

doi: 10.12097/gbc.2023.07.034

基于 GF-2 影像的武汉市九峰山国家森林公园地上碳储量估算

韩云亭, 李思悦*, 罗协

HAN Yunting, LI Siyue*, LUO Xie

武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 湖北 武汉 430205

School of Environmental Ecology and Biological Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要: 探究国产高分辨率数据在森林碳储量估算研究中的潜力, 为构建森林碳储量估算模型提供新思路。选取武汉市九峰山国家森林公园为研究对象, 以 GF-2 遥感影像为数据源, 结合地面实测信息, 对研究区森林地上碳储量进行估算, 共提取 6 个植被指数、4 个波段值、8 种纹理特征, 筛选出 9 个与实测碳储量相关的遥感变量, 运用线性与非线性方程对单个高相关变量和多个相关变量进行建模, 选出最优模型, 为进一步提高预测精度, 将模型代入 4 种纹理窗口 (3×3、5×5、7×7、9×9)。结果表明: 通过遥感图像提取的植被指数之间, 具有较强的共线性, 单变量建立的模型精度低于多变量模型; 利用均方根误差 RMSE 与决定系数 R^2 对 4 个窗口下模型的预测精度进行评价, 模型在 5×5 窗口下预测效果最好 ($R^2=0.73$, $RMSE=0.5$), 3×3 窗口下预测效果最差 ($R^2=0.64$, $RMSE=0.8$), 将所有估测模型进行比较, 在纹理窗口下模型精度提高了 0.11。利用 5×5 窗口下构建的多变量模型对研究区碳储量进行估算, 九峰山国家森林公园碳储总量为 1.06×10^4 t, 总体平均碳密度为 84.59 t/hm², 具有一定的固碳作用。选用国产高分辨率影像 GF-2 数据对武汉市九峰山国家森林公园进行反演研究, 能很好地运用在森林植被碳储量定量与生长状况领域。研究结果对“双碳”目标下森林生态系统碳汇监测与管理具有重要科学意义。

关键词: GF-2; 地上碳储量; 遥感反演; 森林碳汇; 湖北

中图分类号: P407; X17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)04-0611-09

Han Y T, Li S Y, Luo X. Estimation of above-ground carbon storage in the Jiufengshan National Forest Park of Wuhan based on GF-2 images. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 611-619

Abstract: Exploring the potential of domestic high-resolution data in the estimation of forest carbon storage estimation research provides a new approach for the construction of forest carbon storage estimation model. In this study, the Jiufengshan National Forest Park in Wuhan City was selected, GF-2 remote sensing image was used as the data source, and ground measured information was combined to estimate forest AGC storage in the Park. A total of 6 vegetation indices, 4 band values and 8 texture features were extracted, and 9 remote sensing variables that related to measured carbon storage were screened out. Linear and nonlinear equations were used to model a single highly correlated variable and multiple correlated variables, and subsequently the optimal model was therefore selected. In order to further improve the prediction accuracy, the model was carried into four texture Windows (3×3, 5×5, 7×7, 9×9). The results showed that the vegetation index extracted from remote sensing images had strong collinearity, and the accuracy of the single variable model was lower than that of the multiple regression model. The root-mean-square (RMSE) and the coefficient of determination R^2 were used to evaluate the prediction accuracy of the model under four Windows. We showed that the model had the best prediction power under the 5×5 window ($R^2=0.73$, $RMSE=0.5$), and the prediction power was the lowest under the 3×3 window ($R^2=0.64$, $RMSE=0.8$), compared with all the estimated models, the accuracy of the model is improved by 0.11 in the texture window.

收稿日期: 2023-07-30; 修订日期: 2023-10-27

资助项目: 武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金资助项目(编号: CX2022560)和武汉工程大学高层次人才启动项目(编号: 21QD02)

作者简介: 韩云亭 (1996-), 女, 在读硕士生, 从事生态遥感及应用研究。E-mail: hanyunting0930@163.com

* 通信作者: 李思悦 (1978-), 男, 博士, 教授, 从事流域生态学与生源要素生物地球化学循环研究工作。E-mail: syli2006@163.com

Therefore, the constructed multivariate model was used to estimate carbon storage with a 5×5 window. The total carbon storage in the Jiufengshan National Forest Park was 1.06×10^4 t, the overall average carbon density was 84.59 t/hm², it has a certain carbon fixation effect. Using domestically produced high-resolution image of GF-2 satellite imagery data to invert Jiufengshan Forest Park in Wuhan, it can be well used in the field of quantitative carbon storage and growth status of forest vegetation. The research has important scientific significance for the monitoring and management of forest carbon sink under the “carbon peaking and carbon neutrality” target.

