

# 资源三号遥感卫星影像的生物量反演研究

刘芳,冯仲科\*,赵芳,宋亚男

(北京林业大学 精准林业北京市重点实验室,北京 100083)

**摘要:**研究了北京市森林生物量遥感估测模型的构建和合理性判断。建立森林生物量模型所需的各种数据,包括 2012 年的资源三号卫星影像数据和实测样地调查数据。采用 9 格法提取的遥感影像信息,其中影像的纹理因子作为建模因子之一,与光谱因子、地形因子一起与实地样地数据建立生物量模型,进行生物量反演,通过精度分析,分别建立整个北京市针叶林和阔叶林的森林生物量反演模型,其相关系数分别为 0.82、0.71,拟合估测精度分别为 76.75%、80.02%,为提高林业调查的效率与精度提供一种方法。

**关键词:**生物量;卫星影像;遥感;反演模型

**中图分类号:**S758.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2015)03-0175-07

## Biomass Inversion Study of ZY-3 Remote Sensing Satellite Imagery

LIU Fang, FENG Zhong-ke\*, ZHAO Fang, SONG Ya-nan

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

**Abstract:** Establishment of the remote sensing estimation models and their rational judgment of forest biomass in Beijing were investigated. Different data for the establishment were extracted, including the 2012 ZY-3 satellite image data and field measurements of plot investigation data. Nine lattice method was adopted for the extraction of remote sensing image information. Texture factor of remote sensing image was used as one of factors for the establishment of models, others included spectral factor, terrain factor, and field plot data, by which the estimation models for forest biomass were established, and forest biomass inversion was conducted. Through the precision analysis, inversion models of forest biomass of broadleaved and coniferous forests in Beijing were established, with correlation coefficients of 0.82 (broadleaved) and 0.71 (coniferous), fitting estimation accuracy of 76.75%, 80.02%. The results would provide a method to improve the efficiency and accuracy of the forest investigation.

**Key words:** biomass; satellite image; remote sensing; inversion model

为了掌握全国森林资源的变化情况,需要定期汇总并对外发布森林覆盖率、活立木蓄积量、森林健康状况等指标。怎样快速高效的获取这些指标数据则是目前众多林业工作者的研究方向。森林资源信息通过对一定空间和时间范围内的森林资源的数量和质量,运用定性和定量的方法科学地确定森林蓄积量、森林郁闭度及林地面积等参数<sup>[1]</sup>。近年来,借助遥感技术获取森林资源调查所需要的林分因子,

以代替费时、费人力的外业实地调查。林分蓄积量、生物量是森林资源调查的主要指标,是林业工作的基础数据。因此,快速、准确的获取林分蓄积量、生物量是众多林业工作者的主要研究方向。在 20 世纪八、九十年代就开始对利用遥感卫星影像进行森林蓄积量的反演研究。李崇贵<sup>[2]</sup>等运用 Landsat TM 影像的波段及波段组合最为自变量来估测林分面积、郁闭度和蓄积量。马瑞兰<sup>[3]</sup>运用 SPOT5 影

收稿日期:2014-08-01 修回日期:2015-03-04

基金项目:国家自然科学基金(41371001)。

作者简介:刘芳,女,在读博士,研究方向:林业装备与信息化。E-mail:fang1986927@126.com

\* 通信作者:冯仲科,男,博士、教授、研究方向:地理信息系统。E-mail:fengzhongke@126.com

像,选择出 SP3、SP(1-2)/(1+2)、SP(2-3)/(2+3) 3 个波段组合作为遥感反演因子与海拔、坡度、坡向等因子建立火地塘林场森林蓄积量的多元线性回归估测模型,相关系数达到 0.782。郑刚<sup>[4]</sup>提出利用 KNN 方法对森林蓄积量进行估计和反演。许炜敏<sup>[5]</sup>利用福州市闽侯白沙国有林场的 QuickBird 遥感影像结合该地区的 DEM,分别运用神经网络方法和偏最小二乘法,通过立地因子、林分因子、影像波段以及植被指数与蓄积量的关系式来估测该地区的蓄积量。通过与实地实测数据的验证,估测精度分别可达到 88.5% 和 85.9%。王维枫等对单木及森林生物量模型和历史进行了介绍,并预测了遥感反演生物量模型也是未来的发展趋势<sup>[6]</sup>。翟晓江<sup>[7]</sup>等利用 TM 遥感影像和 B-P 神经网络模型得到了黄龙山林区生物量分布图。

