

DOI: 10.5846/stxb201910082086

菅永峰, 韩泽民, 黄光体, 王熊, 李源, 周靖靖, 佃袁勇. 基于高分辨率遥感影像的北亚热带森林生物量反演. 生态学报, 2021, 41(6): 2161-2169.

Jian Y F, Han Z M, Huang G T, Wang X, Li Y, Zhou J J, Dian Y Y. Estimation of forest biomass using high spatial resolution remote sensing imagery in north subtropical forests. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2161-2169.

## 基于高分辨率遥感影像的北亚热带森林生物量反演

菅永峰<sup>1</sup>, 韩泽民<sup>1</sup>, 黄光体<sup>4</sup>, 王熊<sup>1</sup>, 李源<sup>1</sup>, 周靖靖<sup>1,2</sup>, 佃袁勇<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup> 华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070

<sup>2</sup> 华中农业大学湖北林业信息工程技术研究中心, 武汉 430070

<sup>3</sup> 农业部华中都市农业重点实验室, 武汉 430070

<sup>4</sup> 湖北省林业调查规划院, 武汉 430079

**摘要:** 以北亚热带湖北省太子山林场为研究对象, 基于高空间分辨率 GF-2 与 SPOT-6 卫星影像, 提取不同窗口大小下的纹理信息与光谱信息, 利用随机森林回归算法, 并结合野外实测 106 块样地的生物量数据, 建立不同影像下的太子山林场森林生物量反演模型。结果显示: (1) GF-2 和 SPOT-6 虽然空间分辨率有差异, 但是从其不同波段反射率的相关系数 (0.75、0.78、0.73、0.61) 发现, 两种影像的波段反射率具有较高的相关性, 说明两者的辐射性能相近; (2) 通过分析不同纹理特征对生物量模型的影响, 发现均值和对比度纹理参数对生物量反演具有很好的效果。 (3) 高分辨率的遥感数据在生物量反演中具有较好的表现, 且 GF-2 生物量模型精度 ( $R^2=0.88$ , RMSE=27.11 Mg/hm<sup>2</sup>) 与 SPOT-6 生物量模型的精度 ( $R^2=0.89$ , RMSE=23.93 Mg/hm<sup>2</sup>) 相近。 (4) 两种影像对不同森林类型的生物量预测值不存在显著差异, 都适合对不同林分类型的生物量进行预测。

**关键词:** 森林生物量; 高分辨率影像; 纹理特征; 随机森林

## Estimation of forest biomass using high spatial resolution remote sensing imagery in north subtropical forests

JIAN Yongfeng<sup>1</sup>, HAN Zemin<sup>1</sup>, HUANG Guangti<sup>4</sup>, WANG Xiong<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, ZHOU Jingjing<sup>1,2</sup>, DIAN Yuanyong<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Horticulture and Forestry Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

<sup>2</sup> Hubei Engineering Technology Research Centre for Forestry Information, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

<sup>3</sup> Key Laboratory of Urban Agriculture in Central China, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China

<sup>4</sup> Investigation and Planning Institute of Hubei Province, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Taking Taizishan Forest Farm in Hubei Province as the study area and using GF-2 and SPOT-6 satellite images as the data source, texture features under different window sizes and spectral features were extracted. Using random forest algorithm and Taizishan forest data obtained by field investigation, we construct forest biomass inversion model. The results show that (1) although the spatial resolution of GF-2 and SPOT-6 are different, the correlation coefficients (0.75, 0.78, 0.73, 0.61) of the reflectance of different wavebands indicate that the waveband reflectance of the two images is relatively high. The high correlation indicates that the radiation performance of the two is similar. (2) By analyzing the influence of different texture features on the biomass model, it is found that the mean and contrast values have a good effect on biomass inversion. (3) High resolution remote sensing data has a good performance in biomass retrieval, and the accuracy of the GF-2 biomass model ( $R^2=0.88$ , RMSE=27.11 Mg/hm<sup>2</sup>) and the SPOT-6 biomass model ( $R^2=0.89$ , RMSE=23.93 Mg/

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC050550404)

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2021-02-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dianyuanyong@mail.hzau.edu.cn

hm<sup>2</sup>) is similar. (4) The two images have no significant differences in the biomass prediction values of different forest types, and both are suitable for predicting the biomass of different forest types.

**Key Words:** forest biomass; high spatial resolution remote sensing; textural feature; random forest

森林是陆地生态系统中的重要组成部分,具有涵养水源、调节气候、固碳释氧等作用<sup>[1]</sup>。在我国,亚热带森林约占森林面积的二分之一,在季风环流和青藏高原的影响下,亚热带地区形成了较好的水热条件,为植被生长提供了有利的环境。同时,由于气候、地形和土壤等因素的影响,使得该区域具有较高的空间异质性。亚热带森林作为森林生态系统的重要组成部分之一,分布较为广泛的森林类型是常绿阔叶林,但在其北部主要为落叶树种<sup>[2]</sup>。亚热带森林生物量是全球植被生物量估值最大的区域之一,是森林碳储量的重要组成部分。然而目前,很多关于碳平衡的研究多集中在温带和热带森林区域,对于亚热带森林的碳储量研究较少,这使得无法了解亚热带森林区域的碳储量在全球碳循环中的作用。因此,准确估算亚热带森林的碳存储以及了解其在全球碳循环中的作用是未来研究的方向<sup>[3]</sup>。