Key words: GF-2; above-ground carbon storage; remote sensing inversion; forest carbon sink; Hubei Province

森林生态系统作为全球陆地碳库之一,是碳循环重要的组成部分,区域尺度的陆地生态碳汇估算仍是一个难题(Moazzam, 2010; Pragasan, 2022; 葛婧等, 2023)。森林生态系统地上碳储量(AGC, Above-ground Carbon Storage)是评估森林生态系统固碳作用和潜力的主要指标,通过植被地上碳的存储量能够直观地掌握森林生态系统中固碳释氧的基本状况。在当前应对全球气候变化及推动碳中和背景下,森林地上碳储量的定量研究是全球关注的前沿热点领域。

目前,森林碳储量的研究方法主要包括样地清查法、模型模拟法、遥感估算法(续珊珊, 2014; 张桂莲等, 2022)。样地清查法主要针对野外森林建立样地,观测样地植被生长参数,通过生物量因子法、异速生长方程法、材积源生物量法计算总生物量,结合碳转换系数得到碳储量,该方法不仅需要大量的人力物力,且观测时间较长。模型模拟法利用固定模型,如 I-tree、CITYgreen 等,输入模型所需的植被数据、气象数据等,虽然计算快捷,但针对不同的研究对象,受到树种、气候、地势等因素的影响,导致评估结果的误差较大。遥感估算法将地面实测数据与遥感信息结合,不仅减少了大量资源的消耗,而且可以快速获取大范围实时监测的森林植被数据(倪欢等, 2021),提高森林 AGC 估算的精度。

用于碳储量估算的遥感影像数据种类较多,如光学遥感数据、合成孔径雷达(SAR)数据、激光雷达(LiDAR)数据等(Sun et al., 2020; 庞勇等, 2022)。合

成孔径雷达(SAR)由于波段较长,具有很强的穿透能力,能够穿透树木冠层获取单木信息,但在应用时需要考虑很多自身问题,如雷达视角、介电常数等,并且在实测中容易受到地形起伏的影响出现信号饱和等问题,在模型的适用性上存在一定的差异(李兰等, 2016; Nandal et al., 2023)。激光雷达(LiDAR)通过激光扫描能够确定树木的位置、高度、胸径等参数(Qiao et al., 2023),但针对不同的森林类型同样存在适用性差异较大的问题,例如阔叶林和针阔混交林的森林结构较复杂,不能准确地反映生物量信息,因此对森林 AGC 的估测也有一定的局限性(汤旭光等, 2012)。

光学遥感数据是最早应用于森林生态系统碳计量的遥感数据(曹海翔等, 2022),由于光学遥感数据可以免费获取,遥感卫星种类较多,且覆盖大范围森林面积,能够解译的地物信息更加全面,针对不同的森林类结构、植被类型及地形条件都具有高的可行度,因此光学遥感在森林碳储量估算的研究上具有较好的普适性,在相关领域中得到了广泛应用(岳春宇等, 2020; 王东明等, 2021; 鲍宽乐等, 2023)。高分二号卫星是中国高分辨率对地观测系统重大专项首批启动研制的卫星,于 2014 年 8 月 19 日由长征四号乙运载火箭成功发射(表 1)。该卫星分辨率达到亚米级水平,具有覆盖度广、精度高等优势(潘腾, 2015)。但相较于其他更早期的遥感卫星,有关 GF-2 的研究较少。因此,通过该遥感卫星数据估测森林植被 AGC 的研究成为新的发展方向,对高分遥

表 1 高分二号卫星简介

Table 1 Brief introduction of GF-2 satellites

卫星	分辨率	波段	波长范围/μm	重访周期/d	地面幅宽/km
高分二号 GF-2	全色 1 m	Band1	0.45~0.90	5	>45
		Band2	0.45~0.52		
		Band3	0.52~0.59		
	多光谱 4 m	Band4	0.63~0.69		
		Band5	0.77~0.89		

感技术的发展与碳评估实践具有重要意义。

不同气候带地区的森林固碳能力差异较大, 亚热带地区因其具有更有利于植物生长的气候条件, 导致其碳储量较高(Pan et al., 2011), 成为森林碳汇研究的重要区域。武汉市九峰山森林公园处于北亚热带地区, 是一座国家级森林公园, 林内物种丰富, 是研究森林碳汇能力的重要对象。本次以武汉市九峰山国家森林公园为研究对象, 利用 GF-2 遥感影像数据源并结合碳储量实测数据, 构建最优的碳储量遥感反演模型, 估算研究区整体的碳储总量并分析其空间分布格局, 以期为基于高分辨率遥感数据估测森林植被 AGC 提供科学依据。

1 研究区概况

九峰山国家森林公园(东经 144°20'50"、北纬 30°31'04"), 位于湖北省武汉市洪山区东郊, 距市中心 20 km 处(图 1), 地貌为低山丘陵, 最高海拔为 174 m, 属北亚热带地区, 气候湿润, 雨量充沛, 阳光充足, 全年平均降水量 1150 ~ 1190 mm, 全年平均日照 1950 ~ 2050 h, 年平均气温 16.3°C, 无霜期 240 d。九峰山国家森林公园内森林总面积 133.3 hm², 其森林覆盖率达 85%。该地区主要为人工林, 共有乔木、灌木 300 余种, 草本植物 260 余种, 其中引进了香樟、珙桐、银杏、水杉等国家一级、二级珍贵树种。主要的典型林分包括马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、

栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*(Thunb.) Oerst.)、小叶栎(*Quercus chenii* Nakai)、香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)、香枫(*Liquidambar formosana* Hance)等。

2 研究方法

2.1 样地选择及实地调查

2023 年 4 月 16 日至 2023 年 5 月 22 日期间, 笔者对九峰山国家森林公园进行了实地调查, 根据该地区植被分布、地形、地貌等地理条件, 选择 18 个具有代表性的典型矩形样地(20 m × 20 m)(图 1), 每个样地面积 0.04 hm²。

利用 GPS 仪记录样地 4 个角点和中心点的经度和纬度, 观测海拔、郁闭度等生境因子, 并对样地内的树木进行每木检尺, 记录树木的种类、胸径(DBH ≥ 5 cm)、树高等数据(表 2), 以及灌木的主要种类, 研究该地区树木的生长状况与物种丰富度。

2.2 样地森林 AGC 计算

森林地上碳储量(AGC)通过森林地上生物量与植被含碳率结合, 将生物量的计算结果乘以碳转换系数得出结果, 本次研究选取国际常用的碳转换系数为 0.5(Fang et al., 2001; 殷鸣放等, 2010; Planck et al., 2015)。根据样方内树木种类与典型林分, 选择对应的树木生长异速方程(丁增发, 2014; 营永峰等, 2021)计算单株生物量(表 3)。

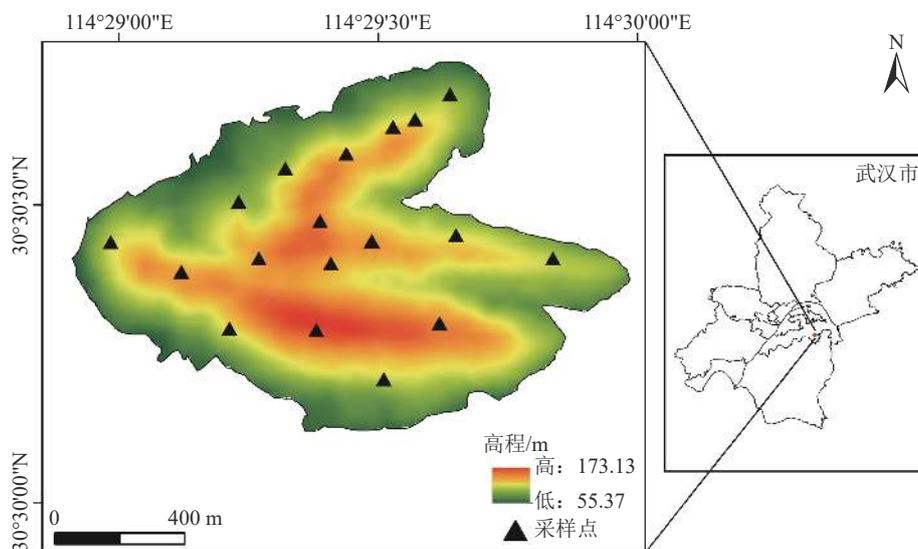


图 1 九峰山国家森林公园采样点图

Fig. 1 Sampling plots in the Jiufengshan National Forest Park

表2 实测样地信息

Table 2 Measured sample information

林分类型	样本量	主要树种(组)	群落组成	最大树高	最小树高	平均树高	最大胸径	最小胸径	平均胸径
				/m	/m	/m	/cm	/cm	/cm
针叶林	7	马尾松 马尾松-杉木	马尾松、杉木、麻栎、栓皮栎、青冈、香樟、 冬青、枫香、柿树、柯树、欆木	15.2	2.6	8.6	32.6	5.1	15.0
				~	~	~	~	~	~
				22.2	4.3	12.0	58.5	6.3	19.0
阔叶林	7	栎树 青冈-枫香 青冈-栎树	栓皮栎、麻栎、青冈、小叶栎、马尾松、冬 青、油茶树、短柱茶、山矾、朴树、柿树、女 贞、枫香、苦槠	14.5	3.5	9.0	30.7	5	15.8
				~	~	~	~	~	~
				23.4	5.7	15.0	54.5	6.8	23.8
针阔混交林	4	马尾松-栎树 马尾松-栎树-枫香 马尾松-栎树-青冈 马尾松-杉木-栎树	栓皮栎、麻栎、小叶栎、青冈、马尾松、冬 青、枫香、杉木、欆木	16.9	4.1	10.8	36.7	5.1	14.8
				~	~	~	~	~	~
				23.3	6.6	12.6	52.3	6.3	21.0

表3 优势树种生物量方程

Table 3 The biomass equations of the predominant tree species

树种	回归方程
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	$W=0.1056 \times (D^2 H)^{0.8247}$
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	$W=1.13796 \times 10^{-3} D^{2.0825} H^{2.1154}$
青冈 <i>Quercus glauca</i>	$W=0.018851976 \times (D^2 H)^{1.091681772}$
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	$W=0.112503(D^2 H)$
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$W=0.257 \times (D^2 H)^{0.697}$
阔叶树 <i>Hardwood forest</i>	$W=-1.982+1.209 \ln(D^2)$