国外对遥感应用于森林生物量反演的研究大多是基于有植被地区土壤水分的多时相的机载雷达和遥感影像的方法研究<sup>[8-9]</sup>。R. O. Dubayah<sup>[10]</sup>通过使用激光雷达遥感技术对林区的多个树种进行了量测,成功的分析出生物量与被测树高具有较高的相关性。而基于遥感影像研究生物量的研究大多也是通过 MODIS、TM 等低分辨率高光谱遥感影像进行的。J. A. Blackard<sup>[11]</sup>通过利用 MODIS 和 TM 影像数据,并结合气象数据、地形数据等辅助数据,采用回归法,绘制出美国全国生物量分布图。本文则对利用高空间分辨率的遥感影像估测生物量的方法进行了探索研究。

随着我国自主研发的资源三号遥感卫星的成功发射及影像的传回,标志着我国具有生产高空间分辨率卫星影像的能力。本研究采用资源三号卫星数据估算北京市的森林生物量,该卫星装载了 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,与现有的资源类遥感卫星相比,资源三号测绘卫星图像分辨率高、图像几何精度和目标定位精度较高,其 1:5 万立体测图能力在国际上有很强的竞争力;资源三号卫星的前视影像和后视影像可以提取 DEM,进而提取海拔、坡度、坡向数据。与传统的遥感建模方法相比,本研究根据地面的精准调查数据,结合遥感数据,通过数据分析,研究纹理因子和地形因子对模型的贡献并最终得到整个北京市森林生物量反演模型。

## 1 研究区概况

研究区是北京市 14 个区县(115.7°—117.4°E、39.4°—41.6°N)。总面积约 16 410.54 km<sup>2</sup>。北京

市的植被类型以温带针叶林和暖温带落叶阔叶林为主,其中针叶林类型以侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)为主,两者人工林和次生林都有,属于暖温带温性针叶林;而阔叶类型相对较多,有椴树(*Tilia*)、杨树(*Populus*)、桦树(*Betula*)、栎(*Quercus*)沟谷杂木林等群系和群系组。整个北京市的林地面积主要是由针阔叶混交林为主要类型,约有 380 km<sup>2</sup>,占山区森林面积的 35%,分布较零散,小片林较多<sup>[12]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据介绍与预处理

2.1.1 资源三号卫星数据概况 资源三号测绘卫星是我国自主研发的民用高分辨率立体测绘卫星,于 2012 年 1 月 9 日发射升空的。该卫星是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 分辨率的前视、后视全色 CCD 相机和分辨率为 5.8 m 的多光谱相机,实时或准实时的将图像数据传回地面。该卫星可以通过观测前、后视影像测制 1:5 万比例尺的地形图以及 13 m 分辨率的 DSM 数据等。回归周期为 59 d,重访周期为 5 d<sup>[13]</sup>。与其他资源类型的卫星相比,资源三号卫星影像的空间分辨率高,有 1:5 万的立体测图能力,在国际上具有领先水平。该卫星提供的高精度、及时的影像已经应用于国家基础设施建设、自然灾害防治与监控、灾后评价等方面。该影像也是国家基础测绘的主要数据源,为我国测绘事业的长期发展提供强有力的保障。

2.1.2 数据预处理 影像的原始波段信息不能满足我们的使用要求,所以要对原始影像进行预处理。首先要对图像做正射校正。原始影像本身自带 RPC 文件,可以利用 ENVI 自动识别 RPC 文件功能进行做正射影像。此功能在缺少控制点的情况下使用该功能。

