

# 结合影像光谱与地形因子的森林蓄积量估测模型\*

王佳 宋珊芸 刘霞 杨慧乔 冯仲科

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室,北京 100083)

**摘要:**以资源三号卫星遥感图像为数据源,以内蒙古旺业甸林场为研究区域,通过外业调查获取的样地蓄积量真实值,对资源三号影像进行处理,获得对应样地的波段光谱值、光谱组合值及地形因子信息,应用多元回归分析,分别建立阔叶林和针叶林蓄积量估测模型。实验结果表明:蓄积量估测模型相关系数阔叶林为0.815,针叶林为0.761,说明资源三号卫星影像的光谱值、光谱组合值及地形因子与蓄积量具有较强的相关性,同时利用检验数据,得出模型的预估精度,其中阔叶林为85.3%,针叶林为91.9%,预估精度较高,研究表明利用资源三号卫星影像进行森林蓄积量估测具有很好的应用前景。

**关键词:**森林蓄积量 卫星影像 波段光谱 地形因子 估测模型

**中图分类号:** S758.5<sup>+</sup>.1; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)05-0216-05

## 引言

森林蓄积量是林分调查中一个非常重要的因子,是评价森林数量的主要指标。单位面积蓄积量,在某种程度上标志着林地生产力以及经营措施的效果<sup>[1]</sup>。因此,蓄积量的测定是林分调查的主要目的之一,它为森林经营和采伐利用提供重要的数量依据。传统的森林一、二类调查需要投入大量的人力、物力、财力,而且在调查中存在数据难以保存、易丢失、精度不高等问题<sup>[2]</sup>。随着先进航天遥感与地理信息系统在林业中的应用,利用3S(GIS、RS、GPS)技术进行森林蓄积量的定量估测,国内外已有众多学者进行了相关研究并取得了重要成果<sup>[3-5]</sup>。目前,森林蓄积量遥感估测研究主要集中在以下几方面:①在数据方面,主要有光学遥感与微波遥感,或者多源数据相结合<sup>[3,6]</sup>。②在模型方面,目前有多元线性回归模型与描述非线性关系的K最近邻分类算法(K-Nearest Neighbor, KNN, 简称KNN法)与人工神经网络模型<sup>[7-8]</sup>。本文参考已有针对其他图像估算森林蓄积量的研究方法<sup>[9]</sup>,采用我国最新自主研发的资源三号卫星影像数据光谱特征与地形因子信息为参数,以旺业甸实验林场蓄积量的实测数据为真值,建立基于资源三号卫星的蓄积量估测模型。

## 1 数据处理与获取

### 1.1 研究区概况

旺业甸林场位于内蒙古自治区赤峰市喀喇沁旗西南部,地处燕山山脉北麓七老图山支脉,是茅荆达坝次生林区的重要组成部分,为赤峰市重点国有林场之一。地理位置为东经118°09′~118°30′,北纬41°21′~41°39′,地形地貌为中山山地,海拔高度800~1890 m。经营区属暖温带半干旱地区,为明显的大陆性季风气候。年降水量400~600 mm,多集中在7、8月份,年平均气温4.2℃,无霜期117 d。林场经营面积2.8万hm<sup>2</sup>,其中有林面积2.33万hm<sup>2</sup>,在有林面积中人工林1.17万hm<sup>2</sup>,主要树种为落叶松、油松;天然林1.16万hm<sup>2</sup>,主要树种为白桦、山杨和柞树,研究区位置如图1所示。

### 1.2 外业数据获取

外业调查是建立遥感解译的标志和遥感解译精度评价的一个必要手段,同时也是本研究中获取森林地面样点植被蓄积量的重要手段。

外业调查的首要工作是选择样地,主要方法是根据人为主观判断来选取,选出的样地应能代表被调查林分的平均状况,是整个林分的缩影。选择样地时,需要对所调查林分作全面踏查,从而充分掌握林分特点,选出具有代表性、典型性、原始性的地段来设置样地;所选的样地不能跨越河流和道路,应位

收稿日期:2013-05-30 修回日期:2013-08-22

\*北京高等学校“青年英才计划”资助项目(YETP0738)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH34B01)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110014120002)

作者简介:王佳,副教授,博士,主要从事林业装备与3S技术研究,E-mail:wangjia2002\_0@163.com



图 1 研究区位置

Fig.1 Site of study area

于林分中间地带,且地形的坡度大于 $5^\circ$ ,样地闭合差不超过各边总长的 $1/200$ 。

调查方法:旺业甸林场地区一共有 2 000 多个小班,林场占地面积较大,为了调查方便,结合林相图,按 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  网格布点。在林场工作人员的指导下,结合当地实际情况,采用机械抽样的方法,布设了 117 块分布比较均匀的样地点。蓄积量调查分两次进行:一次在 2012 年 5 月,共采集样地 92 块,作为建模数据;另一次在 2013 年 8 月,采集样地 25