传统的生物量估算方法以实际调查数据为基础,虽然估测精度较高,但劳动力大、破坏性强、成本高,且无法进行大区域的生物量变化监测<sup>[4-5]</sup>。遥感技术具有空间分辨率高、长期、动态、区域面积大等特点,已被广泛用于森林生物量的估测。

随着遥感技术的发展,应用于生物量估算的遥感影像包括激光雷达、SAR、光学影像等<sup>[6]</sup>。星载激光雷达不能获取具有高分辨率的森林参数,且容易受到地形起伏的影响<sup>[7-9]</sup>。机载激光雷达的空间分辨率较高,但对植被结构复杂、空间异质性较高的区域,估测到的森林生物量精度较低<sup>[10-11]</sup>。SAR 具有极强的穿透能力,然而 SAR 分辨率低,信号受地形起伏影响较大,且当生物量达到一定水平时会出现信号饱和,所以在森林植被结构复杂、生物量较高的热带和亚热带区域具有一定的局限性<sup>[12-15]</sup>。

在这种情况下,光学高分辨率卫星数据在植被生物量估测上的优势得到了越来越多的关注。与激光雷达数据相比,光学遥感数据获取途径更为广泛,且部分数据免费对用户开放。光学遥感数据得到的是水平方向连续的区域性数据,而激光雷达为光斑激光传感器,无法达到无缝覆盖,且在大尺度应用上存在限制。除此之外,光学高分辨率遥感影像包含了大量的纹理、形状等空间几何信息,在对不同森林类型的生物量进行反演估算时,其提取的森林参数、纹理和细节信息更加丰富<sup>[16]</sup>。

本研究结合野外实际生物量数据,使用 GF-2 和 SPOT-6 高分辨率遥感影像作为数据源,提取影像的植被指数和纹理因子,通过随机森林算法建立森林参数与森林生物量的回归估测模型,同时比较两种高空间分辨率影像模型的预测能力,并对模型进行验证。最后针对两种影像的不同林分类型的生物量估算值进行单因素方差分析,比较不同林分类型的预测结果。

## 1 研究区及数据

### 1.1 研究区

太子山林场位于中国湖北省京山市太子山国家森林公园,鄂中江汉平原与大洪山余脉交汇处,东经 112°49'5"—113°3'40",北纬 30°48'35"—31°2'40"之间(图 1)。太子山地貌为低山丘陵区,土壤以黄棕壤和黄褐色石灰土为主,属亚热带季风气候,夏秋多雨,冬春干旱,年平均降雨量 1094.8 mm,年平均气温 16.4℃。太子山林场总面积约 7900 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率为 85%。林场气候温暖湿润,资源丰富,分布着仅能在此生长的国家级保护植物对节白腊在内的共 138 科、204 属、近 400 种植物。该地区以人工林为主,其中典型的林分有麻栎(*Quercus acutissima*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、柏木(*Cupressus funebris*)、樟(*Cinnamomum camphora*)等<sup>[17]</sup>。

1.2 研究数据

1.2.1 遥感数据及预处理

以 2015 年 8 月 4 日 SPOT-6 遥感影像和 2015 年 8 月 14 日 GF-2 遥感影像作为数据源。采用 ENVI 5.3 对遥感影像进行辐射校正、几何校正、图像增强等预处理。

SPOT-6 对地观测卫星于 2012 年 9 月 9 日由印度 PSLV 运载火箭搭载成功发射,是一颗提供高分辨率光学影像的对地观测卫星,能够以 1.5 m 全色和 6 m 多光谱(蓝色,绿色,红色,近红外)分辨率对地球进行成像。

GF-2 卫星于 2014 年 8 月 19 日成功发射,是我国自主研制的首颗空间分辨率优于 1 m 的民用光学遥感卫星,搭载有两台高分辨率 1 m 全色、4 m 多光谱相机,具有亚米级空间分辨率、高定位精度和快速姿态机动能力等特点,有效地提升了卫星综合观测效能,达到了国际先进水平(表 1)。

1.2.2 样地数据

地面数据调查开始于 2015 年 8 月 13 日到 23 日,并在 2016 年和 2018 年 8 月分别到太子山林场展开样地补充调查。共布设 106 块矩形样地,单个样地布设面积为 20 m×20 m,样地包括针叶、阔叶、针阔混交等森林类型,其中针叶林主要以马尾松为主,阔叶林主要以樟树、麻栎等为主。在样地调查过程中,首先对样地的 4 个角和中心位置进行 GPS 定位,获取每块样地的经纬度坐标,记录各样地的生境因子,如坡度、坡向、海拔等,然后对样地中的树木进行测量,获得树木的胸径、树高、冠幅、林地类型等,样地中存在胸径和树高较大的树种,但总体略接近于正态分布(图 2)。

