

## 热带原始森林类型分类和蓄积量遥感反演研究

陈新云<sup>1</sup>, 李利伟<sup>1</sup>, 刘承芳<sup>2</sup>, 王六如<sup>1</sup>, 丁靖<sup>3</sup>

(1. 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714; 2. 北京大学现代农学院, 北京 100871; 3. 深圳汇华丰德投资控股有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 森林生态系统蓄积量的空间分布及反演研究对碳储量估测、生物多样性保护以及全球气候变化研究起着至关重要的作用, 然而, 由于森林植被类型的多样性, 尤其是对人力所不能及的热带原始林区, 森林调查数据缺失, 森林蓄积量的估测和反演存在巨大挑战。以巴布亚新几内亚西塞皮克省 18.80 万  $\text{hm}^2$  的热带原始雨林区为研究区, 利用高分遥感影像 RapidEye, QuickBird 与 Landsat TM, 结合野外地面调查数据, 对研究区土地覆盖类型进行分类。基于遥感影像得到森林植被参数信息, 提取各波段地表反射率、各种植被指数和其他光谱变换形式等遥感因子, 利用多元线性逐步回归构建森林蓄积量遥感反演模型, 估算研究区森林蓄积量, 并结合 GIS 技术分析其小班尺度上的空间分布特征。结果显示: 1) 研究区土地覆盖类型可以分为低海拔平原森林、低海拔高地森林、低山森林、稀疏森林、沼泽森林和其它类型共 6 种, 分类精度达 79.2%; 2) 蓄积量遥感反演模型的多元回归模型  $R^2$  为 0.694, 对森林蓄积量有较好的反演精度; 3) 研究区森林蓄积量的分布特点表现为中部高于周边、北部和中东部山区明显高于西北和东南地区, 其与研究区的土地覆盖类型分布相对应。构建的森林蓄积量反演模型对全球热带原始林区的森林资源蓄积量估测具有重要的参考价值。

**关键词:** 遥感影像; 森林蓄积量; 反演模型; 空间分布; 热带原始林区

中图分类号: S771 文献标识码: A 文章编号: 1002-6622(2019)02-0039-08

DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2019.02.006

## Remote Sensing inversion of Classification and Stocking Volume of Tropical Virgin Forest Types Based on Multivariate Data

CHEN Xinyun<sup>1</sup>, LI Liwei<sup>1</sup>, LIU Chengfang<sup>2</sup>, WANG Liuru<sup>1</sup>, DING Jing<sup>3</sup>

(1. Academy of Forest and Grassland Inventory and Planning, Nationality Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China; 2. School of Advanced Agricultural Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Shenzhen Huihua Fengde Investment Holding Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Study on the spatial distribution and inversion of forest ecosystem stocks play a crucial role in carbon stock estimation, biodiversity and global climate change research. However, due to the diversity of forest vegetation types, especially in tropical primary forest areas that are beyond the reach of human forest survey data is missing, the estimates and inversions of forest stocks still present significant challenges. This study takes the tropical primitive rain forest area of 18.80 million ha in the West Syepik Province of Papua New Guinea as the study area, and uses the high-resolution remote sensing images of RapidEye,

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-04-03

作者简介: 陈新云(1977-), 男, 湖南岳阳人, 高工, 主要从事森林资源清查与监测工作。Email: 375201918@qq.com

QuickBird and Landsat TM combining the field survey data to classify the land cover types in the study area. Based on the forest vegetation parameter information obtained by remote sensing image, the remote sensing inversion model of forest stock quantity is established in cooperation with the ground sample plot. The optimal inversion model is selected to estimate the forest stock volume, and combined with GIS technology to analyze the spatial distribution characteristics of the small class scale. The results show that the land cover types in the study area can be divided into low-altitude plain forests, low-altitude highland forests, low-mountain forests, sparse forests, swamp forests and other types, with a classification accuracy of 79.2%. The multivariate regression model  $R^2$  of the stock volume remote sensing inversion model is 0.694, which has a good inversion accuracy for the forest stock volume. The distribution of forest stocks in the study area is characterized by a higher central area than the surrounding, northern and central eastern regions, which is significantly higher than the northwest and southeast regions, which corresponds to the distribution of land cover types in the study area. The forest stock inversion model used has important reference value for the estimation of forest resource stocks in tropical forest areas.