注: W 表示生物量; D 表示胸径; H 表示高度

2.3 遥感数据处理

以 GF-2 遥感影像作为数据源, 选用 1 景 2020 年 5 月 18 日影像, 分辨率精度为 1 m, 当日云量小于 3%, 可以准确地计算出用于研究的遥感参数值。利用 ENVI 5.3 软件对遥感影像进行预处理, 包括辐射校正、大气校正、正射校正等。

2.4 遥感估算模型的构建

2.4.1 特征因子的提取

遥感影像的光谱差异及纹理特征能够反映出植被的生长状况和空间分布(魏吉鑫等, 2020; Wei et al., 2023)。本文将遥感图像与地面实测数据相结合, 提取 4 个单波段灰度值、6 个植被指数(包括归一化植被指数、增强型植被指数、比值植被指数、差值植被指数、土壤调整植被指数和大气阻抗植被指数), 基于灰度共生矩阵对图像纹理进行提取, 通过二阶概率统计滤波提取 8 种纹理特征, 包括均值、方

差、均匀性、对比度、异质性、熵、二阶矩和相关性, 提取时灰度降级为 64, 步长为 1, 方向为 0° , 统计间隔为 1 个单元像元值。提取因子及方法见表 4。

2.4.2 相关性分析

由表 5 可知, NDVI 与实测 AGC 相关性最强, 植被指数 NDVI、RVI、SAVI、DVI、EVI、ARVI、波段灰度值 B_4 、纹理特征值 Mean 与 AGC 正相关, Correlation 与 AGC 负相关。对所有与 AGC 相关的变量之间进行相关性分析, 其相关性在 $-0.70(p < 0.05) \sim 0.87(p < 0.01)$ 之间, 植被指数之间的相关性在 $0.88 \sim 0.99$ 之间, 表明各植被指数间具有较强的多重共线性。

2.4.3 森林地上碳储量反演模型构建

将 18 个样方的数据分为两部分, 随机选取数据的 $2/3$ (12 个) 作为因变量用于模型的构建, 另外 $1/3$ (6 个) 作为验证数据用于模型精度的评价。为研究不同模型和变量对碳储量估测的效果, 引入单变量和多个变量, 构建线性模型和非线性模型。

逐步回归法是指将多个特征变量引入模型中, 对每个解释变量逐个进行 F 检验, 同时对已经引入的因子进行 T 检验, 当某一变量引入后使模型不再显著, 将提出这一变量, 以此类推, 通过迭代的过程选取估测能力最优的组合。该方法不仅可以逐一比对各个变量对模型的解释作用, 同时解决了多个变量多重共线性的问题(苟睿坤等, 2019)。

本次选用后向逐步回归法建立多元线性模型, 其原理是将所有变量引入模型中, 计算偏回归平方和, 比较因子对模型的贡献度大小, 剔除无关变量建

表 4 植被指数及纹理参数计算方法

Table 4 Vegetation index and texture parameter calculation methods

类型	遥感数据	计算公式
植被指数	归一化植被指数(NDVI)	$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$
	比值植被指数(RVI)	$RVI = \frac{NIR}{R}$
	差值植被指数(DVI)	$DVI = NIR - R$
	土壤调整植被指数(SAVI)	$SAVI = \frac{(NIR-R)(1+L)}{(NIR+R)+L}$
	增强型植被指数(EVI)	$EVI = 2.5 \frac{NIR-R}{NIR+6R-7.5BLUE+1}$
	大气阻抗植被指数(ARVI)	$ARVI = \frac{NIR-(2R-BLUE)}{NIR+(2R-BLUE)}$
纹理特征	均值	$\sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{ij}$
	方差	$\sum_{i,j}^{N-1} P_{ij}(i - ME)^2$
	均匀性	$\sum_{i,j=0}^{N-1} i \frac{P_{ij}}{1+(i-j)^2}$
	对比度	$\sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{ij}(i - j)^2$
	异质性	$\sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{ij} i - j $
	熵	$\sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{ij}(-\ln P_{ij})$
	二阶矩	$\sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{ij}^2$
	相关性	$\sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{ij} \left[\frac{(i-ME)(j-ME)}{\sqrt{VA_i VA_j}} \right]$

注: NIR—近红外波段; R—红波段; BLUE—蓝波段; L—土壤调节因子(L = 0.5); ij—第i行第j列位置上的像元亮度值; P_{ij}—归一化共生矩阵; N—计算纹理特征时移动窗口的大小; ME—灰度共生矩阵的均值, VA_iVA_j—方差

表 5 建模因子相关性分析

Table 5 Modeling factor correlation analysis

变量	变量因子	相关系数
X1	NDVI	0.87**
X2	RVI	0.86**
X3	SAVI	0.80**
X4	DVI	0.80**
X5	EVI	0.77**
X6	B ₄	0.77**
X7	ARVI	0.76*
X8	Mean	0.76**
X9	Correlation	-0.70*

