理结构参数(如树高、森林面积)、地形、湿度、温度等环境因子的影响饱和点的高低有关. 本研究在采用  $41.5^\circ$  入射角 PALSAR HH 极化下与森林总生物量的饱和点在  $15.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  左右, 要想提高饱和点需要引入其他因子加以控制.

光学遥感主要反映冠层信息, 而微波信号的穿透性虽较光学强, 但是其散射机制复杂, 单纯采用微波或传统光学遥感均有其局限性, 在森林资源调查与保护的应用中, 将二者有机结合起来, 优势互补, 将是今后的研究工作重点.

### 参考文献

- [1] Zhou Y-R (周玉荣), Yu Z-L (于振良), Zhao S-D (赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2000, **24** (5): 518-522 (in Chinese)
- [2] Wei H-D (尉海东). Study on the Carbon Storage and Soil Respiration of Three Forest Ecosystems in the Mid-Subtropical Zone, China. Master Thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forest University, 2005 (in Chinese)
- [3] Chen X-L (陈遐林). Researches on Carbon Sequestration Functions of Main Forest Types in Northern China. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2003 (in Chinese)
- [4] Jiang Y-L (蒋延龄), Zhou G-S (周广胜). Carbon equilibrium in *Larix gmelinii* forest and impact of global change on it. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12** (4): 481-484 (in Chinese)
- [5] Yang Q-P (杨清培), Li M-G (李鸣光), Wang B-S (王伯荪). Dynamics of biomass and net primary productivity in succession of south subtropical forests in Southwest Guangdong. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **12** (12): 2136-2140 (in Chinese)
- [6] Wang L-H (王立海), Xing Y-Q (邢艳秋). Remote sensing estimation of natural forest biomass based on an artificial neural network. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (2): 261-266 (in Chinese)
- [7] Chen E-X (陈尔学). Development of forest biomass estimation using SAR data. *World Forestry Research* (世界林业研究), 1999, **12**(6): 18-23 (in Chinese)
- [8] Beaudoin A, Le Toan T, Goze S, et al. Retrieval of forest biomass from SAR data. *International Journal of Re-*

- ote Sensing*, 1994, **15**: 2777-2797
- [9] Le TT, Beaudoin A, Riom J, *et al.* Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**: 403-411
- [10] Israelsson H, Ulander L, Askne J, *et al.* Retrieval of forest stem volume using VHF SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**: 36-40
- [11] Dobson MC, Ulaby FT, Letoan T, *et al.* Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**: 412-415
- [12] Rignot E, Way J, Williams C, *et al.* Radar estimates of aboveground biomass in boreal forest of Interior Alaska. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**: 1117-1124
- [13] Luckman A, Baker J, Wegmuller U. Repeat-pass interferometric coherence measurements of disturbed tropical forest from JERS and ERS satellites. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **73**: 350-360
- [14] Luckman A, Baker J, Honzak M, *et al.* Tropical forest biomass density estimation using JERS-1SAR: Seasonal variation, confidence limits, and application to image Mosaics. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **63**: 126-139
- [15] Kuplich TM, Salvatorl V, Curran PJ. JERS-1/SAR backscatter and its relationship with biomass of regenerating forests. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**: 2513-2518
- [16] Harrell PA, Kasischke ES, Bourgeau-Chavez LL, *et al.* Evaluation of approaches to estimating aboveground biomass in southern pine forests using SIR-C data. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **59**: 223-233
- [17] Ranson KJ, Sun GQ. Mapping biomass for a northern forest ecosystem using multifrequency SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**: 388-396
- [18] Dobson MC, Ulaby FT, Pierce LE, *et al.* Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**: 877-895
- [19] Li Z-Y (李增元), Che X-J (车学俭), Liu M (刘闽), *et al.* Preliminary research on the application of ERS-1 SAR in forest. *Forest Research (林业科学研究)*, 1994, **7**(6): 692-696 (in Chinese)
- [20] Che X-J (车学俭). The Volume Estimation of *Pinus* Using Luoshan Forest as an Example to Study the Application of Spaceborne Radar. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1996 (in Chinese)
- [21] Kasischke ES, Christensen NL, Bourgeau-Chavez LL. Correlating radar backscatter with components of biomass in loblolly pine forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**: 643-659
- [22] Wigneron J, Ferrazzoli P, Olivos A, *et al.* A simple approach to monitor crop biomass from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **69**: 179-188
- [23] Huete AR. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, **25**: 295-309
- [24] Li X. A two-axis adjusted vegetation index (TWVI). *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**: 1447-1458
- [25] Mather PM. Computer Processing of Remotely-sensed Images: An Introduction. Chichester: John Wiley and Sons, 1999
- [26] Wang C-L (王臣立), Guo Z-X (郭治兴), Niu Z (牛铮), *et al.* Study on forest biophysics parameter impact on RADAR signature. *Ecology and Environment (生态环境)*, 2006, **15** (1): 115-119 (in Chinese)
- [27] Eric R, Jobea W, Cynthia W, *et al.* Radar estimates of aboveground biomass in boreal forest of interior Alaska. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**: 1117-1124
- [28] Zhang Y-Y (张元元). Research on the Remote Sensing Model for Forest Biomass in Daxing' an Mountains. Master Thesis. Harbin: Northeast Forest University, 2009 (in Chinese)
- [29] Imhoff M. Radar backscatter and biomass saturation: Ramifications for global biomass inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**: 511-518
- [30] Guo H-D (郭华东). Radar for Earth Observation Theory and Applications. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [31] Fan F-Y (范凤云), Chen E-X (陈尔学), Li S-M (李世明). Evaluation of sensitivity of ALOS PALSAR polarimetric data to forest volume in hilly region. 2nd Academic Conference of Chinese Forestry-S3 Forest Management and Forestry Information Proceedings of the New Mission, Nanning, 2009: 211-217
- [32] Zhu H-Z (朱海珍), Pang Y (庞勇), Yang F (杨飞), *et al.* Estimating forest volume using ENVISAT ASAR data. *Geography and Geo-Information Science (地理与地理信息科学)*, 2007, **23** (2): 51-55 (in Chinese)

---

作者简介 宋茜,女,1985年生,硕士。主要从事遥感在林业生态与环境中的应用研究。E-mail: songqianwin999@sohu.com

责任编辑 李凤琴

---