

## 联合光学和合成孔径雷达数据的太平湖森林地上生物量反演研究

周蔚<sup>1</sup>, 吕延杰<sup>1\*</sup>, 林起楠<sup>2</sup>

(1. 国家林业和草原局 华东调查规划设计院, 浙江 杭州 310019; 2. 浙江农林大学, 浙江 杭州 311300)

**摘要:**光学和合成孔径雷达(SAR)多源传感器数据融合对提高森林地上生物量(AGB)提取精度具有重要意义。以太平湖森林为研究对象,以 Sentinel-1 SAR 数据和 Sentinel-2 光学数据为数据源,利用随机森林回归算法系统地评估光学和 SAR 数据对 AGB 反演的互补优势和策略选择。采用 Sentinel-2 光学数据的 AGB 反演精度( $R^2=0.63$ ,  $RMSE=37.05$  mg/hm<sup>2</sup>,  $sMAPE=0.56$ )优于采用 Sentinel-1 SAR 数据的 AGB 反演精度( $R^2=0.37$ ,  $RMSE=52.25$  mg/hm<sup>2</sup>,  $sMAPE=0.65$ ),联合两者数据的 AGB 估算精度最高( $R^2=0.69$ ,  $RMSE=34.17$  mg/hm<sup>2</sup>,  $sMAPE=0.55$ );基于不同策略构建的 AGB 估计模型当中,植被指数(RVI、NDVI 和红边相关的 NDVI<sub>re</sub>)和纹理变量(NDVI<sub>re</sub>\_Mea)的重要性高于光谱波段和后向散射系数。联合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据的光谱波段、植被指数、纹理信息和后向散射系数,能够有效的缓和遥感信息饱和性问题和提高 AGB 反演精度。

**关键词:**Sentinel-1; Sentinel-2; 随机森林回归算法; 地上生物量; 植被指数

中图分类号:S771.8

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0193-08

Retrieval of Above Ground Biomass in Taiping Lake Forests Using Optical and SAR Dataset

ZHOU Wei<sup>1</sup>, LÜ Yan-jie<sup>1\*</sup>, LIN Qi-nan<sup>2</sup>

(1. East China Forestry Inventory and Planning Institute, Hangzhou 310019, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** Multi-source data fusion of optical and synthetic aperture radar (SAR) is of great significance to improve the extraction accuracy of forest aboveground biomass (AGB). This study explored the complementary advantages and strategy selection of SAR (Sentinel-1) and optical (Sentinel-2) data for AGB inversion in Taiping Lake forests using random forest regression algorithm. The AGB inversion accuracy using sentinel-2 optical data ( $R^2=0.63$ ,  $RMSE=37.05$  mg/hm<sup>2</sup>,  $sMAPE=0.56$ ) was better than that using sentinel-1 SAR data ( $R^2=0.37$ ,  $RMSE=52.25$  mg/hm<sup>2</sup>,  $sMAPE=0.65$ ). The AGB estimation accuracy combining the two data was the highest ( $R^2=0.69$ ,  $RMSE=34.17$  mg/hm<sup>2</sup>,  $sMAPE=0.55$ ). For different strategies, in the construction of AGB model, vegetation indices (e. g. , RVI, NDVI and red-edge related index NDVI<sub>re</sub>) and texture variables (e. g. , NDVI<sub>re</sub>\_Mea) were more important than spectral band and backscattering coefficient. This study concluded that combining the spectral band, vegetation index, texture information and backscattering coefficient of sentinel-1 and sentinel-2 data could effectively alleviate the problem of remote sensing information saturation and improve the estimation accuracy in AGB mapping.

**Key words:** Sentinel-1; Sentinel-2; random forest regression algorithm; above ground biomass; vegetation index

收稿日期:2022-01-20 修回日期:2022-04-01

基金项目:安徽省森林资源年度监测及“森林资源一张图”应用试点。

第一作者:周蔚,工程师。研究方向:林业遥感。E-mail:zhouwei8502@163.com

\* 通信作者:吕延杰,工程师。研究方向:森林经营管理与林业信息化应用。E-mail:1095369262@qq.com

森林是陆地生态系统的主体,在全球碳循环过程和碳收支中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。生物量是森林生态系统研究的关键参数,对评估生态系统过程、碳平衡、物质循环、能量交换及气候变化起着重要的科学依据<sup>[2-5]</sup>。森林生物量可分为地上生物量(AGB: above ground biomass)和地下生物量(BGB: below ground biomass),其中地上生物量包含树枝、树干和树叶生物量。生物量大小能够反映森林对碳的吸收能力,对其精准测算可为我国碳中和目标提供数据基础。