块,作为模型验证数据。样地尽量选取靠近公路的地方,方便人员设备的到达。同时在进行样地调查时,应对样地中心用差分 GPS 进行精确定位,记录后,开始对样地内的林分进行详细调查,包括样地参数:坡度、坡向、海拔、林分类型、土壤类型、优势树种等。蓄积量调查是利用高精度电子角规进行乔木角规绕测,计算样地林分蓄积量。

为了能在 ArcGIS 10.0 软件中对样地数据进行分析制图,并与资源三号图像进行叠加分析,将样地的数据转换为 DBF 格式,在 ArcGIS 10.0 中建立 .shp 文件以及其他的属性字段。其中属性数据包括:样地坐标、海拔高度、坡度、坡向、优势树种、林种、起源、平均年龄等。

### 1.3 资源三号卫星数据处理

资源三号卫星是我国 2012 年 1 月 9 日发射升空的资源监测卫星,利用经过适应性改进的资源二号卫星平台,装载了 2.1 m 分辨率正视全色 CCD 相机、3.5 m 分辨率的前后视相机和分辨率为 5.8 m 的多光谱相机,实时或准实时将图像数据传回地面。与现有的资源类遥感卫星相比(如 SPOT 5),资源三号卫星图像分辨率高、图像几何精度和目标定位精度较高,具有 1:50 000 比例尺的立体测图能力<sup>[10-11]</sup>。表 1 为资源三号卫星多光谱影像的波段光谱信息。

表 1 资源三号卫星波段光谱信息

Tab.1 Spectral signature information of ZY-3 multispectral image

波段名称	波段范围/ $\mu\text{m}$	光谱特征及应用
蓝光(B1)	0.45 ~ 0.52	对水有强的穿透能力,对叶绿素反应敏感,用于测定叶绿素浓度
绿光(B2)	0.52 ~ 0.59	对健康茂盛植物的绿色反射敏感,对水也有一定的穿透力,依据植物的反射率来区分林型、树种
红光(B3)	0.63 ~ 0.69	为叶绿素主要吸收波段,反映不同植被的叶绿素吸收情况和植被健康情况,用于区分植物种类与植被覆盖度
近红外(B4)	0.77 ~ 0.89	对绿色植物类别差异最敏感,用于生物量测量、作物长势监测和水域判别等

资源三号卫星影像处理包括以下步骤:

(1)根据林场林相图对资源三号卫星影像数据进行大气校正与几何校正。大气校正的目的是消除大气折射、散射等现象产生的噪声,提高地物提取精度。根据已有研究资料表明,在植被定量遥感中需要进行准确的辐射定标。本研究用 6S、MODTRAN 等模型结合实测大气参数进行大气校正。本研究辐射定标采用线性经验值法,且主要目的是进行定性分析,因此使用 ENVI 4.8 快速大气纠正工具 QUAO 去除部分大气的影响,以提高森林信息提取精度。

(2)以 1:10 000 比例尺的研究区地形图为基础,利用 ENVI4.8 软件对资源三号卫星影像数据进行几何精校正,纠正方法为二次多项式,均匀选取

30 个控制点,总 RMSE 为 0.43,投影为 WGS84/UTM,采样方式采用最临近像元法。

(3)根据研究区行政界线对遥感影像进行裁剪,提取研究区遥感影像图,如图 2 所示。

(4)由于资源三号卫星能提供前视和后视影像,可以提取立体像对,制作数字高程模型(DEM),故进而利用 DEM 提取坡度、坡向和高程等地形因子信息。本研究处理资源三号卫星前、后视影像,利用 ENVI 4.8 软件提供的 DEM Extraction 功能模块,自动制作 DEM 图。