正射纠正:利用在 ENVI 中,分别对研究区的全色影像和多光谱影像进行正射纠正,选择 Map-Orthorectification-Generic RPC and RSM-Orthorectify using RPC or RSM 功能进行纠正。

影像融合:继续利用 ENVI 的融合功能,分别对资源三号卫星影像的全色影像和多光谱影像进行融合。具体操作:在主菜单下,选择 Transfrom-Image-Sharpening Gram-Schmidt Spectral Sharpening 进行融合。使融合后的新影像即具有全色影像的高空间分辨率 2.1 m,也具有多光谱影像的高光谱特征(R、G、B、近红外)。

影像剪切:为了处理方便,图像美观,根据研究区的范围线对影像进行镶嵌剪切,得到研究区的完整的研究区影像。通过 ArcGIS 软件,Toolbox-Da-  
ta Management Tools-Raster-Raster Processing-  
Clip 进行裁剪。利用北京市边界图进行裁剪得到  
影像融合、裁剪后的资源三号多光谱遥感影像图(图  
1)。为后续提取波段组合和纹理因子做好准备。

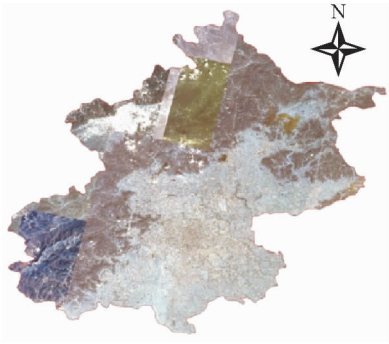


图 1 资源三号遥感卫星影像融合后影像(北京)

Fig. 1 ZY-3 Merge image(Beijing)

2.2 外业数据获取

外业实地数据调查是获取森林地面样点植被生物量的重要手段,也是建立遥感反演模型和遥感解译精度评价的最基础的数据,本研究采用的外业实地调查数据是 2013 年 8 月门头沟葡山地区的林地和鹫峰国家森林公园中的 209 块实测角规样地数据以及北京市 34 块固定样地,从中选取 110 个样点作为生物地面样点数据。其中角规数据通过计算其蓄积量进而转化为生物量。

由于每块角规样地形状不规则,且面积大于遥感影像的像元面积。为了数据统一,选取每块样地的角规点的坐标点来代表每块样地的坐标位置,其中心所在像元为本块样地的代表像元,然后将样地的生物量换算成像元生物量,即单位为 t/4.41 m<sup>2</sup>(资源三号遥感影像多光谱和全色波段融合后分辨率为 2.1 m),来对应每个代表像元的生物量。

一般林业上生物量的计算是有活立木蓄积量计算而来。根据方精云<sup>[14-15]</sup>的研究,蓄积量和生物量之间呈线性关系,但是依据不同的树种,转换系数不同而已。首先根据外业获取采集到的胸径、树高、冠径等立木几何参数等信息计算蓄积量:

$$M=\frac{F_g}{n}\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nZ_{ij}(fh)_{ij}$$
 (1)

式中, $F_g$  为角规计数, $Z_{ij}$  为 1.3 m 处胸径横面积, $h$  为树高, $f$  实验形数。

不同树种的蓄积量和生物量之间呈线性关系,参考方精云<sup>[14-15]</sup>的研究,北方主要树种蓄积转换为生物量的计算公式如表 2。

表 1 主要树种形数

Table 1 The form factor of the main tree species

平均实验形数		适用树种
针叶树	0.43	侧柏等柏树
	0.41	油松、落叶松、白皮松等松树
阔叶树	0.40	白桦、黑桦、红桦、栓皮栎、蒙古栎、山杨、栎树、刺槐、榆树

表 2 主要树种蓄积量生物量转换公式

Table 2 Volume of biomass conversion formula of main tree species

树种	转换公式
侧柏( <i>Platycladus orientalis</i> )	$B=0.612\ 9V+26.145\ 1$
油松( <i>Pinus tabulaeformis</i> )	$B=0.755\ 0V+5.092\ 8$
桦木( <i>Betula</i> )	$B=0.964\ 4V+0.848\ 5$
栎树( <i>Quercus</i> )	$B=1.328\ 8V-3.899\ 9$
杨树( <i>Populus</i> )	$B=0.475\ 4V+30.603\ 4$
其他树种	$B=0.462\ 2V+12.825\ 6$