**Key words:** remote sensing image, forest volume, inversion model, spatial distribution, tropical primary forest areas

## 0 引言

森林是地球陆地生态系统的重要组成部分,其净初级生产力约占整个陆地生态系统的70%,在维护全球生态环境以及碳平衡中起着重要作用,其中,热带和亚热带森林在全球森林中的地位举足轻重<sup>[1]</sup>。森林蓄积量作为衡量森林资源的重要指标,同时也是评价森林固碳水平的重要因子,因此,热带森林蓄积量的精确估测对热带地区森林生态系统碳储量估测、生态环境评价和应对气候变化有着重要意义<sup>[2]</sup>。

长期以来,国内外学者在全球和区域尺度上针对森林蓄积量估算进行了大量的研究工作<sup>[3-7]</sup>。传统的森林蓄积量测算是基于实地森林资源调查,尽管这种方法准确度较高,但难以满足大尺度和实时的监测需求,尤其是对于热带原始林区和地形复杂的山区,调查过程会耗费较大的人力和物力。近年来,随着3S技术的广泛应用,利用遥感技术获取区域森林的植被参数,并结合少量样地数据的森林蓄积量估测方法得到了国内外学者的广泛认可,而如何准确、快速地获取森林蓄积量信息,成为近年来森林生态系统与全球气候变化研究的前沿和热点<sup>[8-9]</sup>。

目前,国际上应用遥感技术定量估测森林蓄积

量的数据类型较多,如Landsat TM数据和LIDAR数据等,而遥感定量估测蓄积量的方法主要有多元回归和人工神经网络等,如:Gemmell等<sup>[10]</sup>基于TM数据,研究了各波段、郁闭度、林分面积大小以及地形要素对定量估测森林蓄积量的影响度;Barrett等<sup>[11]</sup>应用Landsat TM数据、IRS-1C WIFS数据、样地数据,结合非参数最近邻近法建立的非线性回归估测模型估测了大面积区域的森林蓄积量;Makela等<sup>[12]</sup>应用TM数据的像元平均值作为估测的依据,估测了分树种的林分蓄积量。国内,如:王臣立等<sup>[13]</sup>利用TM数据研究了基于遥感数据的多元回归分析在森林蓄积量估测中的应用,结果表明任何单项都不能很好地估测蓄积量;侯长谋等<sup>[14]</sup>采用逐步回归估测法,以连续清查固定样地的林分蓄积量为因变量,以与固定样地相对应的TM影像上7个波段值及多种比值、GIS可提取的海拔、地貌、坡向、坡度、土壤类型、土壤厚度作为自变量,进行了蓄积量估测,结果表明林分蓄积量的平均估测精度均达到连续清查的要求。

本研究以巴布亚新几内亚西塞皮克省西部的热带原始雨林区为研究对象。由于研究区内复杂的地形地貌以及极其落后的交通,因此,外业调查数据显得弥足珍贵。本次外业调查采用分层抽样

技术, 布设带状样地, 建立样带实测公顷蓄积建立多元线性回归方程模型, 将反演模型运用到整个研究区, 探讨森林蓄积量反演模型的有效性, 这对热带原始林区的森林蓄积量估测具有重要的应用价值。

### 1 研究区概况

研究区位于巴布亚新几内亚(简称“巴新”)西塞皮克省西部的热带雨林原始林区(3°84′~4°54′N, 141°07′~141°54′E), 整体位于中央岭以北, 塞皮

克河东西贯穿于研究区北部, 面积为 18.80 万  $\text{hm}^2$  (图 1)。地形主要是平原高地, 部分为低山。海拔 1 000 m 以上, 属山地气候, 其余海拔较低地区属热带雨林气候。5—10 月为旱季, 11 月至次年 4 月为雨季, 全年湿度较高, 降水充沛, 多伴有雷雨, 年平均降水量 2 500mm。年平均气温介于 24 ~ 28℃ 之间变, 年温差一般不超过 5℃。研究区内山脉崎岖, 沟壑纵横, 河流密布, 交通落后。研究区的西部和北部为平原地带, 经济极其落后, 当地土著居民以狩猎为生。