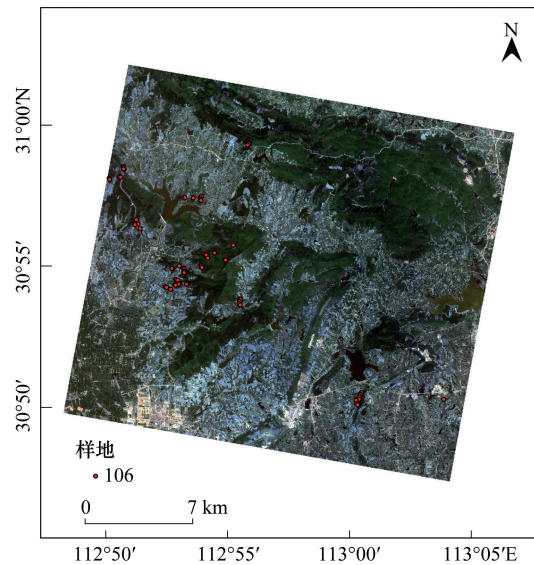


图 1 研究区

Fig.1 Location of the study area

表 1 GF-2 和 SPOT-6 的光谱波段和空间分辨率

Table 1 The spectral bands and resolution of GF-2 and SPOT-6

| 卫星 Satellites          | 高分辨率遥感影像 High spatial resolution remote sensing        |                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                        | GF-2                                                   | SPOT-6                                                   |
| 所属国别 Country           | 中国                                                     | 法国                                                       |
| 分辨率 Resolution         | 1 m 全色;4 m 多光谱                                         | 1.5 m 全色;6 m 多光谱                                         |
| 幅宽 Coverage            | 45 km                                                  | 60 km                                                    |
| 重访周期 Revisiting period | 5 d                                                    | 5 d                                                      |
| 波长范围 Wavelength        | 全色 0.45—0.90 $\mu\text{m}$ 多光谱 0.45—0.89 $\mu\text{m}$ | 全色 0.455—0.745 $\mu\text{m}$ 多光谱 0.45—0.89 $\mu\text{m}$ |

根据森林地上生物量与胸径和树高的相关性<sup>[18-21]</sup>(表 2)计算每株树的生物量  $W$ 。

表 2 各优势树种生物量估算公式

Table 2 Allometric biomass equations of dominant species

| 树种 Species                        | 回归方程 Regression models                             | 树种 Species                    | 回归方程 Regression models             |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 马尾松 <i>Pinus massoniana</i>       | $W = 0.1056 (D^2 H)^{0.8247}$                      | 樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> | $W = 0.112503 (D^2 H)$             |
| 麻栎 <i>Quercus acutissima</i>      | $W = 1.13796 \times 10^{-3} D^{2.0825} H^{2.1154}$ | 阔叶林 Hardwood forest           | $\ln W = -1.982 + 1.209 \ln (D^2)$ |
| 杉木 <i>Cunninghamia lanceolate</i> | $W = 0.257 (D^2 H)^{0.697}$                        |                               |                                    |

$W$ :生物量 Biomass; $D$ :胸径 Diameter at breast height; $H$ :高度 Height

研究中根据样地类型的不同主要分为针阔混交林、针叶林和阔叶林,其中针阔混交林 45 块,针叶林 34 块,阔叶林 27 块。通过表 2 中的各树种的生物量计算公式获得三种样地类型的现有生物量分布状态(表 3)。

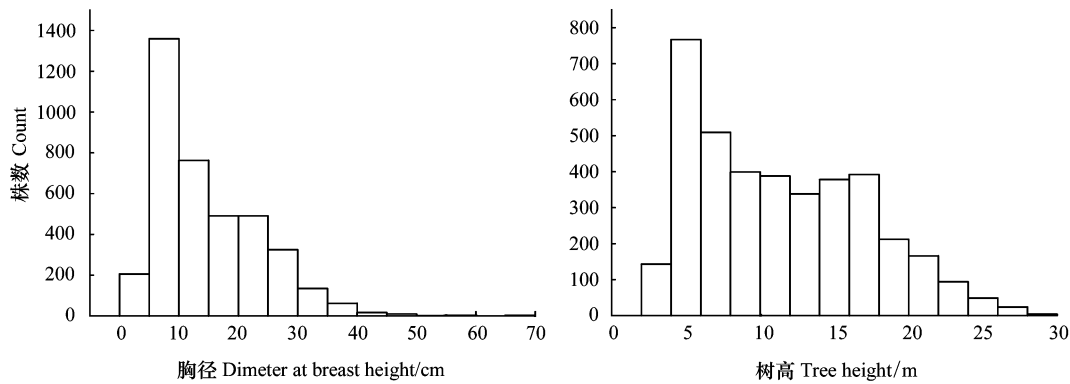


图2 样地胸径、树高统计直方图

Fig.2 Histogram of diameter at breast height, tree height variables

从表中可以看出阔叶林的平均生物量高于其它两种类型,但是其标准差较大,说明阔叶林样地生物量分布不均匀,这可能是由于不同阔叶林样地中林种不同、林龄差异导致。

表3 样地现有生物量分布状态

Table 3 The existing biomass distribution in the sample plots

| 样地类型<br>Plot type     | 样地数量<br>Count | 最大值<br>Maximum | 最小值<br>Minimum | 平均值<br>Mean | 平均胸径<br>Mean DBH/cm | 平均树高<br>Mean tree height/m |
|-----------------------|---------------|----------------|----------------|-------------|---------------------|----------------------------|
| 针阔混交林 Mixed forest    | 45            | 224.19         | 30.88          | 118.13      | 13.66               | 11.14                      |
| 针叶林 Coniferous forest | 34            | 146.80         | 28.65          | 91.35       | 15.60               | 10.31                      |
| 阔叶林 Hardwood forest   | 27            | 485.44         | 11.28          | 158.60      | 15.07               | 13.10                      |