注: $B$  为生物量, $V$  为蓄积量。

2.3 建模因子的提取

2.3.1 像元光谱提取 遥感卫星影像的纹理携带着丰富的信息,不同的地物在同一光谱中会产生不同的光谱值,同一地物在不同的光谱波段中光谱值也不相同,也就是所谓的“异物同谱”、“同谱异物”。

植被光谱特征主要是随着植被类型、种类组成、植被盖度、叶绿素含量、植物水分、土壤物理特征及大气状况等多种因素的变化而变化,同时也会受太阳高度角、植物生物期、植被光谱的影像而产生比变化<sup>[14-16]</sup>。

生物量信息是通过遥感影像上的每个像元对应一定面积的地物单元生物量不同光谱反射强度来反映的。生物量是光谱反射强度的函数。反演生物量一般通过测定若干个地面点的生物量(地面方格中的圆圈代表样地),然后建立对应点的生物量和像素之间的回归模型,用方程的方式来估计所有像元代表的地面生物量,最后通过分析,比较选择较敏感的波段来回归生物量。

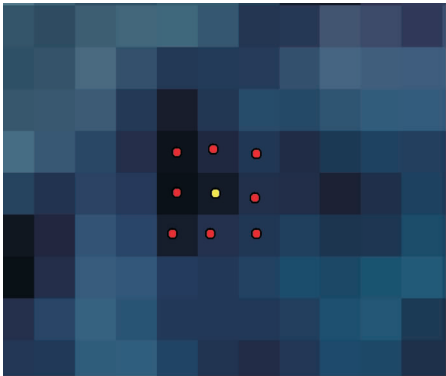


图 2 九格法提取影像信息(ZY-3 影像)

Fig. 2 Nine lattice method to extract the image information(ZY-3 image)

遥感影像的分辨率不同,每个像元所对应的地

面面积也不同。为了更加准确的通过遥感影像元光谱值和生物量建立准确的关系,采用平均中心像元法以作为该中心像元的光谱特征值<sup>[13]</sup>。一般采用窗口有 3×3(9 格)、5×5(25 格)、7×7(49 格)、9×9(81 格)四个级别。以九格法提取卫星遥感影像为例(图 2),假设黄色点为样地中心坐标,那么提取遥感信息时不仅提取中心的像元还要对周围的 8 个像元同时提取,然后在对其进行平均运算,将得到的该平均值作为本块样地的代表像元。

以提取单波段像元灰度值为例,提取遥感信息值采用 ARCGIS 软件,首先将单波段的遥感影像逐个加载到 ArcMAP 中,然后将实测的每个样地的中心点坐标展点到遥感影像上,然后根据每个中心点的位置将周围的 8 个像元也赋上点信息,然后利用 Toolbox 中的 Spatial Analyst Tools 工具下的 Extract Values to Points 工具将每个单个波段中各点对应像元灰度值提取出来并生成属性表。然后再对属性表进行整理,对以中心点为坐标的 9 个像元所对应的灰度值进行平均计算,最后将得到的平均值最为该样地的像元生物量。

2.3.2 纹理因子的提取 纹理因子包括均值(mean)、方差(variance)、熵值(entropy)、二阶矩(second moment)、对比度(contrast)、均一性(homogeneity)、相关性(correlation)以及相异性(dissimilarity)8 个纹理因子,这些纹理因子都具有不同的意义,对于林木与非林木的区分也具有不相同的意义,可以对纹理信息进行分析和量化表达。其中熵熵值是反映图像纹理的丰富程度,熵值越大说明图像的纹理越丰富,反之则图像纹理越少;二阶矩反映了图像的纹理粗细程度等。运用 ArcGIS 的 Spatial Analyst Tools 工具中的 sample 功能,分别提取各种地类样点的光谱值和纹理信息值。针对于资源三号卫星影像的 R、G、B、近红外 4 个个波段区分,通过计算,可以得到 4×8=32 个灰度纹理特征图层。表 3 表示不同纹理因子计算公式及其结果图像。卫星遥感影像的纹理因子也是 8 个,包括均值、方差、熵值、二阶矩、对比度、均一性、相关性以及相异性。利用卫星影像提取纹理因子方法同航空遥感影像一致,提取影像中每一波段的纹理信息。资源三号影像 4 个波段,那么提取出 4×8=32 个纹理因子。