AGB 的测量方法包括人工调查法和遥感估算方法。传统的地面生物量调查(例如:森林资源清查),通过实际测量或基于材积进行估算方式,可以提供高精度的、详细的(测量各组分生物量)森林生物量估算。然而,由于耗力的测量方法、稀疏的抽样策略和滞后的时间等问题,在较大尺度或全球范围的研究存在较大的局限性<sup>[6]</sup>。遥感技术通过非接触式的观测方式,能够提供高分辨率连续观测,对大尺度范围森林生物量和碳储量监测具有重要意义。对生物量遥感反演研究中,采用的传感器主要有光学影像<sup>[7]</sup>、激光雷达(LiDAR)点云<sup>[8]</sup>和合成孔径雷达(SAR)<sup>[9]</sup>为主。激光脉冲能够有效穿透森林间隙,因此 LiDAR 可以获取森林的三维结构信息。尤其,对森林树高具有较高的提取精度,有助于提高森林 AGB 估算精度。然而,目前对 LiDAR 数据观测成本较高,能够获取较高点云密度的数据覆盖范围比较有限。免费的卫星产品例如 GLASS 和 GEDI,提供的是条带状大光斑数据,光斑位置距离较大、空间分布离散<sup>[3-5]</sup>。光学数据能够提供丰富的光谱反射、光谱指数、空间纹理和阴影等信息,这些信息能够反映森林生长状况在 AGB 估算中应用广泛。然而,光学信息对生物量的估算容易达到饱和现象<sup>[3-5]</sup>。不同波段的 SAR 能够穿透不同深度的森林冠层,在估算森林地上生物量中有一定的优势<sup>[10]</sup>。大量研究表明,后向散射系数与树高、树干等有较强的相关性,对生物量的变化比较敏感<sup>[11]</sup>。其中,较长波长 L 波段和 P 波段,能够获取林冠下的树枝、树干和地面信息对高生物量估算精度较好;反之,较短波长的 X 波段和 C 波段,主要与冠层元素相互作用,适合于低生物量的估算<sup>[12]</sup>。

欧洲委员会哥白尼计划免费提供高分辨率的哨兵卫星光学(Sentinel-2)和 SAR(Sentinel-1)数据。使用 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据有利于探究多源遥感数据对生物量的反演策略。虽然目前基于哨兵卫星估算森林 AGB 已有大量的研究,但不同传感器和相应特征参数的选择对 AGB 反演建模仍未得

到系统性的评估。因此,本研究旨在探究联合哨兵卫星光学和 SAR 数据的光谱波段、光谱指数、后向散射系数和纹理信息对 AGB 反演的策略。

## 1 研究区概况

研究区位于安徽省黄山市黄山区西北部的太平湖风景区(图 1),景区总面积 312.9 km<sup>2</sup>,水域面积 88.6 km<sup>2</sup>。景区流域处于亚热带季风湿润气候区,年平均气温 15.5℃,年平均降水量 1 617 mm,年平均蒸发量 1 137 mm,阳光充足年平均日照时数 1 647.6 h<sup>[11]</sup>。景区多丘陵,植被物种丰富,主要乔木树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、栎树(*Quercus* sp.)、桦树(*Betula* sp.)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、木荷(*Schima superba*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、杨树(*Populus* sp.)、柳树(*Salix babylonica*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)、楝树(*Melia azedarach*)和毛竹(*Phyllostachys edulis*)等<sup>[13]</sup>。

## 2 研究数据和方法

### 2.1 样地数据

采用的地面调查数据来源于 2019 年国家林业与草原局组织开展的华东国有林区一类调查数据。调查内容主要包括控制样地、角规样地和小班样地数据。研究区等距布设 50 个 666.67 m<sup>2</sup> 样地(图 1),调查记录包含树种、每公顷株数、平均胸径和平均树高等调查因子。

样地 AGB 的计算采用一元地上生物量方程<sup>[14]</sup>。模型公式如下

$$M_a = aD^b \quad (1)$$

式中: $M_a$  为地上生物量(kg/株), $D$  为林木胸径, $a$  和  $b$  为不同树种参数。

每个样地内树木生物量总和记为样地生物量(mg/hm<sup>2</sup>),树种的模型参数见表 1。

此外,对毛竹地上生物量采用以下公式计算<sup>[15]</sup>

$$M_a = 747.787D^{2.771} \left( \frac{0.1484A}{0.028+A} \right)^{5.555} + 3.772 \quad (2)$$

式中: $A$  为单株毛竹年龄(度), $D$  为毛竹胸径。毛竹样地 AGB 由样地内所有单株毛竹生物量累加求得。

其中,50 样地 AGB 的平均值为 80.26 mg/hm<sup>2</sup>,最大和最小值分别为 257.63 mg/hm<sup>2</sup> 和 0.52 mg/hm<sup>2</sup>,样地 AGB 的标准差为 58.67 mg/hm<sup>2</sup>。

### 2.2 Sentinel 卫星数据获取与处理

选择覆盖整个研究区的 Sentinel-1 和 Sentinel-

2 影像,来源于欧空局哨兵数据中心(<https://sci-hub.copernicus.eu/dhus/#/home>)。

Sentinel-1 是一颗载有 C 波段 SAR 卫星,该卫星数据获取有 4 种模式:条带模式(Stripmap, SM)、干涉宽幅模式(Interferometric wide swath, IW)、超宽幅模式(Extra wide swath, EW)和波模式(Wave, WV),具备单极化(HH/VV)或双极化(HH+HV/VH+VV)的数据获取能力。本研究数据获取时间为 2019 年 8 月 26 日,选择的是 IW 模式升轨 SLC 数据,极化方式为 VV 和 VH 双极化,宽幅 250 km,数据分辨率为 5 m×20 m,中心入射角为 39.08°。数据预测处理采用的是 SARscape 2.1 软件,分别进行轨道校正、辐射定标、多视化处理、图像相干斑点噪声处理、Frost 滤波和地理编码等处理。为消除地形起伏带来的影响,采用 ASTER GDEM 30 m