DBH: 胸径 Diameter at breast height; 生物量单位为  $\text{Mg}/\text{hm}^2$

2 研究方法

2.1 提取遥感特征

目前研究表明,单独用遥感影像的波段值或植被指数估测的森林生物量精度比使用纹理特征结合植被指数的精度低,因此本文在建立模型时,使用纹理特征和植被指数组合估测生物量<sup>[22]</sup>。

以 GPS 定位的样地中心地理坐标作为中心像元,提取所需要的纹理信息和植被指数。研究采用 4 种植被指数(表 4),包括比值植被指数、差值植被指数、归一化植被指数、增强植被指数。通过灰度共生矩阵的方法提取 8 种纹理特征,包括均值、方差、均匀性、对比度、异质性、熵、二阶矩、相关性(表 5)。

表4 植被指数计算公式

Table 4 The calculation formula of vegetation index

| 植被指数 Vegetation index                          | 公式 Equations                                                           |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 比值植被指数 Ratio Vegetation Index                  | $\frac{\text{NIR}}{R}$                                                 |
| 差值植被指 Difference Vegetation Index              | $\text{NIR} - R$                                                       |
| 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index | $\frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R}$                                |
| 增强植被指数 Enhanced Vegetation Index               | $2.5 \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + C_1 \text{NIR} - C_2 B + C_3}$ |

B: 蓝波段 Blue; R: 红波段 Red; NIR: 近红外波段 Near infrared;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为增强植被指数的系数,数值分别为 6.0、7.5、1



表 5 纹理特征值计算公式  
Table 5 The calculation formula of texture feature value

| 计算方法 Calculation method                   | 纹理因子 Texture feature | 公式 Equations                                                                           |
|-------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 灰度共生矩阵<br>Gray level co-occurrence matrix | 均值 ( $ME$ )          | $\sum_{i,j=0}^{N-1} i P_{ij}$                                                          |
|                                           | 方差 ( $VA$ )          | $\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij} (i - ME)^2$                                                 |
|                                           | 均匀性 ( $HO$ )         | $\sum_{i,j=0}^{N-1} i \frac{P_{ij}}{1 + (i - j)^2}$                                    |
|                                           | 对比度 ( $CO$ )         | $\sum_{i,j=0}^{N-1} i P_{ij} (i - j)^2$                                                |
|                                           | 异质性 ( $DI$ )         | $\sum_{i,j=0}^{N-1} i P_{ij}  i - j $                                                  |
|                                           | 熵 ( $EN$ )           | $\sum_{i,j=0}^{N-1} i P_{ij} (-\ln P_{ij})$                                            |
|                                           | 二阶矩 ( $SM$ )         | $\sum_{i,j=0}^{N-1} i P_{ij}^2$                                                        |
|                                           | 相关性 ( $CR$ )         | $\sum_{i,j=0}^{N-1} i P_{ij} \left[ \frac{(i - ME)(j - ME)}{\sqrt{VA_i VA_j}} \right]$ |

$ME$ : 均值 Mean;  $VA$ : 方差 Variance;  $HO$ : 均匀性 Homogeneity;  $CO$ : 对比度 Contrast;  $DI$ : 异质性 Dissimilarity;  $EN$ : 熵 Entropy;  $SM$ : 二阶矩 Secondary moment;  $CR$ : 相关性 Correlation;  $P_{ij}$  为归一化共生矩阵

## 2.2 确定纹理窗口大小

纹理是用于识别图像中感兴趣的物体或区域的特征,而 GF-2 和 SPOT-6 作为高分辨率影像,可以提供更好的纹理信息,从而显著提高生物量估算的潜力。本研究采用灰度共生矩阵方法 (GLCM) 提取纹理特征,而移动窗口的大小是纹理分析的一个关键参数,因此需要选择适当的窗口大小。Latifur 等在使用 AVNIR-2 传感器的数据分析纹理特征改进生物量估算时发现,7×7 和 9×9 纹理窗口的纹理指数对生物量的估算有显著改善<sup>[23]</sup>。潘洁等在使用 IKONOS 高分辨率遥感影像提取纹理特征时发现,为了保持纹理融合影像信息量的丰富度,适宜的移动窗口选择范围为 9×9 至 15×15 之间<sup>[24]</sup>。Eckert 等在利用 WorldView-2 卫星数据纹理测量改善森林生物量和碳估算时,发现当窗口为 15×15 时,生物量与纹理参数的相关性最高<sup>[25]</sup>。