2.3.3 生物量反演因子的确定 传统估测生物量的方法有以下缺陷:需要对植被采集并称重,该方法成本高,投入人力物力巨大,破坏性大,对大面积范围内的植被生物量实测不现实。随着科技的进步,尤其是遥感技术(RS)和地理信息系统技术(GIS)应

用到生物量的估测中,为生物量的估测带来了巨大的进步,具体原理为:遥感技术是利用光谱反射来成像的,在自然界中,植被对蓝光和红光吸收强烈,对应的反射率就小,其光谱反射曲线对应到波谷位置,由此可知,森林植被的冠体中的叶绿素含量与其生物量相关,冠体的生物量又反映了森林的生物量,两者之间具有数学相关,根据这两个相关关系,根据遥感成像的光谱特征原理,通过建立相关数学模型来反演森林生物量,从而克服了传统方法中的缺陷。

表 3 纹理因子计算公式

Table 3 Formula to calculate textural features and texture image	
纹理因子	计算公式
均值(mean)	$\sum_{s_1} \sum_{s_2} s_1 \cdot p(s_1, s_2)$
方差(variance)	$\sum (X_{ij} - M)^3 / (n - 1) V \frac{3}{2}$
熵值(entropy)	$-\sum_{s_1} \sum_{s_2} p(s_1, s_2) \cdot \ln p(s_1, s_2)$
二阶矩(second moment)	$\sum_{s_1} \sum_{s_2} [p(s_1, s_2)]^2$
对比度(contrast)	$\sum_{s_1} \sum_{s_2} (s_1 - s_2)^2 p(s_1, s_2)$
均一性(homogeneity)	$\sum_{s_1} \sum_{s_2} p(s_1, s_2) / [1 + (s_1 - s_2)^2]$
相关性(correlation)	$[\sum_{s_1} \sum_{s_2} s_1 \cdot s_2 \cdot p(s_1, s_2) - \mu_1 \cdot \mu_2] / \sigma_1 \cdot \sigma_2$
相异性(dissimilarity)	$\sum_{s_1} \sum_{s_2}  s_1 - s_2  p(s_1, s_2)$

生物量遥感反演模型是通过地面数据和遥感数据的相关关系建立一定的数学模型,然后再根据目标数据的各个因子参数反推算出生物量。其中最重要的就是建立模型的遥感因子的选择,该些因子能充分的反映出与生物量的关系。

针对资源三号卫星影像数据仅有 4 个波段但是具有较高的空间分辨率这一特点,并分析影像的光谱信息及纹理信息,提取的资源三号卫星的遥感因子包括以下各项:4 个波段的光谱值 band1、band2、band3、band4,光谱组合值:band1+band2、band1+band3、band1+band4、band2+band3、band2+band4、band3+band4、band1+band2+band3、band2+band3+band4、band2/band3、band4/band2、(band2\*band3)/band4、(band3\*band4)/band2,植被指数 NDVI、RVI、DVI,地形因子海拔、坡度、坡向等 32 个因子,以及 4 个多光谱波段的 32 个纹理因子,共计 54 个因子<sup>[17-23]</sup>。

在建立模型之前,对上述的所有因子做相关性分析,即计算各个因子与生物量之间的相关系数。选择出相关性较高的因子分别与针叶林像元生物量和阔叶林像元生物量建立模型,以确保模型的准确

性。各个因子与像元生物量之间的相关系数及显著性(表 4)。

表 4 阔叶林生物量与各个相关变量的相关系数(资源三号)