### 1.4 精度检验方法

利用地面调查实测数据与资源三号卫星光谱特征信息、地形因子信息分别建立针叶林和阔叶林多

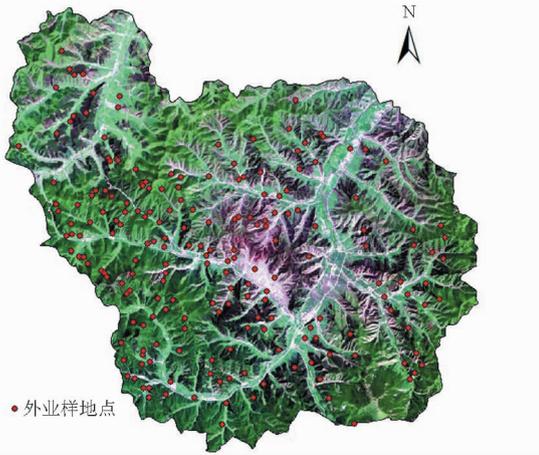


图2 研究区遥感影像图

Fig.2 ZY-3 image of study area

元线性回归模型,为了有效验证模型精度,先通过模型计算预测值,再通过实测数据与预测数据进行对比分析,计算其预测精度。实验选取平均相对误差,总体预估精度作为检验指标<sup>[12]</sup>,计算公式如下:

平均相对误差

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \right) \times 100\% \quad (1)$$

预估精度

$$P = \left( 1 - \frac{t_\alpha \sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\hat{y} \sqrt{n(n-T)}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中  $y_i$ ——实测值  $\hat{y}_i$ ——预估值  
 $n$ ——样本单元数  
 $t_\alpha$ ——置信水平  $\alpha$  时的  $t$  分布值  
 $T$ ——回归模型参数个数  
 $\hat{y}$ ——平均预估值

## 2 结果与分析

将外业样地 GPS 定位的坐标点展绘到 ArcGIS 10.0 软件中,并将 GPS 定位点进行坐标系转换,利用软件 Identify 功能,读取每一点的卫星影像波段光谱值、光谱组合值、高程、坡度、坡向值作为自变量,建立起像元蓄积量与影像波段光谱值及地形因子之间的一一对应关系,作为森林蓄积量反演模型的样本数据,其中波段光谱组合值,参照 SPOT 5 影像数据波段光谱组合<sup>[13-14]</sup>,其主要原因是资源三号卫星的 2、3、4 波段与 SPOT 5 的 1、2、3 波段具有相似的光谱值范围。在 SPSS 16 软件中,对实地样本点森林蓄积量与 9 个光谱因子和 3 个地形因子之间的相关性、信息量和方差扩大因子进行分析,通过对比,最终采用经典的多元线性回归方法,建立森林蓄积量与各个光谱因子、地形因子之间的多元回归模型<sup>[15]</sup>。多元线性回归模型的基本表达式为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

其中  $\varepsilon$  是随机项,服从正态分布  $N(0, \sigma^2)$ 。

在本研究中,因变量  $y$  是森林样地实测蓄积量,  $x$  为遥感各波段光谱值和光谱值组合及 3 个地形因子,对应关系如表 2 所示。

表 2 光谱与地形因子表

Tab.2 Remote sensing and topographic factors

变量	变量对应的因子	变量	变量对应的因子
$x_1$	B2	$x_7$	$(B3 - B4)/B2$
$x_2$	B3	$x_8$	$(B2 - B3)/(B2 + B3)$
$x_3$	B4	$x_9$	$(B3 - B4)/(B3 + B4)$
$x_4$	B2/B3	$x_{10}$	坡度
$x_5$	B3/B4	$x_{11}$	坡向
$x_6$	$(B2 - B3)/B4$	$x_{12}$	高程

研究用于建立蓄积量模型的实测有效外业样本点数据为 92 个,通过各波段方差分析,对样本点数据继续筛选,剔除掉离群值较大的样本点 11 个。由离群样本点调查发现,造林规划进行的择伐造成与其他未经过采伐的林地存在较大误差,不符合本研究的要求。剔除后建模的样本点数为 81 个,其中针叶林 50 个,阔叶林 31 个,样本数量在统计学上构成大样本。第 2 次调查的 25 个样本作为模型检验数据,其中针叶林 15 个,阔叶林 10 个,各约占建模样本总数的 30%。通过利用统计分析软件 SPSS 16 实验,各个变量与蓄积量的相关性均在 0.2 以上,比较稳定,去除任何因子对于蓄积量模型精度影响较大,所以在建立回归模型时采用了强制进入(ENTER),即所有变量均参与建模,最终建立的研究区森林蓄积量遥感反演模型为:

阔叶林

$$y = -2405.065 - 137.871x_1 - 23.145x_2 + 256.467x_3 + 2425.409x_4 - 1635.117x_5 + 28.606x_6 - 39.828x_7 - 350.615x_8 + 11445.429x_9 + 0.002x_{10} + 2.323x_{11} - 0.499x_{12} \quad (4)$$

针叶林

$$y = -1153.726 - 2.293x_1 - 1.759x_2 + 11.092x_3 + 801.790x_4 + 75.234x_5 + 0.289x_6 - 5.416x_7 - 1599.394x_8 - 8.570x_9 + 0.210x_{10} + 0.477x_{11} + 0.276x_{12} \quad (5)$$