分辨率数字高程数据进行地形校正,最后重采样到 20 m×20 m。

表 1 各树种的一元地上生物量模型参数

Table 1 Parameters of univariate above ground biomass model for all tree species

树种	模型参数 <i>a</i>	模型参数 <i>b</i>	来源
马尾松	0.099 5	2.408 6	[16]
杉木	0.076 4	2.403 9	[17]
栎树	0.213 6	2.304 2	[18]
桦树	0.096 2	2.418 6	[19]
香樟	1.370 0	2.150 0	[20]
木荷	0.176 9	2.263 1	[21]
枫香	0.106 2	2.466 5	[22]
杨树	0.090 1	2.436 8	[23]
其他硬阔类	0.187 5	2.333 3	[24]
其他软阔类	0.132 9	2.333 3	[25]

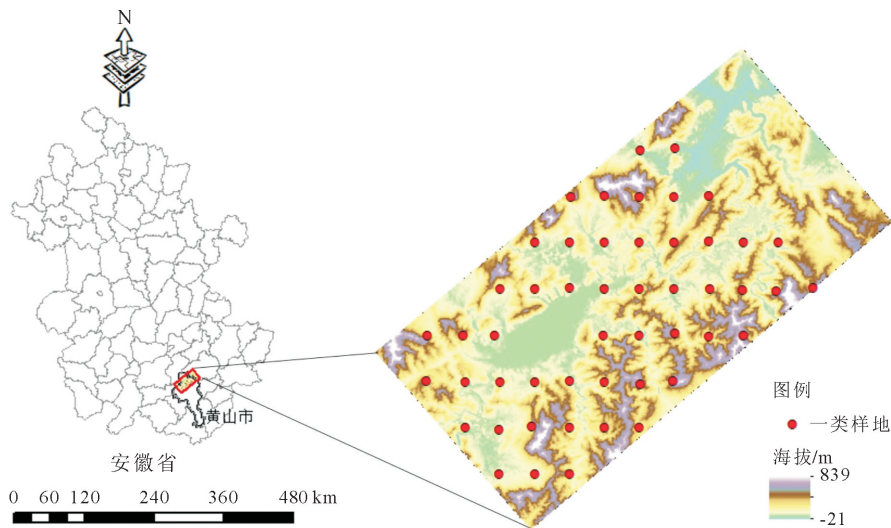


图 1 研究区位置和样地分布(红色矩形框覆盖了整个风景区)

Fig. 1 Location of the study area and plots distribution (the red rectangular box covers the whole landscape area)

Sentinel-2 共有 2 颗卫星(Sentinel-2A 和 Sentinel-2B),具备高宽幅(290 km),高分辨率(10~60 m)和高重返周期(2 个载荷互补可实现 5 d 重返周期)等特征。携带的多光谱传感器可覆盖 13 个光谱波段,其中 4 个波段(中心波长为 490、560、665、842 nm)空间分辨率为 10 m,6 个波段(中心波长为:705、740、783、865、1 610、2 190 nm)空间分辨率 20 m,3 个波段(443、945、1 380 nm)空间分辨率 60 m。本研究选取 Sentinel-2A Level-1C 数据,获取时间为 2019 年 9 月 19 日。数据预处理采用 Sen2Cor 对 Sentinel-2A 影像进行大气校正,将 10 m 波段重采样到 20 m 分辨率,共选择 10 个光谱波段。

最后,对预处理后的 Sentinel-1 与 Sentinel-2 影像进行几何校正配准减少不同数据的定位误差,将影像的投影坐标统一转换为 WGS84 UTM50 下(图 2)。

2.3 Sentinel-1 和 Sentinel-2 遥感特征参数提取

2.3.1 Sentinel-1 特征参数 提取 VV 和 VH 2 种极化方式对应的后向散射系数,并计算与不同极化方式相关的 SAR 指数,差值(VH-VV)、求和(VH+VV)和求商(VH/VV),见表 2。

2.3.2 Sentinel-2 特征参数 波段反射率和植被指数能够反映植被的生长和覆盖状况,有利于 ABG 估算。根据相关文献研究<sup>[9,25-26]</sup>,本研究选择与 ABG 相关性强的 Sentinel-2A 影像 10 个光谱波段和 11 个植被指数(表 2)。

此外,对选取的特征参数进行纹理特征提取来反映特征影像空间信息变化。采用灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)进行二阶纹理提取,包含纹理变量为均值(mean, Mea)、方差(variance, Var)、相关(correlation, Cor)、对比度



(contrast, Con)、差异 (dissimilarity, Dis)、均质性 (homogeneity, Hom)、角二阶矩 (angular second

moment, ASM) 和熵 (entropy, Ent), 详细计算公式、窗口大小参考文献[27-28]设置为  $3 \times 3$ 。

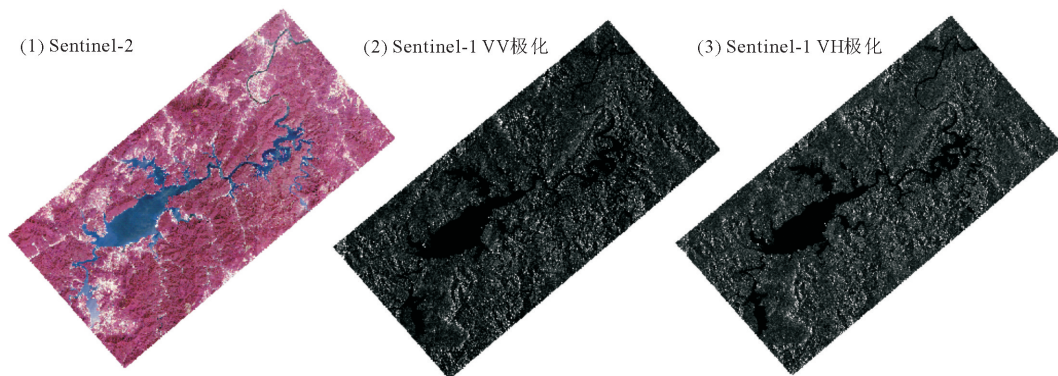


图 2 Sentinel-2(假彩色)和 Sentinel-1 VV 和 VH 极化后向散射系数

Fig. 2 Sentinel-2 (false color) and Sentinel-1 VV and VH polarization backscattering coefficients