Table 4 The correlation broad-leavedforest biomass with each variable coniferous forest(ZY-3)					
因子		相关性	因子		相关性
纹理因子			纹理因子		
Band1	mean	0.095	Band4	entropy	−0.182
	variance	0.171		second moment	0.175
	homogeneity	−0.166		correlatio	0.122
	contrast	0.088	波段	波段号	
	dissimilarity	0.143		band1	0.096
	entropy	0.110		band2	0.131
	second moment	−0.097		band3	0.127
	correlatio	−0.004		band4	0.106
Band2	mean	0.125	波段组合		
	variance	0.151		b1+b2	−0.017
	homogeneity	−0.107		b1+b3	−0.009
	contrast	0.089		b1+b4	−0.122
	dissimilarity	0.135		b2+b3	0.016
	entropy	0.120		b2+b4	−0.204
	second moment	−0.128		b3+b4	−0.099
	correlatio	0.106		b1+b2+b3	−0.107
Band3	mean	0.123		b2+b3+b4	−0.271 *
	variance	0.167	植被指数	b2/b3	−0.016
	homogeneity	−0.113		b4/b2	0.003
	contrast	0.115		(b2 * b3)/b4	0.100
	dissimilarity	0.149		(b3 * b4)/b2	−0.106
	entropy	0.186			
	second moment	−0.189		ndvi	−0.089
	correlatio	−0.059		dvi	0.163
Band4	mean	0.109	地形因子	rvi	−0.032
	variance	0.309 *			
	homogeneity	0.044		坡向 aspect	0.007
	contrast	0.133		坡度 slope	0.218
	dissimilarity	0.115		海拔 h	0.323 **

注：\* 表示 0.05 水平上显著；\* \* 表示 0.01 水平上显著。表 5 同。

表 5 针叶林生物量与各个相关变量的相关系数(资源三号)

Table 5 The correlation coefficient of forest biomass with each variable coniferous forest(ZY-3)					
因子		相关性	因子		相关性
纹理因子			纹理因子		
Band1	mean	0.268 *	Band4	entropy	−0.082
	variance	0.139		second moment	0.049
	homogeneity	−0.288 *		correlation	0.125
	contrast	0.318 * *	波段	波段号	
	dissimilarity	0.347 * *		band1	0.224
	entropy	0.162		band2	0.212
	second moment	−0.200		band3	0.159
	correlation	0.110		band4	−0.014
Band2	mean	0.241 *	波段组合		
	variance	0.163		b1+b2	0.101
	homogeneity	−0.266 *		b1+b3	0.198
	contrast	0.315 * *		b1+b4	−0.130
	dissimilarity	0.336 * *		b2+b3	0.188
	entropy	0.001		b2+b4	−0.083
	second moment	−0.059		b3+b4	0.232
	correlation	0.040		b1+b2+b3	0.115
Band3	mean	0.178		b2+b3+b4	−0.162
	variance	0.145		b2/b3	−0.119
	homogeneity	−0.216		b4/b2	−0.109
	contrast	0.328 * *		(b2 * b3)/b4	0.029
	dissimilarity	0.326 * *		(b3 * b4)/b2	−0.071

续表 5

因子相关性			因子相关性		
纹理因子			纹理因子		
Band3	entropy	0.052	植被指数		
	second Moment	−0.048		ndvi	−0.242 *
	correlatio	0.141		dvi	0.127
Band4	mean	0.003		rvi	−0.139
	variance	0.180	地形因子		
	homogeneity	−0.105		坡向 aspect	−0.007
	contrast	0.251 *		坡度 slope	−.298 *
	dissimilarity	0.233		海拔 h	−0.163

通过资源三号卫星提取的数据分析,森林生物量与坡度、坡向、海拔都有较大的相关性(表 4,表 5),而坡度、坡向、海拔都是通过资源三号卫星的前视和后视影像制作 DSM 得到,反映了资源三号卫星的优势。通过地形因子的引入,提高模型的精度。