注: **表示p<0.01; *表示p<0.05(双尾); -表示负相关

立逐步回归方程。其表达式为:

$$Y=b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+\dots+bnXn+C$$

式中, Y 为估算得到的森林地上碳储量, X_n 为第 n 个预测遥感变量, b_n 为第 n 个变量的回归系数;

C 为回归方程中的常数项。

选取相关度最高的归一化植被指数 (NDVI) 作为单一变量与碳储量拟合建立模型, 用于模型的估测效果比较 (表 6)。结果表明, 由多个变量组成的多元逐步回归模型拟合度较好。

2.5 窗口大小的选择

GF-2 高分辨率遥感影像在提取纹理特征时, 通过改变窗口的大小可以得到更多的纹理信息, 即窗口内部统计得到的属性可作为该窗口中心的特征值, 在不同窗口下, 得到的纹理细致程度和整体结构不同 (邵文静等, 2021; 张梦顺, 2022)。在保证筛选的遥感因子相同的情况下, 分别选取 3×3、5×5、7×7、9×9 窗口构建模型, 进而筛选最适宜的纹理窗口。

2.6 模型精度验证

将验证数据代入 4 个窗口下的模型中, 利用均方根误差 (RMSE)、决定系数 (R²) 作为模型精度评价的指标, 公式的表达式为:

表6 回归模型与参数

Table 6 Regression model and the parameters

回归模型	方程	R^2	调整后 R^2	F	Sig
多元逐步回归模型	$Y=18.549-46.981X_1+3.453X_2+X_6$	0.85	0.80	15.06	0.00
一元线性模型	$Y=7.393X_1-1.407$	0.85	0.71	28.61	0.00
二次曲线模型	$Y=46.12-138.207X_1+111.255X_1^2$	0.83	0.79	21.69	0.00
S模型	$Y=e^{2.598-0.893X_1}$	0.70	0.73	26.90	0.00
复合模型	$Y=0.854 \times 8.341^{X_1}$	0.75	0.73	29.64	0.00
成长模型	$Y=e^{0.158+2.121X_1}$	0.75	0.73	29.64	0.00
指数模型	$Y=0.854e^{2.121X_1}$	0.75	0.73	29.64	0.00
Logistic模型	$Y=1/(0+1.171 \times (0.12 \times 10^{-4})^{X_1})$	0.75	0.73	29.64	0.00
线性模型	$Y=7.393X_1-1.407$	0.74	0.72	28.62	0.00
幂次方模型	$Y=6.147X_1^{1.378}$	0.74	0.71	28.26	0.00
对数模型	$Y=5.473+4.801\ln(X_1)$	0.73	0.70	27.30	0.00
逆函数模型	$Y=8.198-3.112/X_1$	0.72	0.70	26.00	0.00

注: X_1 为植被指数NDVI; X_2 为RVI; X_6 为遥感影像第4波段灰度值

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$

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。

3 结果与分析

3.1 验证结果

将拟合度最优的2个模型进行比较,选择预测精度最高的模型提取纹理窗口。由图2可知,多元逐步回归模型的预测精度高于二次曲线模型,基于该模型提取4个窗口(3×3、5×5、7×7、9×9),最接近的纹理大小是5×5窗口,效果最差的是3×3窗口。因此,将纹理窗口设置为5×5时对森林碳储量的反演效果最好。

3.2 森林地上碳储量与碳密度

对各样地实测碳储量与碳密度特征进行分析(表7),碳储量的变化范围为3.09~4.39 t,碳密度为87.5 t/hm²。对实测值的离散程度进行分析,均值为3.5,标准差为0.35,变异系数为0.09,说明各样地之间的碳储量差异较小,与估测碳密度较相近。因此,通过实测样地数据一定程度上能够反映研究区的森林生长状况。

实地观测树木共计858棵,不同优势树种(组)的碳储量由大到小依次为:马尾松>栎树>香樟>青冈>其他阔叶树,分别占实测碳储量的44.17%、42.16%、5.92%、4.92%、2.83%(表8)。

通过模型对九峰山森林公园碳储量进行反演,结果显示,总碳储量为1.06×10⁴ t,平均碳密度为84.59 t/hm²。

3.3 碳密度空间分布特征

研究区碳密度空间分布如图3,参照碳密度的等级划分(乌迪等,2019)将该地区的碳密度分为:≤50、50~70、70~90、≥90四个等级,依次为低密度、较低密度、较高密度和高密度。高值地区分布在研究区北部及南部区域,中部相对较低,根据实地考察与遥感图像目视解译可知,碳密度低的区域为道路、人为建设的公共设施及森林公园的边缘地带,海拔高的地区碳密度更高。可以看出,较高密度与高密度碳为主要分布区,其次为较低密度与低密度区,表明该区域有较高的碳汇潜力。

4 讨论

遥感影像空间分辨率对碳储量估算的精度有一定影响,高分辨率影像在地物分类识别功能上更准确,尤其是针对地物类别较少、单一的研究对象,可以减少混合像元、信号过于饱和带来的较大误差,以此提高模型精度。如蒙诗栋等(2017)采用WorldView-2