表 2 Sentinel-1 和 Sentinel-2 特征参数

Table 2 Feature parameters of Sentinel-1 and Sentinel-2

传感器	类别	特征参数	计算等式
Sentinel-1	后向散射系数	VV, VH	—
		VV-VH, VV+VH, VH/VV	—
Sentinel-2	光谱波段	B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm), B5 (705 nm), B6 (749 nm), B7 (783 nm), B8 (842 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm), B12 (2190 nm)	—
	植被指数	归一化植被指数(NDVI)	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$
		红边归一化植被指数 I (NDVI <sub>re</sub> )	$(B6 - B4) / (B6 + B4)$
		红边归一化植被指数 II (NDVI <sub>68a</sub> )	$(B8a - B6) / (B8a + B6)$
		植被水分敏感指数 I (STVI1)	$(B11 \times B4) / B8$
		植被水分敏感指数 II (STVI2)	$B8 / (B4 \times B12)$
		植被水分敏感指数 III (STVI3)	$B8 / (B4 \times B11)$
		差值植被指数(DVI)	$B8 - B4$
		相对植被指数(RVI)	$B8 / B4$
		增强植被指数(EVI)	$2.5[(B8 - B4) / (B8 + 6B4 - 7.5B2 + 1)]$
		土壤调整植被指数(SAVI)	$1.5(B8 - B4) / (B8 + B4 + 0.5)$
		第 2 修正土壤植被指数(MSAVI2)	$1.5[2(B8 + 1) - \text{Sqrt}[(2B8 + 1)^2 - 8(B8 - B4)]]$

## 2.4 随机森林回归算法

采用随机森林回归(RFR)算法进行 AGB 估算<sup>[29]</sup>。RFR 是通过产生大量的分类回归树(CART),并将所有决策树预测的平均值作为最终预测结果。每个决策树模型都是使用 Bootstrap 采样法从训练数据集中随机选择一组训练样本,未被抽中的数据作为子模型的测试集。而且,每个子模型在构建过程中并非采用所有的特征变量,这使得每个子模型具有很好的随机性,增加了整体 RFR 模型的鲁棒性和泛化能力。在模型训练过程中,依据计算袋外误差来评估特征参数的重要性,并且通过均方误差增加百分比 IncMSE(%)重要性指标来进行评价。RF 能够确定不同特征变量的相对重要性,这对于理解数据、数据采集和处理方面起到很好

的指导作用。

## 2.5 模型训练和精度评估

由于提取的遥感特征参数较多,参数之间存在多重共线性将导致所构建的模型估计失真或难以估计准确现象。因此,在进行 RFR 训练之前,采用多元线性逐步回归分析方法(选择 90%显著性水平)去除不必要的变量。为了系统性评估哨兵卫星 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据对 AGB 提取精度,选择不同遥感特征信息特征参数的 5 组反演策略(表 3)分别建立 AGB 回归模型。

由于地面调查样地数量较少,在 RFR 模型构建中采用十折交叉验证的方法,选择表现最好的模型。采用决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE 公式中用  $R_{MSE}$  表示)、平均绝对误差(MAE)和对称平均绝对

百分比误差(sMAPE 公式中用  $S$  表示)作为模型评价指标<sup>[25]</sup>。其中,sMAPE 越大表示估计误差越大。

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^n(M_i-E_i)^2}{\sum_{i=1}^n(M_i-\bar{M})^2}$$

(3)

$$R_{MSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(M_i-E_i)^2}{n}}$$

(4)

$$S=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{|M_i-E_i|}{(M_i+E_i)/2}$$

(5)

式中: $M_i$  为 AGB 测量值, $E_i$  为 AGB 估测值, $\bar{M}$  为 AGB 测量平均值, $n$  为样地数量。

表 3 AGB 建模的试验策略

Table 3 Experimental strategies in modelling AGB

试验策略	特征参数数量/个	说明
A:S2all	64	包含 Sentinel-2 光谱波段、植被指数和纹理变量
B:S1all)	28	包含 Sentinel-1 后向散射系数、后向散射系数指数和纹理
C:S1S2all	92	所有的特征参数
D:S2spec	10	仅有 Sentinel-2 光谱波段
E:S1sca	2	仅有 Sentinel-1 后向散射系数