但资源三号卫星由于波段数较少,只有 4 个多光谱波段,生物量与单波段的相关性表现得不很明显。仅与个别组合波段有一定的相关性。

选取相关性较大的因子参与建模,选取的相关因子及因子相关性见表 6,表 7。

表 6 阔叶林生物量与各个相关变量的相关系数(资源三号)

Table 6 The correlation broad-leaved forest biomass and various coniferous related variables(ZY-3)

变量	X1	X2	X3	X4	X5
相关因子	var(band1)	var(band2)	SM(Band3)	entropy(band4)	SM(Band4)
相关系数	0.171	0.151	−0.189	−0.182	0.175
变量	X6	X7	X8	X9	X10
相关因子	band2	b2+b3+b4	(b3 * b4)/b2	dvi	slope
相关系数	0.131	−0.271	−0.106	0.163	0.218

表 7 针叶林生物量与各个相关变量的相关系数(资源三号)

Table 7 The correlation coefficient of forest biomass and various coniferous related variables(ZY-3)

变量	X1	X2	X3	X4	X5
相关因子	contrast (band1)	dissimilarity (band1)	homogeneity (band2)	contrast (band2)	dissimilarity (band2)
相关系数	0.318	0.347	−0.266	−0.315	0.336
变量	X6	X7	X8	X9	X10
相关因子	band1	b2+b3	b3+b4	ndvi	slope
相关系数	0.224	0.188	0.232	−0.242	−0.298

## 4 结果与分析

将相关性较大的因子导入数理统计软件线性回归分析,建立生物量反演模型。

针叶林:  
$$B=4.61X_1-4.11X_2+5.03X_3-7.25X_4-0.69X_5-2.38X_6-3.68X_7+2.21X_8+1.58X_9+8.21X_{10}+48.74$$
 (1)

阔叶林:  
$$B=7.22X_1+10.09X_2-7.43X_3+2.54X_4+18.09X_5-5.91X_6-1.51X_7+4.59X_8-4.10X_9-0.16X_{10}+26.63$$
 (2)

分别选取针叶林和阔叶林每种样本的 20%用来做外符合验证,将要需要验证的样本带入新建的模型公式中,然后通过模型计算出来的预测值与实测值进行比较分析,得出预测精度,基于资源三号影像数据建立的生物量反演模型的预估精度(表 8):

$$P=(1-\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n(X_i-\bar{X}_i)^2}}{n})\times 100\% \tag{3}$$

式中: $X_i$  为实测值, $\bar{X}_i$  为预估值, $n$  为样本单元数。

经过精度验证,基于资源三号影像的针叶林和阔叶林生物量反演验证精度分别 76.75%和 80.57%,满足林业调查要求,此模型可以用来估测生物量。

表 8 模型精度表(资源三号)

Table 8 The accuracy of the model table(ZY-3)

模型	R
针叶林(ZY-3)	0.82
阔叶林(ZY-3)	0.71

## 5 结论与讨论

通过使用高精度的测量仪器进行实地测量保证了外业数据的可靠性,将研究区外业实测样地与遥

感因子进行多元回归分析。建立了北京市基于资源三号卫星影像的森林生物量反演模型。通过 20%样地实测数据分别对针叶林和阔叶林模型进行精度分析,得到模型精度分别为 76.75%和 80.57%。

通过研究发现,资源三号卫星多光谱数据空间分辨率较高,但是只有 4 个波段,用于生物量模型估测精度较低。但是资源三号卫星具有前视和后视影像,可以生成 DEM,结合 DEM 提取海拔、坡度、坡向。通过分析可知地形因子对北京市的生物量影像因子较大。同时,又加入了纹理因子,选取与生物量相关性较大的纹理因子建模。大大提高了模型精度。体现了资源三号卫星在研究森林生物量方面的优势。

基于遥感影像反演生物量的深层次问题,不仅涉及影像本身的光谱信息,也和影像所显示的森林郁闭度、森林密度等几何信息具有相关性。可利用资源三号卫星影像等高空间分辨率影像提森林的郁闭度或者森林密度等因子作为反演森林生物量的因子参与计算。另外,除了光谱信息、地形因子和纹理因子外,还需要结合当地气象条件和土壤因素、社会因素等,涉及的数据量大,需在以后的研究中继续深化。

参考文献:

[1] 杨永焱. 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.