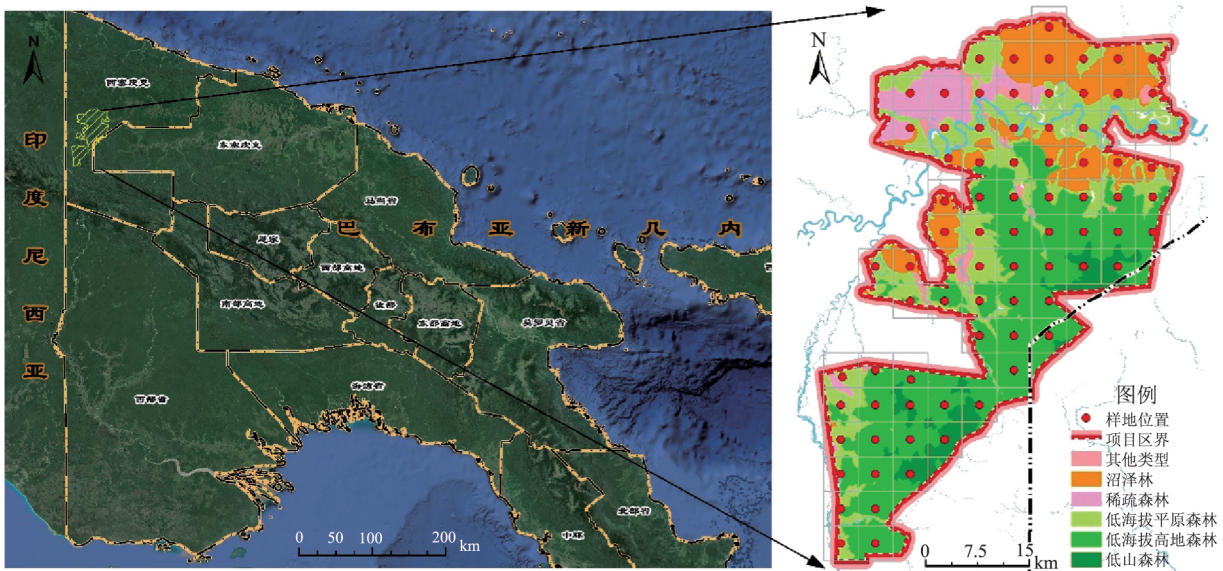


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

### 2 研究数据和方法

本研究的技术路线如图 2 所示。

#### 2.1 遥感影像

本研究分别选取 RapidEye (2014 年, 分辨率: 5 m) 和 QuickBird (2012 年, 分辨率: 0.6 m) 高分辨率遥感影像作为基础数据源 (覆盖项目区约 83%)。同时由于高分遥感影像部分区域受云量影响较大, 利用多期 Landsat TM8 (15m) 影像数据作去云和补缝处理。在遥感影像解译、分类前, 需进行几何校正、正射校正、大气校正、影像镶嵌和影像裁剪等工作, 同时还需要增加 ASTER DEM 高

程数据, 并相应地生成坡度、坡向等数据。根据巴新国家林业局发布的森林资源分布图, 遥感影像反映的森林植被疏密程度、地形、河流分布等基础信息以及前期踏查情况, 利用 eCognition 软件的最近邻法和规则分类法对研究区遥感影像进行分类<sup>[15]</sup>。分类完成后, 利用多期遥感影像和影像特征情况及遥感影像解译标志, 结合专家知识, 对输出结果进行选取和概括, 去除云、阴影及同谱异物、同物异谱等因素的影响, 将不符合小班区划要求的斑块进行合并整理、调整, 形成最终的分类结果矢量数据库。