因此,本研究在保证提取的遥感特征变量相同的情况下,选取 7 个不同大小的移动窗口 (5×5、7×7、9×9、11×11、13×13、15×15、17×17),通过建立生物量模型,得到不同窗口模型的精度,从而得到最适宜的纹理窗口。

## 2.3 遥感特征选择与回归建模

随机森林算法 (Random Forest) 是 Breiman 等提出的一种机器学习算法,其实质是对决策树算法的一种改进,在以决策树构建 Bagging 集成的基础上,在训练过程中加入随机属性选择<sup>[26-27]</sup>。本研究采用随机森林算法构建模型,利用 8 种纹理特征和 4 种植被指数进行模型的训练学习。

## 2.4 模型精度评价

交叉验证是一种可以用来估计机器学习算法性能的一种方法,其方差小于单个训练测试集分割的方差。在本研究中,利用决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 两个指标进行精度评价。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}}$$

式中  $y_i$  为实际观测值;  $\hat{y}_i$  为模型预测值;  $\bar{y}$  为样本平均数;  $n$  为样本数。

## 2.5 不同林分类型生物量估算比较

中国亚热带地区植被种类丰富,不同的遥感影像因为空间分辨率等对同一林分的预测精度不同,因此在实验最后对两种影像的不同林分生物量估测进行单因素方差分析。

## 3 结果

### 3.1 SPOT-6 和 GF-2 影像对比

研究中使用 ENVI 5.3 对两种影像做大气校正,消除这些由大气影响所造成的辐射误差,从而反演地物真实的表面反射率<sup>[27]</sup>。由于 SPOT-6 影像与 GF-2 的空间分辨率不同,将 SPOT-6 图像的像素尺寸重新采样为 4 m×4 m,与 GF-2 相同。计算了 SPOT-6 和 GF-2 波段之间的均方根差 (RMSD)、判定系数 ( $R^2$ ) 和平均绝对离差 (MAD),并用于比较这两个数据集的关系 (表 6)。

结果表明,GF-2 和 SPOT-6 所有波段的反射率均值基本相同。但可见光波段决定系数 ( $R^2$ ) 明显高于近红外波段,尤其是蓝、绿波段;而其可见光波段均方根误差 (RMSE) 小于近红外波段。

表 6 SPOT-6 和 GF-2 地表反射率比较

Table 6 Surface reflectance comparison between SPOT-6 and GF-2

| 波段<br>Bands | SPOT-6 均值<br>Mean | GF-2 均值<br>Mean | RMSD   | MAD    | $R^2$ |
|-------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|
| B           | 0.0892            | 0.0891          | 0.0039 | 0.0026 | 0.75  |
| G           | 0.0775            | 0.0774          | 0.0062 | 0.0043 | 0.78  |
| R           | 0.0541            | 0.0540          | 0.0107 | 0.0069 | 0.73  |
| NIR         | 0.2564            | 0.2563          | 0.0369 | 0.0292 | 0.61  |

G:绿波段 Green;RMSD: 均方根误差 Root mean squared error; MAD: 平均绝对离差 Mean absolute deviation

### 3.2 纹理窗口大小对生物量反演的影响

对两种不同遥感数据,在 7 种 (5×5 至 17×17) 不同的纹理窗口下,选择相同的纹理特征变量构建生物量模型 (表 7)。

从表 7 可以看出遥感数据在不同的移动窗口,生物量的模型估测精度不同,GF-2 影像随着窗口的增大先减小后增大,7×7 窗口为其最佳模型窗口 ( $R^2$  为 0.86, RMSE 为 38.42 Mg/hm<sup>2</sup>)。SPOT-6 影像随着窗口的增大,其模型精度先减小后增大,15×15 窗口为最佳模型窗口 ( $R^2$  为 0.85, RMSE 为 39.76 Mg/hm<sup>2</sup>)。

采用随机森林回归建模前,需要评估纹理特征对回归模型的重要性 (图 3)。从图中可以发现 GF-2 影像和 SPOT-6 影像的均值和对比度对生物量反演影响最高,但两者在波段选择上存在一定的差异性。同时,也可以发现纹理特征与生物量的相关性比植被指数高。

表 7 不同纹理窗口模型精度

Table 7 The precision of different texture window models

| 窗口<br>Windows | GF-2  |                            | SPOT-6 |                            |
|---------------|-------|----------------------------|--------|----------------------------|
|               | $R^2$ | RMSE/(Mg/hm <sup>2</sup> ) | $R^2$  | RMSE/(Mg/hm <sup>2</sup> ) |
| 5×5           | 0.84  | 42.56                      | 0.82   | 40.17                      |
| 7×7           | 0.86  | 38.42                      | 0.81   | 42.80                      |
| 9×9           | 0.82  | 43.67                      | 0.80   | 43.39                      |
| 11×11         | 0.85  | 41.42                      | 0.81   | 41.30                      |
| 13×13         | 0.85  | 42.05                      | 0.82   | 41.20                      |
| 15×15         | 0.83  | 41.75                      | 0.85   | 39.76                      |
| 17×17         | 0.84  | 41.54                      | 0.84   | 40.06                      |