[2] 李崇贵,蔡体久. 森林郁闭度对蓄积量估测的影响规律[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34 (1):15-17.

LI C G, CAI T J. Effect of forest canopy density on stock volume estimation[J]. Journal of Northeast Forestry University. 2006, 34 (1):15-17. (in Chinese)

[3] 马瑞兰. 基于 RS 和 GIS 技术的火地塘林场森林蓄积量估测[D]. 济南:山东大学,2011.

[4] 郑刚. 基于特征的图像匹配算法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2011.

[5] 许炜敏,陈友飞,林广发,等. 生长模型驱动的杉木林蓄积量动态可视化[J]. 福建林学院学报,2011,31(2):151-155.

[6] 王维枫,雷渊才,王雪峰. 森林生物量模型综述[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2):58-63

WANG W F, LEI Y C, WANG X F. A review of forest biomass models[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2):58-63. (in Chinese)

[7] 翟晓江,郝红科,麻坤. 基于 TM 的陕北黄龙山森林生物量模型[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1):41-45.

ZHAI X J HAO H K, MA K. TM based estimation biomass model of the Huanglong Mountain in northern Shaanxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2):58-63. (in Chinese)

[8] PIERDICCA N, PULVIRENTI L, BIGNAMI C. Soil mois-

ture estimation over vegetated terrains using multitemporal remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114 :440-448.

[9] LEFSKY M A, HARDING D, COHEN W B. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA[J]. Remote Sensing, 1999, 67:83-98.

[10] DUBAYALL R O, DRAKE J B. Lidar remote sensing for forestry[J]. Journal of Forestry, 2000, 98:44-46.

[11] BLACKARD J A, FINCO M V, HELMER E H. *et al.* Mapping US forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information[J], Remote Sensing of Environment 2008, 112:1658-1677.

[12] 李丹丹. 北京市森林生物量遥感反演模型研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.

[13] 丁敏. 旺业甸林场森林生物量遥感反演研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.

[14] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报,2001,43(9):967-973.

FANG J Y, CHEN A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. Acta Botanica Sinica. 2001, 43(9):967-973. (in Chinese)

[15] 方精云. 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算[J]. 植物生态学报,2000,24(5):635-638.

[16] 陈述彭,周成虎,林晖,等. 遥科学与空间技术的若干应用新领域[J]. 云南地理环境研究,1998(Supp. Z1):22-24.

[17] 刘友山. 高分辨率遥感影像信息提取中的尺度问题研究[D]. 芜湖:安徽师范大学,2012.

[18] 丰德恩. 森林蓄积量遥感定量估测系统研发[D]. 西安:西安科技大学,2012.

[19] 国庆喜,张锋. 基于遥感信息估测森林的生物量[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(3):23-25.

GUO Q X, ZHANG F. Estimation of forest biomass based on remote sensing[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(3):23-25. (in Chinese)

[20] 杨斌. 森林蓄积量高空间分辨率遥感估测理论与实现[D]. 西安:西安科技大学,2008.

[21] 张慧芳. 北京地区森林植被生物量遥感反演及时空动态格局分析[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[22] 吴展波,郑炜,刘胜祥,等. 利用 3S 技术估算鹿门寺林场马尾松林生物量[J]. 西北林学院学报,2007, 22(6):196-199.

WU Z B, ZHENG W, LIU S X, *et al.* Estimation of *Pinus massoniana* biomass in Lumensi Forest Farm by 3S technology[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22 (6):196-199. (in Chinese)

[23] 强建华,赵鹏祥,陈国领. 基于 NDVI 的油松天然林生长状况的遥感监测研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1):149-151.

QIANG J H, ZHAO P X, CHEN G L. A study on remote monitoring of the growth status natural forests of Chinese pine based on the NDVI[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1):149-151. (in Chinese)