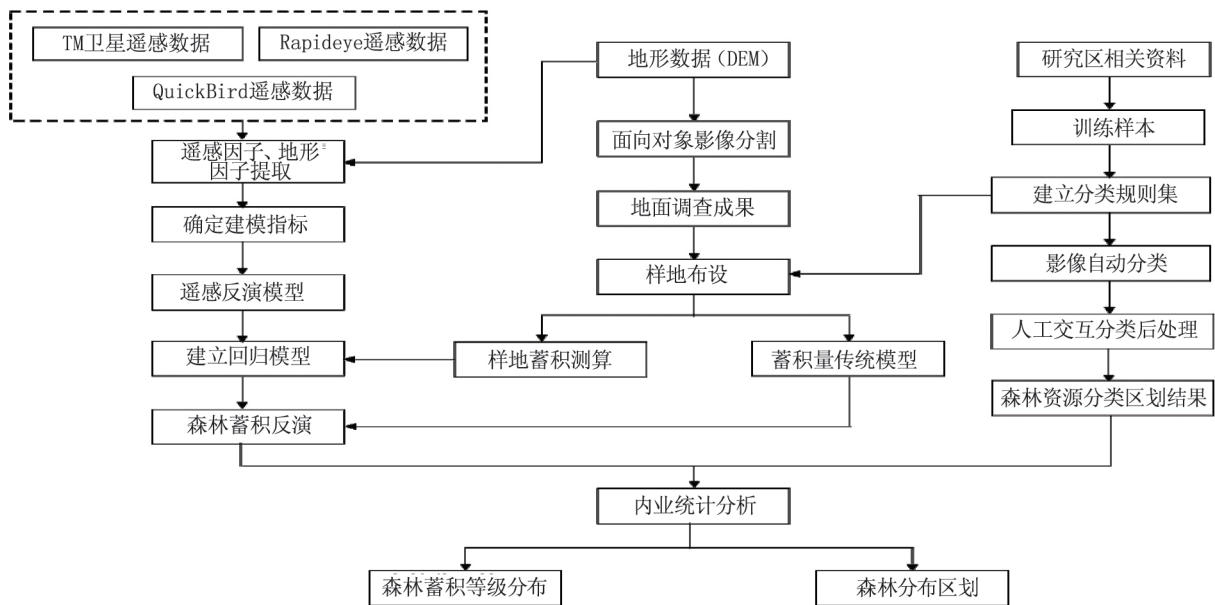


图 2 研究技术路线

Fig. 2 Research technique route

依据巴新 2015 年提交给 FAO (Food and Agriculture Organization) 的国家森林资源评估 (Global Forest Resources Assessment 2015 Country Report, Papua New Guinea) 确定森林类型的划分标准。研究区森林植被类型采用一级类型划分 (表 1), 即将研究区森林植被类型划分为低海拔平原森林、低海拔高地森林、低山森林、稀疏森林、沼泽森林、其它类型等 6 类 (图 1)。

表 1 森林类型和植被类型划分表

Tab. 1 Classification of forest types and vegetation types

一级类型	二级类型
低海拔平原森林	中大树冠森林
	稀疏树冠森林
	小树冠森林
	巴拉斯榄仁树林
低海拔高地森林	大树冠森林
	中树冠森林
	小树冠森林
低山森林	小树冠森林
	小树冠针叶林
稀疏森林	
沼泽森林	
其它类型	

注 “其它类型”包括河流、灌木林、村庄等。

## 2.2 林木蓄积量

在森林植被类型分类结果 (表 2) 的基础上, 以  $5\ 000\text{m} \times 5\ 000\text{m}$  为一个方格, 对研究区进行分块 (图 1)。采用分层抽样技术<sup>[16]</sup>, 根据不同的森林类型, 在研究区共布设 79 块  $20\text{m} \times 200\text{m}$  的带状样地 (图 1)。样带方向垂直于等高线方向, 样带原则上不翻越山岭, 在到达山脊前, 样带平行折返, 以保证样带长度为 200 m。为了使样地分布更加均匀, 更具有随机性, 将样地布设到不同的方格里。本研究于 2016 年 8—9 月对研究区的样地进行调查, 调查内容包括: 对样地内胸径大于等于 20 cm 样木进行检尺, 调查样地的郁闭度、平均树高等林分因子, 记录树种名称、胸径、树高、出材率等级等样木因子。

外业调查结束后, 对于单株样木材积, 采用二元材积式计算, 同时求算样地蓄积, 即该样带内所有样木的蓄积量。将外业调查所得公顷蓄积量以样带为分类汇总单位求和得到 79 个样地 (带) 的公顷蓄积量, 全部样带位置由样带中心坐标表示, 连同样带号、森林类别等属性存为点要素矢量文件。

表 2 研究区森林资源类型(层)判读区划及样地布设情况

Tab. 2 Forest resources types (layers) and layout of sample plots in the study area

土地覆盖类型	面积/万 hm	比例/%	样地数/个
低海拔高地森林	7.52	40.01	33
低海拔平原森林	4.76	25.30	20
沼泽森林	3.16	16.82	14
低山森林	1.16	6.20	6
稀疏森林	1.15	6.09	6
其它类型	1.05	5.58	—
合计	18.80	100.00	79

注:在“其它类型”中,由于本次采用了高分辨率遥感影像数据,河流、灌木林、村庄等类型基本可以区划判读清楚,故本次没有布设样地。

表 3 森林蓄积量反演模型建模因子

Tab. 3 Modeling factors of forest stock inversion model

因子类型	建模因子	来源
波段反射率值	Band1 ,Band2 ,Band3 ,Band4 ,Band5 ,Band7	RapidEye ,QuickBird ,Landsat TM
波段运算	NDVI ,EVI ,SAVI ,MSAVI ,NDMI	RapidEye ,QuickBird ,Landsat TM
主成分	PCA1 ,PCA2 ,PCA3	
地形数据	Aspect ,Slope ,Elevation	DEM