通过计算得到针叶林和阔叶林模型精度见表 3,方差分析见表 4。

表 3 针叶林、阔叶林模型精度

Tab.3 Precision of multiple linear regression model

模型	$R$	$R^2$	Adjust $R^2$	SEE
针叶林	0.761	0.579	0.443	40.839
阔叶林	0.815	0.665	0.473	45.123

表4 针叶林、阔叶林模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of multiple linear regression

模型	方差来源	平方和	自由度	均方	F	Sig.
针叶林	回归	84 998. 79	12	7 083. 22	4. 25	0. 036
	残差	61 710. 43	37	1 667. 85		
	总计	146 709. 23	49			
阔叶林	回归	64 555. 33	12	5 379. 61	2. 64	0. 000
	残差	32 577. 02	18	2 036. 06		
	总计	97 132. 36	29			

表3可看出,针叶林多元线性回归模型的相关系数 $R$ 为0.761,阔叶林 $R$ 为0.815,针叶林模型决定系数 $R^2$ 为0.579,阔叶林 $R^2$ 为0.665。说明利用资源三号卫星光谱信息和地形信息建立的研究区域的针叶林和阔叶林多元线性回归模型,参与拟合的因子与蓄积量具有较好的相关性,所建立模型具有实用性。

表4可看出,针叶林多元线性回归模型 $F$ 显著性检验小于0.05,可以通过置信度为95%的显著性检验,而阔叶林模型 $F$ 显著性检验小于0.01,可以通过置信度为99%的显著性检验,综合来看,2个模型均可以通过显著性检验,表明回归方程具有较高的显著性。将第2次调查的25个检验样本代入式(4)和式(5)中,计算结果如表5所示。

将表5中模拟值与实测值的相对误差分别代入式(1)、(2)中,得针叶林平均相对误差 $\bar{E}$ 为7.35%,预估精度 $P$ 为91.9%;阔叶林平均相对误差 $\bar{E}$ 为3.42%,预估精度 $P$ 为85.3%。可以看出不论是针叶林或者阔叶林,总体预估精度均在80%以上,特别是针叶林预估精度达到90%以上,预估精度较高。

### 3 结论

(1)通过模型精度分析表明:针叶林多元线性回归模型的相关系数为0.761,阔叶林为0.815,针叶林模型的决定系数为0.579,阔叶林为0.665,说明利用资源三号卫星光谱信息和地形信息建立的研究区域的针叶林和阔叶林多元线性回归模型,参与拟合的因子与蓄积量具有较好的相关性,所建立模

表5 森林蓄积预测值与调查值比较

Tab. 5 Comparison between predicted results and measured results for forestry volume

样地类型	样地号	模拟值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	实测值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	相对 误差/%
针叶林	1	138.16	149.31	7.47
	2	177.16	171.08	3.55
	3	214.23	226.76	5.53
	4	153.61	135.74	13.17
	5	503.25	524.51	4.05
	6	271.06	240.42	12.74
	7	214.82	219.05	1.93
	8	112.51	101.78	10.55
	9	124.18	144.39	13.99
	10	153.87	143.37	7.32
	11	109.63	106.84	2.61
	12	171.61	155.89	10.08
	13	127.41	115.37	10.43
	14	97.48	87.69	11.17
	15	223.54	247.89	9.82
阔叶林	1	67.32	71.36	5.99
	2	252.52	266.16	5.4
	3	212.51	216.64	1.94
	4	160.23	151.83	5.24
	5	203.75	183.23	10.1
	6	85.17	83.85	1.55
	7	82.38	89.09	8.14
	8	141.04	137.54	2.49
	9	73.21	77.51	5.87
	10	127.45	121.58	4.6

型具有实用性。同时2个回归模型均可以通过显著性检验,表明回归方程具有较高的显著性。

(2)利用检验数据,计算得出针叶林平均相对误差 $\bar{E}$ 为7.35%,预估精度 $P$ 为91.9%;阔叶林平均相对误差 $\bar{E}$ 为3.42%,预估精度 $P$ 为85.3%。可以看出不论是针叶林或者阔叶林,总体预估精度均在80%以上,特别是针叶林预估精度达到90%以上,预估精度较高,说明利用资源三号卫星数据进行森林蓄积量估测,进而估算森林生物量具有很好的应用前景,可以替代国外同类资源卫星产品。