3 结果与分析

3.1 Sentinel-1 和 Sentinel-2 特征参数对 AGB 敏感度

基于多元逐步线性回归分析,选择显著性强(95 显著性水平%)的 8 个代表性特征参数,分析这些参

数对不同水平 AGB 的敏感度。如图 3 所示,光谱波段 B4 随着 AGB 增大整体呈现减小的趋势。但是,AGB 在 0~120 mg/hm<sup>2</sup> 和 >160 mg/hm<sup>2</sup> 区间,相对应的 B4 值变化不大。相似地,在 AGB>120 mg/hm<sup>2</sup>,B8 光谱波段的值区分性不大。相对于光谱波段,植被指数 RVI、NDVI 和 SAVI 对不同水平的 AGB 具有较好的区分度。尤其是 RVI 指数,但仍存在对高水平 AGB(>160 mg/hm<sup>2</sup>)具有饱和现象。VH 极化的后向散射系数对 AGB 表现出的敏感度较低,在不同 AGB 水平下散射系数差异不明显。纹理变量中,NDVIRE 指数的二阶纹理变量均质性(NDVIRE\_Hom)对 AGB>120 mg/hm<sup>2</sup> 具有较好的区分度,但对较低水平的 AGB(0~120 mg/hm<sup>2</sup>)难以区分。VV 极化后向散射系数的二阶纹理变量均值(VV\_Mea)能够较好地地区分出较低水平(0~120 mg/hm<sup>2</sup>)和中等水平(0~120 mg/hm<sup>2</sup>)的 AGB,但无法与高水平 AGB(>200 mg/hm<sup>2</sup>)区分开来。

3.2 基于不同策略的 AGB 反演结果

基于不同策略,选择对应不同的特征变量利用 RFR 分别进行 AGB 反演模型构建,反演结果如图 4 所示。基于 S2spec 策略,仅采用 Sentinel-2 光谱波段构建的 AGB 模型, $R^2$  为 0.57、RMSE 为 40.39 mg/hm<sup>2</sup> 和 rMAPE 为 0.57。相比较于 S2spec 策略,S2all 策略 AGB 反演的 RMSE 降低了 3.34 mg/hm<sup>2</sup>。说明进一步提取 Sentinel-2 光学信息(如:植被指数和纹理变量提取)有助于提高 AGB 反演精度。

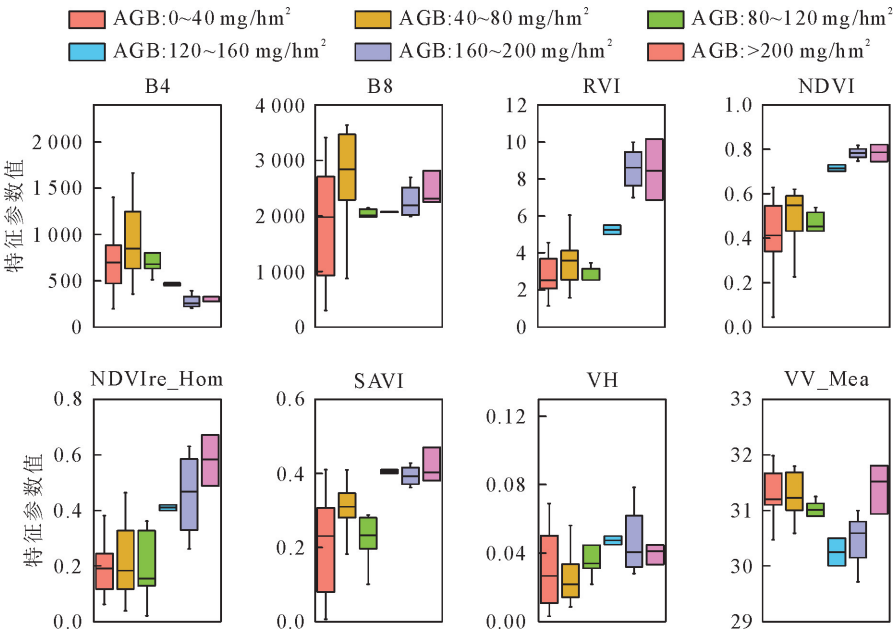


图 3 不同遥感特征参数对 AGB 的敏感度

Fig. 3 Sensitivity of different remote sensing-based variables to AGB

对采用 Sentinel-1 后向散射系数 S1sca 策略, mg/hm<sup>2</sup> 和 rMAPE 为 0.66。对 AGB>120 mg/hm<sup>2</sup>,采用 S1sca 策略所构建的模型对 AGB 反演出

现较为严重的低估现象。对于 S1all 策略,虽然模型加入了后向散射系数相关的 SAR 指数和纹理变量,但所构建的模型对 AGB 估计精度变化微弱。而通过结合所有的 Sentinel-1 和 Sentinel-2 特征参

数所构建的模型效果最佳,比 S2all 策略所构建模型 AGB 估计误差 RMSE 降低 2.88%。但是,发现所有的试验策略对于较高水平 AGB ( $>160 \text{ mg/hm}^2$ ),反演结果均表现出不同程度的低估现象。