注:Band1 到 Band7 分别代表遥感影像数据波段 1 到波段 7 的地表反射率;PCA1 ,PCA2 ,PCA3 分别表示 band1 ,band2 ,band3 ,band4 ,band5 和 band7 主成分分析后的第一分量、第二分量和第三分量;Aspect ,Slope ,Elevation 分别表示坡向、坡度、高程;NDVI ,EVI ,SAVI ,MSAVI ,MSA- VI 分别代表归一化植被指数、增强植被指数、土壤调整植被指数、改良土壤调整植被指数、归一化差水分指数。

### 2.3.2 多元线性回归分析

利用 SPSS 软件建立公顷蓄积量与 17 个建模因子的相关性矩阵,并采用多元线性逐步回归建模,以期组合多个因子以提高模型性能,同时尽量降低模型中各因子间的共线性<sup>[19]</sup>。将公顷蓄积量作为因变量,6 个反射率波段、5 个光谱指数、3 个主成分、3 个地形因子共 17 个因子作为自变量(表 3),回归方式选择 Backward 逐步回归,依据决定系数( $R^2$ )与均方根误差(RMSE)筛选最佳拟合模型,最终确定建模因子。其中  $R^2$  越接近于 1,RMSE 的数值越低,表明回归模型越精确,参考价值越高<sup>[20]</sup>。多元回归模型结果如下:

$$V = 20898 - 0.72457Band2 + 7.8331Band3 - 1.7496Band5 - 0.79996Band7 - 7379.4NDMI + 42692SAVI - 77045MSAVI - 0.25837Elevation + 0.$$

## 2.3 森林蓄积量反演模型的构建

### 2.3.1 建模因子的提取

本研究结合影响森林植被生产力的生态影响因素,在遥感影像信息与实测蓄积量之间建立数学模型及其解析式,进而利用这些解析式来估算出一定区域内的森林林木蓄积量。本文涉及到低海拔平原森林、低海拔高地森林、低山森林、稀疏森林及沼泽森林等 5 种森林植被覆盖类型。借鉴前人<sup>[17-18]</sup>的经验并结合本文的研究目的,利用 ENVI,在遥感影像和 DEM 数据上提取各波段地表反射率、各种植被指数和其他光谱变换形式等遥感因子参与建模(表 3)。

$$000019Slope + 0.23204Aspect \quad (1)$$

式中: $V$  为样地公顷蓄积量( $m^3/hm^2$ ); $Band 2$ ,  $Band 3$ ,  $Band 5$ ,  $Band 7$  为遥感影像数据各波段的地表反射率; $Aspect$ ,  $Slope$ ,  $Elevation$  分别表示坡向、坡度、高程; $NDMI$  为归一化差水分指数, $MSAVI$  为改良土壤调整植被指数, $SAVI$  为土壤调整植被指数。

### 2.3.3 模型评价与精度验证

本研究共得到 79 个样点的公顷蓄积量及提取的特征指标,为验证模型的精度,去掉了其中 7 个在影像中受云量影响的样点,将剩余 72 个样点随机分到校正集和验证集两组中。其中,校正集 58 个样点,验证集 14 个样点。为检验森林蓄积量多元线性回归模型的可靠程度,对验证集的 14 个样本分别计算样地蓄积量预测值,以均方根误差(RMSE)评价模型精度,其数学表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \left[ \frac{(y_i - y_i')^2}{y_i} \right]}{n}} \quad (2)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  个样本点实测蓄积量;  $y_i'$  为第  $i$  个样本模型估算值;  $n$  为样地数量。

#### 2.4 森林蓄积量计算及空间分析

把(1)式(公顷蓄积的多元线性回归模型)运用到整个项目区,得到每个像素公顷蓄积,最后根据矢量小班数据计算得到小班尺度的森林公顷蓄积,再按森林类型分层统计各森林类型的平均蓄积量。各类型的蓄积计算公式为:

$$V = \sum_{i=1}^n \bar{V}_i \times A_i \quad (3)$$

$$V_j = V \times P_j \quad (4)$$

$$V_k = V \times P_k \quad (5)$$

式中:  $V$  是总蓄积量( $m^3$ ),  $\bar{V}_i$  是第  $i$  种类型(层)的单位面积平均蓄积量( $m^3/hm^2$ ),  $A_i$  为第  $i$  种类型森林面积( $hm^2$ ),  $V_j$  是  $j$  种树种的森林蓄积( $m^3$ ),  $P_j$  是通过样地调查测算的  $j$  种树种蓄积量占总蓄积量

的比例(%),  $V_k$  是第  $k$  径阶等级的蓄积量,  $P_k$  是通过样地调查测算的  $k$  径阶等级的蓄积占总蓄积量的比例(%).