### 参 考 文 献

- 程武学,杨存建,周介铭,等.森林蓄积量遥感定量估测研究综述[J].安徽农业科学,2009,37(16):1-2.  
Cheng Wuxue, Yang Cunjian, Zhou Jieming, et al. Research summary of forest volume quantitative estimation based on remote sensing technology[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(16): 1-2. (in Chinese)
- 汪丽,崔彤.林分调查中蓄积量测定方法的探讨[J].内蒙古林业调查设计,2013,36(1):56-57.
- Widłowski J L, Pinty B, Gobron N, et al. Detection and characterization of boreal coniferous forests from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D24): 33405-33419.
- Trotter C M, Dymond J R, Goulding C J. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using LANDSAT TM[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(10): 2209-2223.
- Dong J R, 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):393–411.
- 6 Makela H, Pekkarinen A. Estimation of forest stands volumes by LANDSAT TM imagery and Stand-level field inventory data[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(2–3):245–255.
- 7 杨永恬. 基于多源遥感数据的森林蓄积量估测方法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.  
Yang Yongtian. Study on estimating methods of forest stem volume based on multi-source remote sensing image [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010. (in Chinese)
- 8 洪奕丰, 林辉, 严恩萍, 等. 基于偏最小二乘法的平南县森林蓄积量估测模型研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(7):80–85.  
Hong Yifeng, Lin Hui, Yan Enping, et al. Forest volume estimation model based on partial least square in Pingnan County, Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(7):80–85. (in Chinese)
- 9 涂云燕, 彭道黎. 基于RS的森林蓄积量主成分回归估测[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(10):75–77.  
Tu Yuanyan, Peng Daoli. Estimation of forest volume by principal component regression based on RS[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(10):75–77. (in Chinese)
- 10 余坤勇, 林芳, 刘健, 等. 基于RS的闽江流域马尾松林分蓄积量估测模型研究[J]. *福建林业科技*, 2006, 33(1):16–23.  
Yu Kunyong, Lin Fang, Liu Jian, et al. Study on estimating model of *pinus massoniana* stand volume in Minjiang watershed based on RS technologies[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2006, 33(1):16–23. (in Chinese)
- 11 黄伟平, 谭三清, 张贵, 等. 估测森林蓄积量的遥感因子选择研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(4):112–115.  
Huang Weiping, Tan Sanqing, Zhang Gui, et al. Selection of remote sensing factors for estimating forest volume[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2010, 30(4):112–115. (in Chinese)
- 12 何诚, 冯仲科, 袁进军, 等. 基于数字高程模型的树木三维体积测量[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8):202–206.  
He Cheng, Feng Zhongke, Yuan Jinjun, et al. Measuring tree three-dimensional volume based on digital elevation model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8):202–206. (in Chinese)
- 13 Lattin J M, Carroll J D, Green P E. Analyzing multivariate data[M]. South-Western: Thomson Learning, 2002.
- 14 马瑞兰, 李卫忠. 基于SPOT5遥感影像选择森林蓄积估测因子——以火地塘教学实验林场为例[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(7):111–112, 137.  
Ma Ruilan, Li Weizhong. Selection of factors for estimating forest volume based on SPOT5 remote sensing images: a case study of Huoditang Forest Station[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(7):111–112, 137. (in Chinese)
- 15 孙道德. 基于残差平方和的线性模型选择简单方法及其相合性研究[J]. *数学杂志*, 2006, 26(6):642–646.  
Sun Daode. Study of the simple method and its strong consistency for selecting the linear regression model based on the square of residues[J]. *Journal of Mathematics*, 2006, 26(6):642–646. (in Chinese)

## Forest Volume Estimation Model Using Spectra and Topographic Factors of ZY-3 Image

Wang Jia Song Shanyun Liu Xia Yang Huiqiao Feng Zhongke

(Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Taking Wang Ye Dian Forestry Farm as the study area, forest volumes of sample plots were obtained as the true value through field investigation. At the same time, the images of satellite ZiYuan 3 (ZY-3) were processed, and corresponding band spectra value, combination value of spectra and topographic information of the sample volumes were obtained. Through multiple regression analysis, broad-leaved forest and coniferous forest volume estimation models were established. The experimental results show that the correlation coefficient of broad-leaved forest volume estimation model was 0.815, and that of coniferous forest was 0.761. There was a strong correlation between the spectra value, combination of spectra, topographic factors of ZY-3 and the forest volume. The model prediction accuracy was verified, and accuracies of broad-leaved forest and coniferous forest models were 85.3% and 91.9%, respectively. The study suggests that the use of ZY-3 images for the forest volume estimation has good application prospect.

**Key words:** Forest volume Image of satellite Band spectra Topographic factors Estimation model