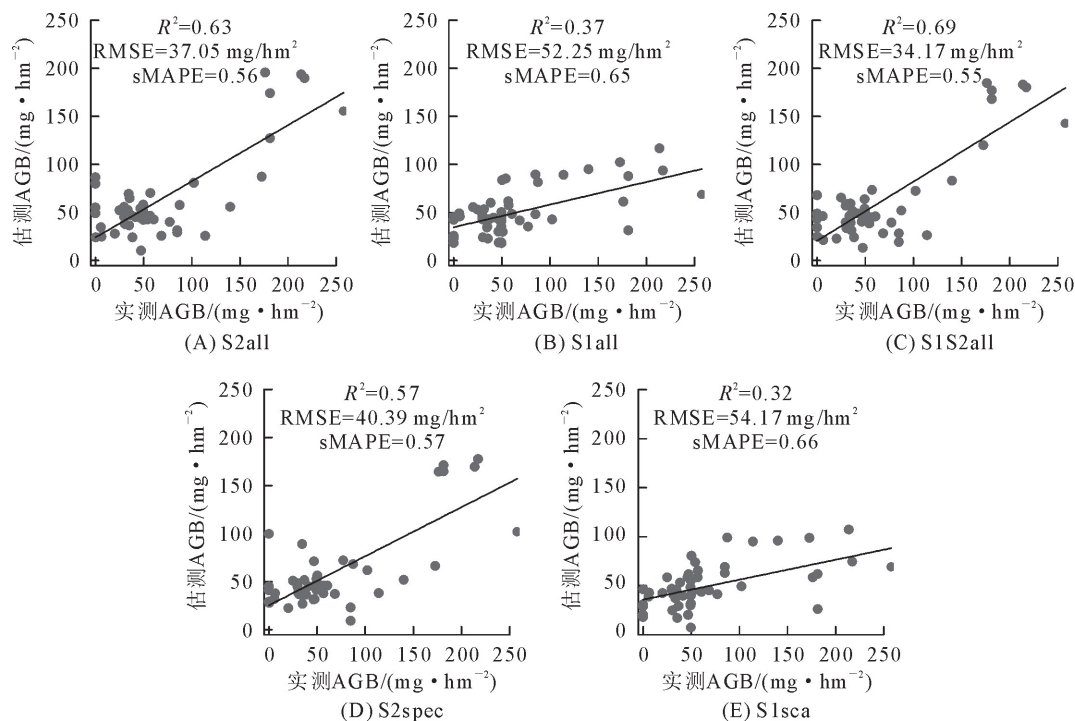


图 4 实测 AGB 与估计 AGB 散点图

Fig. 4 Scatter plot of measured AGB and estimated AGB

### 3.3 基于不同策略的模型参数重要性选择

图 5 为采用不同策略的 AGB 建模中前 10 个 (S1sca 策略除外) 最重要的特征参数重要性图。与光谱波段和后向散射系数相比, S1S2all (全光学和 SAR 数据组合) 策略中植被指数 RVI、NDVI 和红边相关 NDVIre 是前 3 个最重要的模型特征参数。此外, 纹理变量例如 NDVIre\_Mea、NDVI\_Mea、SAVI\_Var 和 B8a\_ASM 在 AGB 建模中也显示出较强的相关性。对于 S2all 和 S1all 策略, 模型最为重要的变量 (NDVIre 和 VH-HH) 都是来源于不同数据源的指数特征参数, 进一步证实了指数特征参数在 AGB 建模中的优势。在 S1sca 策略中, 交叉极化 VH 后向散射系数比同极化 VV 后向散射系数表现出更有利于 AGB 建模。从 S2spec 策略模型特征参数重要性比较中, 可以看出红光波段 B4 和近红外波段 B8 相对于其他光谱波段显示出较强的重要性。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本研究结果表明, 与 Sentinel-1 数据相比, Sentinel-2 数据更适合于本研究区的 AGB 建模。这一结果与之前的一些研究<sup>[30]</sup> 获得的结论是一致的。研

究中 Sentinel-1 对 AGB 反演精度较低的原因主要是由于 Sentinel-1 的 C 波段对森林冠层穿透能力有限。尤其是在密度大的林分, C 波段难以获得有效的冠层结构信息<sup>[3-5]</sup>。因此, 需要考虑结合更长波长的 SAR 波段 (如 L 和 P) 才能够获得较好的 AGB 反演精度。此外, 本研究仅考虑使用夏季的 SAR 数据, 对于安徽地区夏季降雨多森林湿度较大, 而 C 波段对地表湿度比生物量更加敏感。一些研究<sup>[25]</sup> 也比较了不同季节的 AGB 反演精度, 证明了干旱季节的 SAR 数据比雨季的 SAR 数据更有利于提高模型的精度。虽然, 本研究的 Sentinel-2 光学数据对生物量反演仍然存在一定程度的饱和现象。但是, 相较于 SAR 数据的反演结果 (S1sca: RMSE =  $54.17 \text{ mg/hm}^2$ , S1all: RMSE =  $52.25 \text{ mg/hm}^2$ ), 基于光谱波段、植被指数和纹理的光学数据对 AGB 反演精度提升较大 (S2spec: RMSE =  $40.39 \text{ mg/hm}^2$ , S2all: RMSE =  $37.05 \text{ mg/hm}^2$ )。

植被指数和纹理变量对 AGB 估算的贡献度要优于原始的光谱波段和后向散射系数, 这一结果与文献<sup>[29][30]</sup> 结论相似。值得注意的是, 在 S2all 策略中红边相关的植被指数 NDVIre 重要性比传统的 NDVI 和 RVI 要高。同时, 也有研究<sup>[33-36]</sup> 表明红边植被指数可以缓解生物量估算中的饱和问题。

S2all 和 S1S2all 策略(图5)中 STVI1 和 STVI2 的重要性具有启发性,证实了近红外和中红外波段在 AGB 反演中的有效性。SAR 指数比后向散射系数更有利于提高 AGB 建模精度。与同极化(如:VV)相比,交叉极化(如:VH)对生物量的贡献较高。而