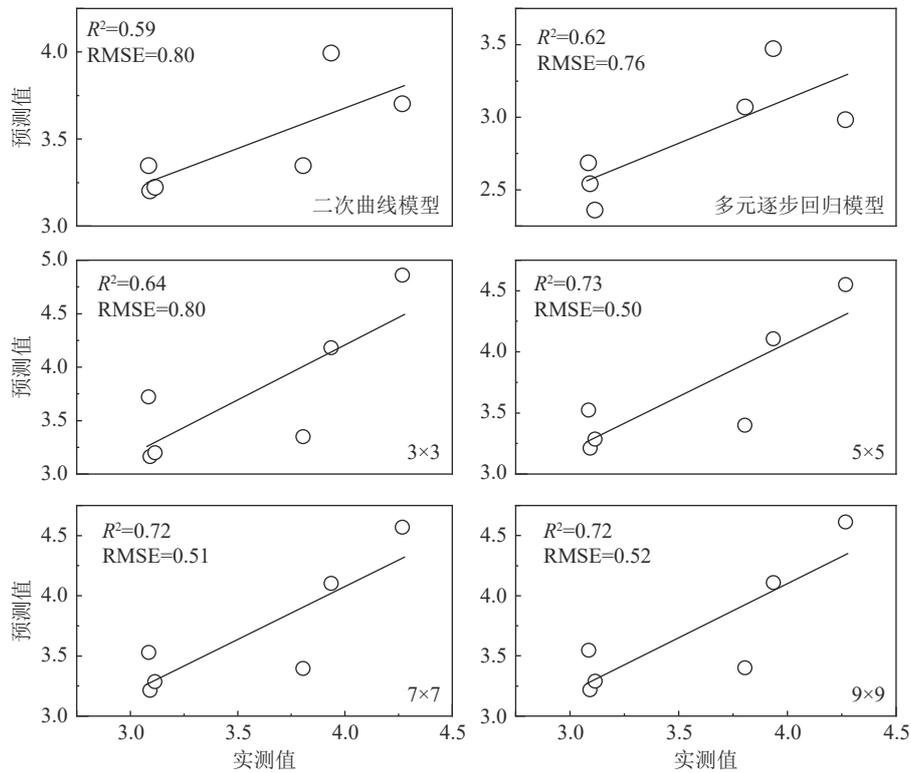


图 2 回归模型实测值和预测值散点图

Fig. 2 A scatter plot of measured and predicted values from regression model

表 7 实测样地碳储量状况

Table 7 Measured carbon storage status of sample plots

样地数	碳密度/(t·hm ⁻²)	统计值				变异系数
		最小值	最大值	均值	标准差	
18	87.5	3.09	4.39	3.5	0.35	0.09

表 8 不同树种(组)碳储量具体分布

Table 8 Specific distribution of carbon storage in different tree species (groups)

树种	碳储量/t	百分比/%	样本量/棵
马尾松	27.82	44.17	318
栎树	26.56	42.16	365
香樟	3.72	5.92	14
青冈	3.09	4.92	114
其他阔叶树	1.78	2.83	47

影像为数据源,提取遥感特征,建立的估测模型精度达 0.85。徐丽华等(2014)以 Quick Bird 高分辨率影像为数据源,提取波段灰度值、植被指数、纹理信息等 50 个因子建立模型,拟合优度可达到 0.884。而采用中低分辨率遥感数据源建立的估测模型精度相对较低,会忽略一些狭窄、稀疏的森林覆盖区域,导

致较大的误差(Yang et al., 2023)。本次研究采用 GF-2 影像提取遥感特征值,构建回归模型,估算九峰山森林公园植被地上碳储量。模型的拟合优度在 0.7~0.8 之间,说明在区域尺度上,基于 GF-2 遥感影像评估森林碳储量具有较大的优势。