RMSE: 均方根误差 Root mean squared error

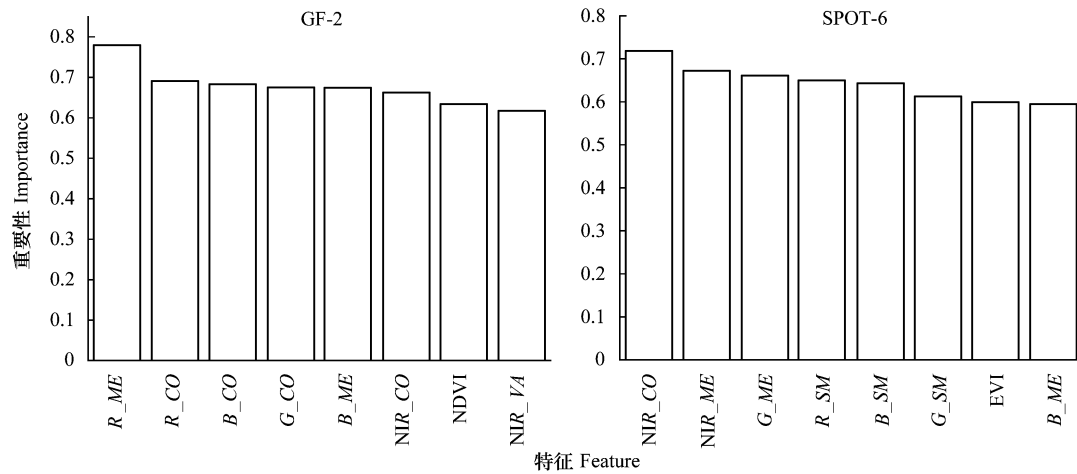


图3 特征的重要性

Fig.3 The importance of feature

GF-2、SPOT-6 为高分辨率遥感影像

### 3.3 回归建模与精度验证

将筛选出的 8 个遥感因子与样地生物量进行随机森林回归建模,得到的生物量预测模型及其精度评价(图 4)。整体来看,GF-2 生物量模型精度 ( $R^2 = 0.88$ ,  $RMSE = 27.11 \text{ Mg/hm}^2$ ) 与 SPOT-6 生物量模型的精度 ( $R^2 = 0.89$ ,  $RMSE = 23.93 \text{ Mg/hm}^2$ ) 都比较高,且两者差异性较小,但当生物量大于  $250 \text{ Mg/hm}^2$ ,遥感预测结果逐渐低于实测生物量,该现象被称为生物量饱和。为了分析两种影像对三种不同的林分生物量的估算值是否存在差异,对两种影像的不同林分做单因素方差分析。结果发现两种影像对不同林分类型的生物量预测没有显著性差异(针叶林  $F = 0.000$ ,  $P = 0.983$ ; 阔叶林  $F = 0.04$ ,  $P = 0.95$ ; 针阔混交林  $F = 0.006$ ,  $P = 0.94$ )。

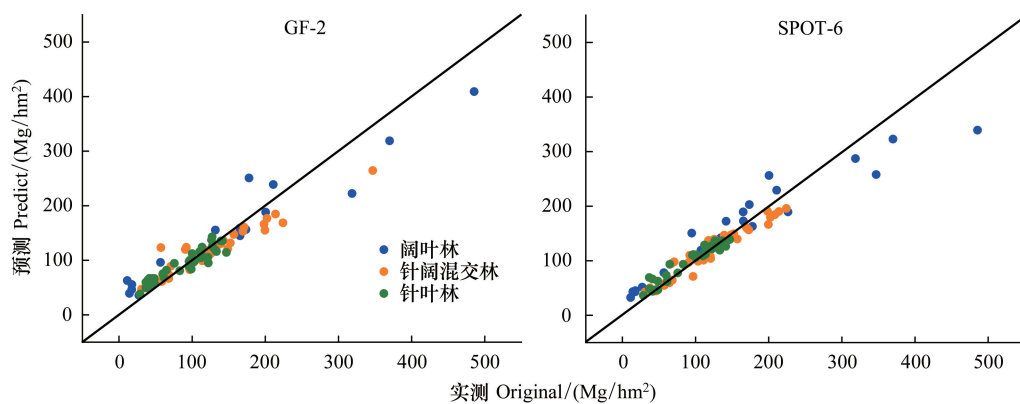


图4 预测生物量模型回归精度

Fig.4 Prediction of regression accuracy of biomass model

B: 蓝波段 Blue; G: 绿波段 Green; R: 红波段 Red; NIR: 近红外波段 Near infrared; ME: 均值 Mean; VA: 方差 Variance; CO: 对比度 Contrast; SM: 二阶矩 Secondary moment; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; EVI: 增强植被指数 Enhanced vegetation index

### 3.4 研究区生物量预测

根据生物量预测模型,对太子山林场地区进行生物量反演(图 5)。图中白色区域的生物量值最小,主要是因为该地区为水体、道路、居民点等。颜色浅的区域为林分密度较小的山下林带或农田,其生物量较小。颜色较深的区域为山林集中区,树种数量高,生物量值大。