### 3 结果与分析

#### 3.1 森林覆盖类型及蓄积量

本文将研究区地表覆盖类型划分为低海拔平原森林、低海拔高地森林、低山森林、稀疏森林、沼泽森林和其它类型共 6 个类型(图 1)。经野外实地调查验证,遥感影像解译结果的 Kappa 系数为 0.722,总体精度达 79.2%,说明分类精度效果较为理想,可信度较高。研究区总面积和总蓄积量分别为 18.80 万  $hm^2$  和 4 254 万  $m^3$ ,其中,低海拔高地森林区面积和蓄积量最高(7.52 万  $hm^2$ ; 2 026 万  $m^3$ ),其次是低海拔平原森林区(4.76 万  $hm^2$ ; 1 504 万  $m^3$ ),公顷蓄积量分别为 274.2  $m^3$  和 316.1  $m^3$ ,由此可见,森林资源主要集中分布在研究区的低海拔平原森林区和低海拔高地森林区(表 4)。

表 4 研究区土地覆盖类型面积及蓄积量

Tab.4 Land cover type area and forest stock in the study area

类型	总面积		总蓄积		公顷蓄积/( $m^3/hm^2$ )
	面积/万 $hm^2$	比例/%	蓄积/万 $m^3$	比例/%	
低海拔平原森林	4.76	25.3	1504	35.35	316.1
低海拔高地森林	7.52	40.01	2062	48.49	274.2
低山森林	1.16	6.2	255	5.98	218.5
稀疏森林	1.15	6.09	105	2.46	91.3
沼泽森林	3.16	16.82	328	7.72	103.9
其它类型	1.05	5.58	—	—	—
合计	18.80	100.00	4254	100.00	239.6

注:低海拔平原森林类型、低海拔高地森林类型蓄积按地面调查实测值测算,低山森林、稀疏森林、沼泽森林等森林类型蓄积按遥感反演测算。其它类型是指灌木林、河流和村庄等,不测算蓄积。合计“公顷蓄积”指不含“其它类型”的单位面积蓄积量。

#### 3.2 森林蓄积量遥感反演结果

本研究基于 6 个波段反射率、5 种植被指数以及 6 个环境参数,对 58 个样地公顷蓄积数据与建模因子进行线性回归相关性分析后发现,相关性程度因不同的因子而存在差异。其中:Band 3(红波段)与蓄积量表现出最强的相关性;Band 2(绿波段)、SAVI(土壤调整植被指数)等与蓄积量的相关性较

强,相关系数均大于 0.350。为消除模型中各因子间的共线性,采用多元逐步回归法筛选自变量,最终确定了建模因子(表 5)。将表示研究区域的建模因子组合输入反演模型((1)式),参照(3)式得到的非线性关系,得到整个研究区域的森林蓄积量反演结果,其中,模型中复相关系数  $R^2$  为 0.694,估计的标准误差(RMSE)为 50.44  $m^3$ ,经方差检验,在 0.01 水平上显著。将验证样地的反演结果与实测值

进行比较后发现,遥感反演模型可以较好地模拟研究区森林蓄积量(图 3)。

表 5 建模因子与森林蓄积量的相关性

Tab.5 Correlation between modeling factors and forest stock

建模因子	Pearson 相关性	建模因子	Pearson 相关性
Band 2	-0.456**	NDMI	0.074
Band 3	-0.464**	SAVI	0.388**
Band 5	-0.083	MSAVI	0.382**
Band 7	-0.270*	Elevation	0.035
Slope	0.055	Aspect	0.307**

注 “\*\*”表示在 0.001 水平(双侧)上显著相关 “\*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