本次研究共建立 12 个回归模型,其中,多元逐

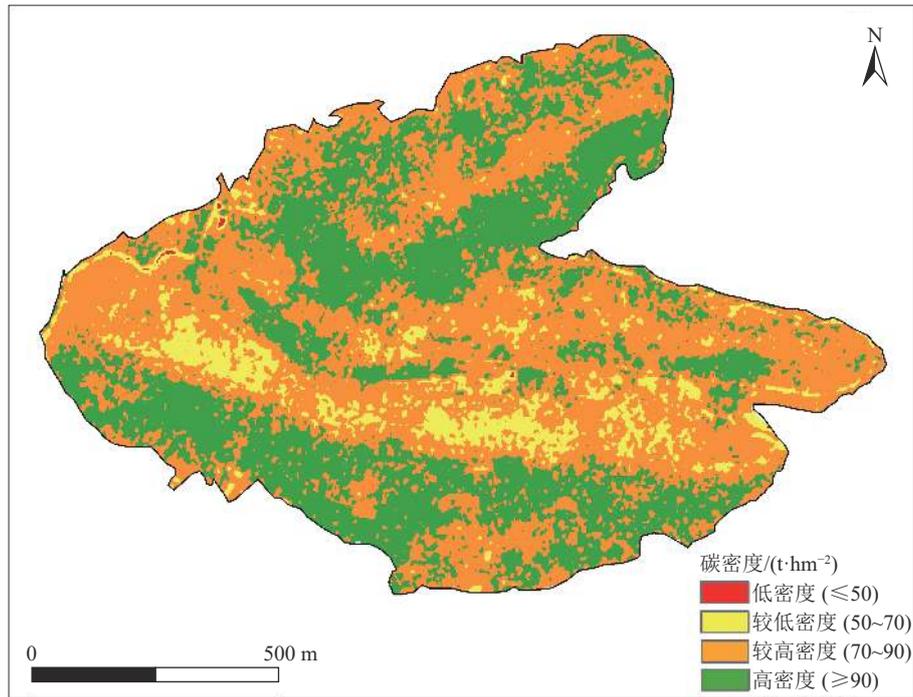


图3 碳密度空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of carbon density

步回归模型的拟合优度高达 0.8(表 6)。一般来讲,以多个变量组成的估测模型高于单变量模型。秦立厚等(2017)建立了一元和二元线性模型,评估杉木地上生物量,并比较模型的不确定性,结果表明,二元模型的估测精度较高。汤煜等(2020)采用多个植被指数构建回归模型,发现多元逐步回归模型的判定系数最高,模型精度达 0.838。通过添加纹理信息,能够进一步提高碳储量模型的精度,在基于植被指数及波段信息建模的基础上,与窗口下纹理信息结合,使预测精度由 0.62 提高到 0.73。本次研究通过增加纹理窗口能够有效地提高模型的预测精度,这是由于提取纹理信息可以增强图像结构,获取更多的地物信息。因此,采用该模型估算碳储量可以得到较准确、可靠的结果。

李威等(2021)研究表明,中国森林公园的平均碳密度值为 96.16 t/hm^2 ,高于本次研究结果(84.59 t/hm^2),与晋北地区相比,碳密度差异较大。郑吉林等(2024)对晋北地区土地利用变化和碳储量的空间分布特征进行研究,与该地区 2019 年碳密度(149.27 t/hm^2)进行比较,显著高于本次研究结果,表明研究区的固碳潜力有提升空间。但研究区碳密度高于川西米亚罗自然保护区(53.14 t/hm^2)及祁连山公园青海片区

(41.11 t/hm^2)(巫明焱等, 2020; 李娜等, 2021),表明九峰山森林公园发挥着重要的固碳作用。

本次研究虽然采用高分辨率遥感数据且运用多个遥感参数建立估测模型,但实测的样地数量较少,因此对森林整体的碳储量状况描述存在偏差。在计算实测植被碳储量时,选用的碳转换系数直接参考国际常用的计算方法,由于不同植被的碳含量不同,所以会生成较小的偏差,为更进一步提高数据准确度,可以通过实地考察并采集研究区内植物样本,通过元素分析仪测定不同植被的碳质量分数,得出研究区内植被的碳转换系数,使研究结果更加准确。

5 结 论

本文基于 GF-2 数据源提取遥感影像中的植被指数、波段灰度值与纹理信息作为特征变量,结合实地考察数据建立地上碳储量估测模型,以此对林地内树木生长状况及碳汇能力进行研究。研究发现:多元逐步回归模型拟合度优于单一植被指数 NDVI 组成的回归模型。为进一步提高精度,在此模型基础上利用灰度共生矩阵提取图像纹理特征,改变窗口大小。本文共选取 4 种窗口模型进行预测,模型在 3×3 窗口下的预测精度最差,在 5×5 窗口下

预测精度最好。运用模型估算该地区地上总碳储量为 1.06×10^4 t, 总体平均碳密度为 84.59 t/hm^2 ; 研究区南部、北部区域碳密度范围较高, 中部地区相对较低。研究采用 GF-2 高分辨率遥感图像对森林植被地上碳储量进行反演, 并通过增加纹理特征窗口提高了模型的预测精度。