## 4 讨论

生物量模型精度受模型反演中所用影像的分辨率的影响。光学传感器分为中高低等空间分辨率数据,本文中 GF-2 和 SPOT-6 都为高分辨率影像,其生物量模型精度分别为 0.88 和 0.89。一般来讲高分辨率数据在小区域尺度生物量估算中具有较高的优势。如 2019 年苟睿坤等<sup>[28]</sup>应用国产高分二号影像提取纹理特征和植被指数对陕西石堡林场做生物量反演,其模型精度达到 0.81。2017 年蒙诗栋等<sup>[22]</sup>利用 WorldView-2 对黑龙江凉水国家级自然保护区做生物量反演,其精度达到 0.85。而相对于高分辨率遥感影像,常规光学遥感影像为中低等分辨率影像,如 Landsat TM、ETM+、MODIS 等,其在区域尺度上的模型精度相对较低。如 2015 年徐婷等<sup>[29]</sup>提取 Landsat8OLI 的特征变量在国营虞山林场反演地上生物量,其精度为 0.41。2010 年曹庆先等<sup>[30]</sup>基于 TM 影像纹理对红树林生物量估算,生物量精度为 0.66。这是因为常规遥感数据空间分辨率相对较低,被广泛应用于大区域和全球尺度的森林生物量估测研究。如 Zhang 等<sup>[5]</sup>利用 1 km 分辨率的 MODIS 数据估算中国亚热带森林地上生物量。Su 等<sup>[31]</sup>通过星载激光雷达和光学成像(1km 分辨率)分别绘制了全球热带和亚热带地区以及中国的 AGB 图像。

在生物量估算中,只使用植被指数反演生物量,模型精度较低,而加入纹理特征可以提高反演的精度<sup>[32]</sup>。但 Lu<sup>[33]</sup>使用 Landsat TM 提取纹理特征和植被指数构建巴西亚马逊地区地上生物量,其精度最高达到 0.78。本实验中,通过选取 SPOT-6 和 GF-2 最佳窗口,提取纹理特征和植被指数构建生物量模型,模型精度明显高于 Landsat TM 影像。这是因为高分辨率遥感影像空间信息更加丰富,地物目标的结构、纹理和细节等信息更加突出<sup>[34]</sup>。

虽然高分辨率影像对提高生物量反演精度具有明显的效果,但是不同森林类型对反演结果还是存在一定的影响。实验中用所有森林类型构建一个模型,如图 4,发现不同森林类型中,阔叶林的生物量预测总体偏差较大,针叶林的误差较小。李明诗等<sup>[35]</sup>在南京紫金山对主要优势树种生物量的建模研究中也得出相似的结论。为分析不同森林类型对生物量反演的影响大小,未来可以使用分辨率更高的影像数据做数据源提取树冠信息进行不同森林类型的生物量估算。

## 5 结论

本研究主要探讨高分辨率遥感数据在北亚热带森林生物量反演的效果,同时比较国产 GF-2 与国外 SPOT-6 高分辨率数据的生物量反演潜力。实验中采用了灰度共生矩阵算法计算纹理因子,并将纹理因子和植被指数相结合与样地生物量通过随机森林算法进行回归建模,最后通过交叉验证评价两者的模型精度。结果表明:虽然两种数据的空间分辨率等存在差异,但它们所有波段的辐射性能相当,并且通过选取的均值和对比度等遥感特征与样地生物量构建生物量模型发现,两种高分辨率影像都能较好的估测北亚热带不同林分类型的生物量,且 GF-2 生物量模型精度( $R^2 = 0.88$ ,  $RMSE = 27.11 \text{ Mg/hm}^2$ )与 SPOT-6 生物量模型的精度( $R^2 = 0.89$ ,  $RMSE = 23.93 \text{ Mg/hm}^2$ )相近。

## 参考文献(References):

- [1] 梁燕, 葛忠强, 马安宝, 杜振宇, 王清华. 森林生态系统稳定性研究进展. 山西林业科技, 2018, 47(4): 32-34, 60-60.