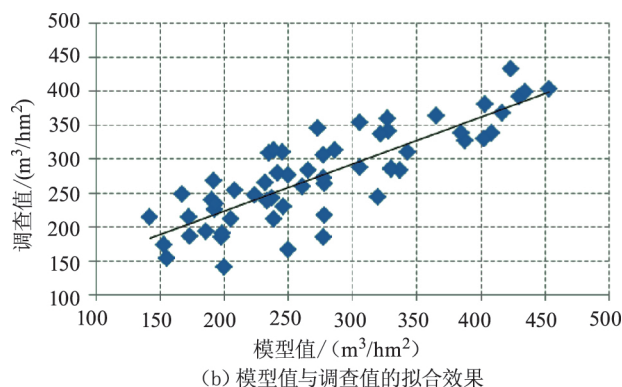
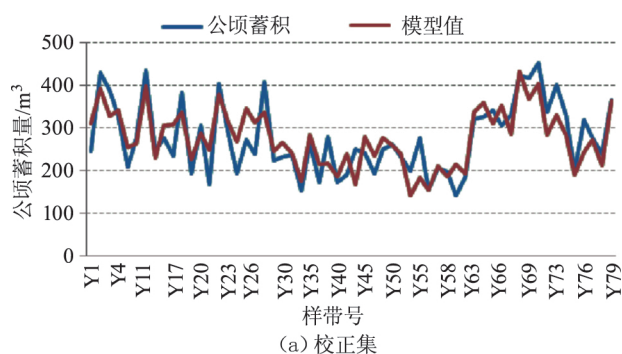


图 3 调查实测值与模型预测值对比图

Fig.3 Contrast diagram between survey measured value and model predicted value

### 3.3 森林蓄积量的空间分布特征

根据得到的遥感反演模型分别对研究区低海拔高地森林、低海拔平原森林、低山森林、稀疏森林、沼泽林蓄积量进行估算,按照  $< 100 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,  $100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,  $200 \sim 300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,  $301 \sim 400 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,  $\geq 400 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  进行 5 级分类,通过空间叠

加获得研究区的蓄积量等级的空间分布特征(图 4)。不难看出,森林蓄积量呈现研究区中部高于周边、北部和东部地区明显高于西北和东南地区的特征,这与研究区的土地覆盖类型分布相对应。

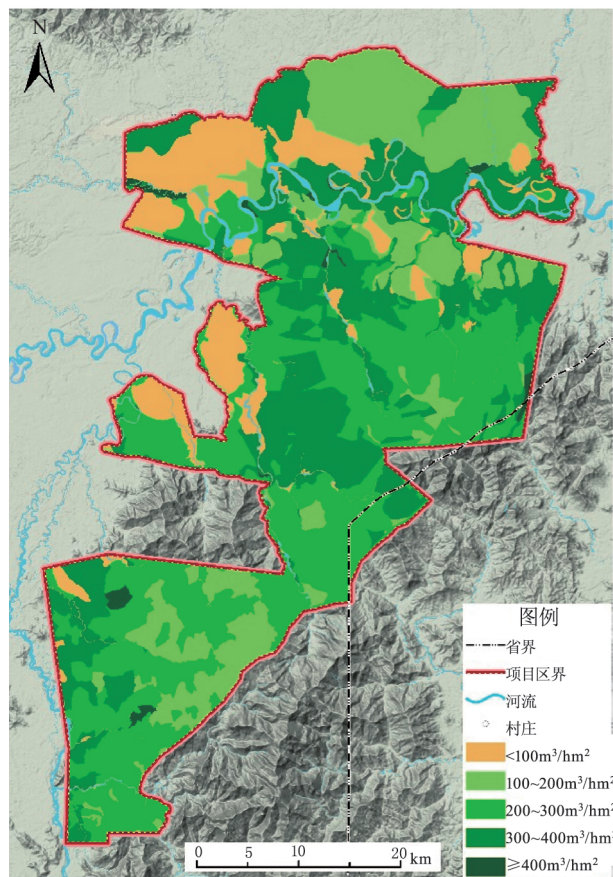


图 4 林木蓄积等级分布图

Fig.4 Grade distribution map of forest stock

## 4 结论

遥感技术反演热带森林林木蓄积量,有助于了解碳平衡以及评价区域的可持续发展,为林木资源的管理提供科学依据。本研究运用多元遥感数据对研究区的土地覆盖类型进行分类,并在其基础上,利用森林蓄积量反演模型获取不同森林类型的林木蓄积量,探讨了森林蓄积量的空间分布特征。