在 S1S2all 策略中,SAR 参数并未纳入前 10 位重要性变量当中。虽然如此,在选择 AGB 反演策略当中也不能忽视 SAR 相关指标的贡献性,因为不同波长的 SAR 波段和 SAR 数据季节的选择都可能对模型的精度造成影响。

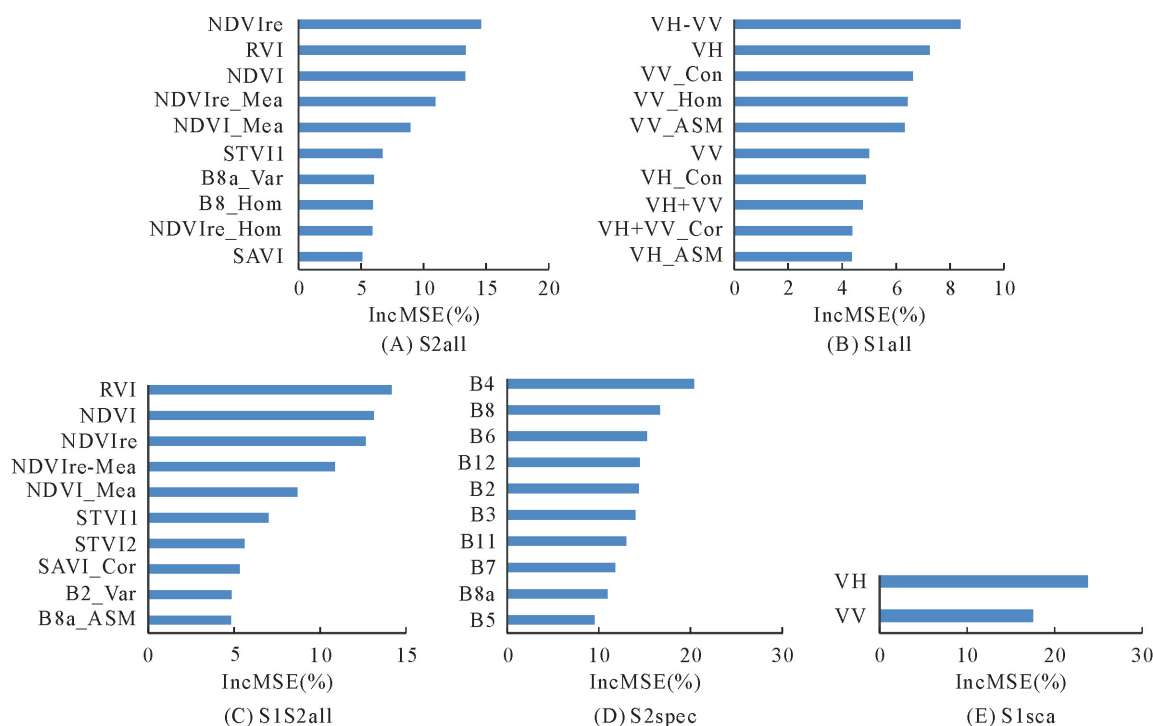


图5 不同策略 AGB 模型中特征参数的重要性

Fig. 5 Variable importance of different strategies conducted in AGB modelling

## 4.2 结论

本研究基于 RF 算法系统性地比较了 Sentinel-1 和 Sentinel-2 对 AGB 反演能力。结合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据(S1S2all 策略)对 AGB 反演精度最高,证明了光学和 SAR 对 AGB 反演的互补性优势。光谱指数 RVI、NDVI 和 NDVIre 对 AGB 模型贡献度最高,纹理变量和后向散射系数相关变量次之。研究结果为 AGB 模型估算提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] DONG J, 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): 393-410.
- [2] 王书贤, 张加龙, 廖易. 基于 Landsat 时间序列数据的森林地上生物量估测研究进展[J]. *世界林业研究*, 2021, 34(6): 20-26. WANG S X, ZHANG J L, LIAO Y. Progress on forest above-ground biomass estimation based on Landsat time[J]. *World Forestry Research*, 2021, 34(6): 20-26.
- [3] 田晓敏, 张晓丽. 森林地上生物量遥感估算方法[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(8): 137-148. TIAN X M, ZHANG X L. Estimation of forest aboveground biomass by remote sensing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(8): 137-148.

- [4] 张吕成, 张一帆, 董灵波. 基于 Landsat TM 数据的大兴安岭森林景观空间格局及其关联性[J]. *森林工程*, 2021, 37(6): 1-9.
- [5] 孙楠, 张怡春, 赵眉芳. 长白落叶松人工林根系生物量及其垂直分布特征[J]. *森林工程*, 2021, 37(6): 17-24, 67.
- [6] LIU Y, GONG W, XING Y, *et al.* Estimation of the forest stand mean height and aboveground biomass in Northeast China using SAR Sentinel-1B, multispectral Sentinel-2A, and DEM imagery[J]. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2019, 151(C): 277-289.
- [7] SANTA P, SATOSHI T, TIMOTHY D. Estimating above-ground biomass in sub-tropical buffer zone community forests, nepal, using sentinel 2 data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 601.
- [8] PEARSE G D, MORGENROTH J, WATT M S, *et al.* Optimising prediction of forest leaf area index from discrete airborne lidar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 200: 220-239.
- [9] LIN C, WANG Y, REN C, *et al.* Optimal combination of predictors and algorithms for forest above-ground biomass mapping from sentinel and SRTM data[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 414.
- [10] MOGHADDAM M, DUNGAN J L, ACKER S. Forest variable estimation from fusion of SAR and multispectral optical data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2176-2187.
- [11] NELSON R, MARGOLIS H, MONTESANO P, *et al.* Lidar-