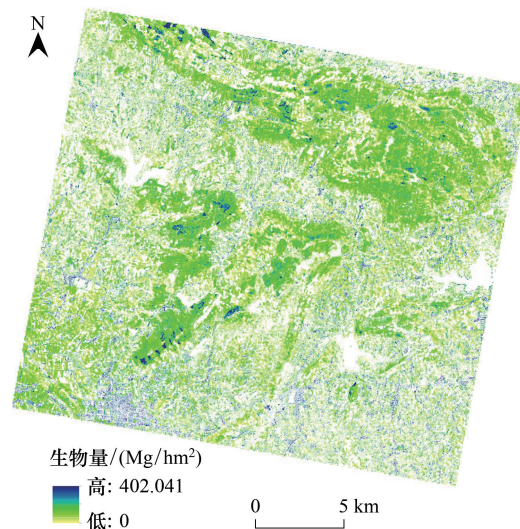


图5 太子山林场生物量反演图

Fig.5 Biomass inversion map of Taizi mountain



- [2] 邓先瑞. 中国亚热带. 北京: 中国国际广播出版社, 2012.
- [3] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [4] 汤旭光, 刘殿伟, 王宗明, 贾明明, 董张玉, 刘婧怡, 徐文明. 森林地上生物量遥感估算研究进展. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1311-1318.
- [5] Zhang R, Zhou X H, Ouyang Z T, Avitabile V, Qi J G, Chen J Q, Giannico V. Estimating aboveground biomass in subtropical forests of China by integrating multisource remote sensing and ground data. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111341.
- [6] 刘茜, 杨乐, 柳钦火, 李静. 森林地上生物量遥感反演方法综述. *遥感学报*, 2015, 19(1): 62-74.
- [7] 曲苑婷, 汪垚, 刘观潮, 范文义. 基于 GLAS 激光雷达反演森林生物量. *测绘通报*, 2014(11): 73-77.
- [8] Lefsky M A, Harding D J, Keller M, Cohen W B, Carabajal C C, del Bom Espirito-Santo F, Hunter M O, de Oliveira Jr R, de Camargo P B. Correction to "Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICE Sat". *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(5): L05501.
- [9] Hayashi M, Saigusa N, Yamagata Y, Hirano T. Regional forest biomass estimation using ICESat/GLAS spaceborne LiDAR over Borneo. *Carbon Management*, 2015, 6(1/2): 19-33.
- [10] 庞勇, 李增元. 基于机载激光雷达的小兴安岭温带森林组分生物量反演. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1095-1105.
- [11] Wang Y Y, Li G C, Ding J H, Guo Z D, Tang S H, Wang C, Huang Q N, Liu R G, Chen J M. A combined GLAS and MODIS estimation of the global distribution of mean forest canopy height. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 24-43.
- [12] 沈国状, 廖静娟. SAR 数据湿地植被生物量反演方法研究进展. *遥感信息*, 2016, 31(3): 1-8.
- [13] 黄燕平, 陈劲松. 基于 SAR 数据的森林生物量估测研究进展. *国土资源遥感*, 2013, 25(3): 7-13.
- [14] Mermoz S, Le Toan T, Villard L, Réjou-Méchain M, Seifert-Granzin J. Biomass assessment in the Cameroon savanna using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 109-119.
- [15] Lu D S, Chen Q, Wang G X, Liu L J, Li G Y, Moran E. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(1): 63-105.
- [16] 李德仁, 王长委, 胡月明, 刘曙光. 遥感技术估算森林生物量的研究进展. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37(6): 631-635.
- [17] 皮忠来, 王晓荣, 庞宏东, 张家来, 郑京津, 郑兰英. 湖北省太子山森林植被碳密度及碳储量研究. *湖北林业科技*, 2014, 43(6): 1-4.
- [18] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] 艾训儒, 沈作奎, 易咏梅. 马尾松种群生物量及其密度效应研究. *湖北林业科技*, 1998, (3): 16-18.
- [20] 丁洪峰. 闽北杉木人工林生物量及其分配的动态变化. *安徽农业科学*, 2016, 44(30): 136-138.
- [21] 林开森. 亚热带常绿阔叶林生物量模型及其分析. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(11): 115-120, 126-126.
- [22] 蒙诗栋, 庞勇, 张钟军, 李增元, 王雪琼, 李世明. WorldView-2 纹理的森林地上生物量反演. *遥感学报*, 2017, 21(5): 812-824.
- [23] Sarker L R, Nichol J E. Improved forest biomass estimates using ALOS AVNIR-2 texture indices. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(4): 968-977.
- [24] 潘洁, 李明诗. 基于信息量的高分辨率影像纹理提取的研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(4): 129-134.
- [25] Eckert S. Improved forest biomass and carbon estimations using texture measures from WorldView-2 satellite data. *Remote Sensing*, 2012, 4(4): 810-829.
- [26] Breiman L, Random Forests. *Machine learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [27] 汪康宁, 马婷, 吕杰. 基于随机森林算法的凉水自然保护区蓄积量反演研究. *西南林业大学学报*, 2016, 36(5): 125-129, 157-157.
- [28] 苟睿坤, 陈佳琦, 段高辉, 杨瑞, 卜元坤, 赵君, 赵鹏祥. 基于 GF-2 的油松人工林地上生物量反演. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4031-4040.
- [29] 徐婷, 曹林, 余光辉. 基于 Landsat 8 OLI 的特征变量优化提取及森林生物量反演. *遥感技术与应用*, 2015, 30(2): 226-234.
- [30] 曹庆先, 徐大平, 鞠洪波. 基于 TM 影像纹理与光谱特征的红树林生物量估算. *林业资源管理*, 2010(6): 102-108.
- [31] Su Y J, Guo Q H, Xue B L, Hu T Y, Alvarez O, Tao S L, Fang J Y. Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 187-199.
- [32] Sarker L R. Estimation of Forest Biomass Using Remote Sensing[D]. Hong Kong, China: Hong Kong Polytechnic University, 2010.
- [33] Lu D. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(12): 2509-2525.
- [34] 王昆, 张晓丽, 王珊, 焦志敏, 宁亮亮, 吴石磊. 鹭峰地区 QuickBird 影像纹理特征与生物量估测关系初探. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(3): 52-55.
- [35] 李明诗, 谭莹, 潘洁, 彭世揆. 结合光谱、纹理及地形特征的森林生物量建模研究. *遥感信息*, 2006, (6): 6-9, 66-66.