1) 研究区地表覆盖类型分为低海拔平原森林、低海拔高地森林、低山森林、稀疏森林、沼泽森林和其它类型共 6 种, Kappa 系数为 0.722, 总体精度达 79.2%, 分类精度效果较为理想,可信度较高。森林

资源主要集中分布在研究区的低海拔平原森林区和低海拔高地森林区。

2) 森林蓄积量的遥感估测中,影响蓄积量的建模因子主要有 Band 2, Band 3, Band 5, Aspect 和 Elevation 等。遥感影像建立的多元线性模型,具有显著的相关性,反演模型可以较好地进行研究区森林蓄积量的估算。

3) 研究区森林蓄积量达 4 254 万  $m^3$ ,平均每公顷蓄积为 239.6  $m^3$ 。低海拔平原森林是研究区主要的林木蓄积库,平均每公顷蓄积为 316.1  $m^3$ 。研究区森林蓄积量的分布特点表现为中部高于周边、北部和中东部山区明显高于西北和东南地区,与研究区的土地覆盖类型分布相对应。

4) 热带森林蓄积量反演模型的构建为未来林业资源调查工作的开展提供了一个方向,即利用遥感反演技术将部分地区的蓄积量扩展到整个研究区,这进一步缩短了工作的周期,减轻了工作的难度。本文在蓄积量的估算中仅使用了一种线性回归方法,不利于高精度反演模型的研究。因此,今后在森林蓄积量估测模型的优化研究中,需要在建模因子、建模技术等方面做进一步的研究,以期建立精度更高、实用性更强的蓄积量遥感估测模型。

#### 参考文献:

- [1] 陈仲新,张时新.中国生态系统效益的价值[J].科学通报,2000,45(1):17-22.
- [2] 王玉辉,周广胜,蒋延玲,等.基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式[J].植物生态学报,2001,25(4):420-425.
- [3] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1994,16(5):497-508.
- [4] 王斌,刘某承,张彪.基于森林资源清查资料的森林植被净生产量及其动态变化研究[J].林业资源管理,2009(1):35-43.
- [5] 焦燕,胡海清.黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化[J].应用生态学报,2005,16(12):2248-2252.
- [6] Li Wang, Niu Zheng, Chen Hanyue, et al. Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system[J]. Ecological Indicators, 2016, 67:637-648.
- [7] Maack J, Kattenborn T, Fassnacht F E, et al. Modeling forest biomass using Very-High-Resolution data—Combining textural, spectral and photogrammetric predictors derived from spaceborne stereo images[J]. European Journal of Remote Sensing, 2015, 48(1):245-261.
- [8] 方明程.高分遥感纹理信息对森林蓄积量估测的影响规律研究[D].西安:西安科技大学,2016.
- [9] 徐新良,刘纪远,庄大方,等.基于3S技术的中国东北地区林地时空动态特征及驱动力分析[J].地理科学,2004,24(1):55-60.
- [10] Gemmell F, Varjo J, Strandstrom M, et al. Comparison of measured boreal forest characteristics with estimates from TM data and limited ancillary information using reflectance model inversion[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2):365-377.
- [11] Barrett F, McRoberts R E, Tomppo E, et al. A questionnaire-based review of the operational use of remotely sensed data by national forest inventories[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174:279-289.
- [12] MaKela H, Pekkarinen A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196:245-255.
- [13] 王臣立,牛铮,郭治兴,等.基于植被指数和神经网络的热带人工林地上蓄积量遥感估测[J].生态环境学报,2009,18(5):1830-1834.
- [14] 侯长谋,杨燕琼,黄平,等.基于RS、GIS的马尾松林分蓄积量判读模型研究[J].林业资源管理,2002(5):55-58.
- [15] 周亦,张亚亚.利用eCognition进行高分一号卫星数据土地利用现状解译能力测试[J].测绘通报,2016(8):77-80.
- [16] 焦险峰,杨邦杰,裴志远.基于分层抽样的中国水稻种植面积遥感调查方法研究[J].农业工程学报,2006,22(5):105-110.
- [17] 刘三超,张万昌,蒋建军,等.用TM影像和DEM获取黑河流域地表反射率和反照率[J].地理科学,2003,23(5):585-591.
- [18] 赵冰雪,章勇.基于Landsat-8 OLI影像的植被信息提取方法研究[J].测绘与空间地理信息,2018,41(1):79-85.
- [19] 李亦秋,冯仲科,邓欧,等.基于3S技术的山东省森林蓄积量估测[J].林业科学,2009,45(9):85-93.
- [20] 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.