- based estimates of aboveground biomass in the continental US and Mexico using ground, airborne, and satellite observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017.
- [12] SHOBA P. Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval; an attempt on Sentinel-1 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 537-549.
- [13] 王立龙, 陆林, 戴建生. 太平湖国家湿地公园生态保育区草本植物区系及其在不同干扰下的多样性动态 [J]. *自然资源学报*, 2010(8): 1306-1319.
- WANG L L, LU L, DAI J S. The herbaceous plant diversity dynamics under different disturbance and its flora in the conservation area of Taiping Lake national wet and park [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010(8): 1306-1319.
- [14] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] 曾伟生, 唐守正, 黄国胜, 等. 全国立木生物量建模总体划分与样本构成研究 [J]. *林业资源管理*, 2010(3): 16-23.
- ZENG W S, TANG S Z, HUANG G S, *et al.* Population classification and sample structure on modeling of single tree biomass equations for national biomass estimation in China [J]. *Forest Resource Management*, 2010(3): 16-23.
- [16] 国家林业和草原局. LY/T 2263-2014, 立木生物量模型及碳计量参数——马尾松 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [17] 国家林业和草原局. LY/T 2264-2014, 立木生物量模型及碳计量参数——杉木 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] 国家林业和草原局. LY/T 2658-2016, 立木生物量模型及碳计量参数——栎树 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] 国家林业和草原局. LY/T 2659-2016, 立木生物量模型及碳计量参数——桦树 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] 高凯, 胡永红, 冷寒冰, 等. 两种测算香樟单株植物生物量和生产力的方法 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(1): 242-248.
- GAO K, HU Y H, LENG H B, *et al.* Two methods of estimating biomass and productivity for *Cinnamomum camphora* at individual scale [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(1): 242-248.
- [21] 国家林业和草原局. LY/T 2660-2016, 立木生物量模型及碳计量参数——木荷 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] 国家林业和草原局. LY/T 2661-2016, 立木生物量模型及碳计量参数——枫香 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 曾伟生, 陈新云, 杨学云. 我国人工杨树生物量建模和生产力分析 [J]. *林业科学*, 2019, 55(11): 1-8.
- ZENG W S, CHEN X Y, YANG X Y. Biomass modeling and productivity analysis of planted *Populus sp.* in China [J]. *Science Silvae Sinicae*, 2019, 55(11): 1-8.
- [24] 曾伟生. 基于木材密度的 34 个树种组一元立木生物量模型建立 [J]. *林业资源管理*, 2017(6): 41-46.
- [25] FORKUOR G, BENEWINDE ZOUNGRANA J, DIMOBE K, *et al.* Above-ground biomass mapping in West African dryland forest using Sentinel-1 and 2 datasets——a case study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111496.
- [26] SIBANDA M, MUTANGA O, ROUGET M. Examining the potential of Sentinel-2 MSI spectral resolution in quantifying above ground biomass across different fertilizer treatments [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 110: 55-65.
- [27] 潘磊, 孙玉军, 王轶夫, 等. 基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据的杉木林地上生物量估算 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(3): 149-156.
- PAN L, SUN Y J, WANG Y F, *et al.* Estimation of aboveground biomass in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forest combining data of Sentinel-1 and Sentinel-2 [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2020, 44(3): 149-156.
- [28] 陈园园, 张晓丽, 高显连, 等. 基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2A 的西小山林场平均树高估测 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2839-2846.
- CHEN Y Y, ZHANG X L, GAO X L, *et al.* Average tree height estimation of Xixiaoshan Forest Farm, Northeast China based on Sentinel-1 with Sentinel-2A data [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2839-2846.
- [29] STATISTICS L B, BREIMAN L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001: 5-32.
- [30] ZHAO P P, DENG S, *et al.* Forest aboveground biomass estimation in Zhejiang Province using the integration of Landsat TM and ALOS PALSAR data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2016, 53: 1-15.
- [31] SASAN V, JAVAD S, KAMRAN A, *et al.* Improving accuracy estimation of forest aboveground biomass based on incorporation of ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-2A imagery and machine learning; a case study of the hyrcanian forest area (Iran) [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 172.
- [32] CHEN L, REN C, ZHANG B, *et al.* Estimation of forest above-ground biomass by geographically weighted regression and machine learning with sentinel imagery [J]. *Forests*, 2018, 9(10).
- [33] LAURIN G V, PULETTI N, HAWTHORNE W, *et al.* Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 163-176.
- [34] MUTANGA O, SKIDMORE A K. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(19): 3999-4014.
- [35] 邱布布, 徐丽华, 张茂震, 等. 基于 Landsat OLI 和 ETM+ 的杭州城市绿地地上生物量估算比较研究 [J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(1): 225-232.
- QIU B B, XU L H, ZHANG M Z, *et al.* Estimation of above-ground biomass of urban green land in Hangzhou based on Landsat OLI and ETM+ data [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(1): 225-232.
- [36] 周蓉, 赵天忠, 吴发云. 基于 Landsat8 遥感影像的地上生物量模型反演研究 [J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(2): 186-192.
- ZHOU R, ZHAO T Z, WU F Y. Aboveground biomass model based on Landsat8 remote sensing images [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(2): 186-192.