参考文献

- Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 292(5525): 2320–2322.
- Moazzam N S. 2010. Estimation of carbon stocks in subtropical managed and unmanaged forests of Pakistan[C]//Thirteenth Sustainable Development Conference (SDC) 21-23 December 2010, Islamabad, Pakistan. DOI:10.1016/0167-5087(84)90186-8.
- Nandal A, Yadav S S, Rao A S, et al. 2023. Advance methodological approaches for carbon stock estimation in forest ecosystems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(2): 315.
- Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 333(6045): 988–993.
- Planck N R V, MacFarlane D W. 2015. A vertically integrated whole-tree biomass model[J]. *Trees*, 29: 449–460.
- Pragasam L A. 2022. Tree carbon stock and its relationship to key factors from a tropical hill forest of Tamil Nadu, India[J]. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 6(1): 32–39.
- Qiao Y, Zheng G, Du Z, et al. 2023. Tree-species classification and individual-tree-biomass model construction based on hyperspectral and LiDAR data[J]. *Remote Sensing*, 15(5): 1341.
- Sun W, Liu X. 2020. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China[J]. *Forest Ecosystems*, 7(1): 1–14.
- Wei M, Jiao L, Zhang P, et al. 2023. Spatio-temporal diversity in the link between tree radial growth and remote sensing vegetation index of qinghai spruce on the northeastern margin of the tibetan plateau[J]. *Forests*, 14(2): 260.
- Yang F, Jiang X, Ziegler A D, et al. 2023. Improved Fine-Scale Tropical Forest Cover Mapping for Southeast Asia Using Planet-NICFI and Sentinel-1 Imagery[J]. *J. Remote Sens.*, 3: Article 0064.
- 鲍宽乐, 许文波, 王庆同. 2023. 基于机器学习的 Landsat 数据地层信息提取——以西南天山柯坪地区为例[J]. *地质通报*, 42(4): 637–645.
- 曹海翔, 邱心怡, 贺涛. 2022. 森林生物量遥感卫星发展综述[J]. *光学学报*, 42(17): 402–409.
- 丁增发. 2014. 安徽亚热带常绿阔叶林甜槠等 4 个优势树种的生物量模型及生长模型[J]. *安徽农业大学学报*, 41(5): 859–865.
- 葛婧, 彭建松. 2023. 城市绿地碳储量估算方法分析[J]. *现代园艺*, 46(12): 179–184.
- 苟睿坤, 陈佳琦, 段高辉, 等. 2019. 基于 GF-2 的油松人工林地上生物量反演[J]. *应用生态学报*, 30(12): 4031–4040.
- 菅永峰, 韩泽民, 黄光体, 等. 2021. 基于高分辨率遥感影像的北亚热带森林生物量反演[J]. *生态学报*, 41(6): 2161–2169.
- 李兰, 陈尔学, 李增元, 等. 2016. 合成孔径雷达森林树高和地上生物量估测研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 31(4): 625–633.
- 李娜, 李清顺, 李宏韬. 2021. 祁连山国家公园青海片区森林植被碳储量与碳汇价值研究[J]. *浙江林业科技*, 41(2): 41–46.
- 李威, 黄玫, 张远东, 等. 2021. 中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态[J]. *应用生态学报*, 32(3): 799–809.
- 蒙诗栋, 庞勇, 张钟军, 等. 2017. WorldView-2 纹理的森林地上生物量反演[J]. *遥感学报*, 21(5): 812–824.
- 倪欢, 牛晓楠, 李云峰, 等. 2021. 基于统计学习方法的安徽省安庆市自然资源自动化监测——以山体为例[J]. *地质通报*, 40(10): 1656–1663.
- 潘腾. 2015. 高分二号卫星的技术特点[J]. *中国航天*, 44(1): 3–9.
- 庞勇, 李增元, 余涛, 等. 2022. 森林碳储量遥感卫星现状及趋势[J]. *航天返回与遥感*, 43(6): 1–15.
- 秦立厚, 张茂霞, 钟世红, 等. 2017. 森林生物量估算中模型不确定性分析[J]. *生态学报*, 37(23): 7912–7919.
- 邵文静, 孙伟伟, 杨刚. 2021. 高光谱遥感影像纹理特征提取的对比分析[J]. *遥感技术与应用*, 36(2): 431–440.
- 汤旭光, 刘殿伟, 王宗明, 等. 2012. 森林地上生物量遥感估算研究进展[J]. *生态学杂志*, 31(5): 1311–1318.
- 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 2020. 城市绿地碳储量估算及空间分布特征[J]. *生态学杂志*, 39(4): 1387–1398.
- 王东明, 田世攀, 张昱, 等. 2021. 森林-沼泽浅覆盖区地质填图方法试验——以黑龙江 1:5 万望峰公社幅为例[J]. *地质通报*, 40(5): 782–797.
- 乌迪, 巫明焱, 陈佳丽, 等. 2019. 基于 Landsat 影像的梭磨乡冷杉林地上碳储量估测及其时空动态[J]. *生态科学*, 38(1): 111–122.
- 魏吉鑫, 刘斯文, 李海潘, 等. 2020. 江西赣州废弃离子型稀土矿修复区植被高光谱特征与健康状况评价[J]. *地质通报*, 39(12): 2037–2043.
- 巫明焱, 董光, 王艺积, 等. 2020. 川西米亚罗自然保护区森林地上碳储量遥感估算[J]. *生态学报*, 40(2): 621–628.
- 徐丽华, 张结存, 黄博, 等. 2014. 基于 QuickBird 影像的城市森林碳储量遥感估测[J]. *应用生态学报*, 25(10): 2787–2793.
- 续珊珊. 2014. 森林碳储量估算方法综述[J]. *林业调查规划*, 39(6): 28–33.
- 岳春宇, 郑永超, 庞勇, 等. 2020. 卫星林业遥感系统及应用[J]. *卫星应用*, 106(10): 51–55.
- 殷鸣放, 杨琳, 殷炜达, 等. 2010. 森林固碳领域的研究方法及其最新进展[J]. *浙江林业科技*, 30(6): 78–86.
- 张桂莲, 邢璐琪, 张浪, 等. 2022. 城市绿地碳汇计量监测方法研究进展[J]. *园林*, 39(1): 7.
- 张梦顺. 2022. 高光谱遥感影像中纹理特征的作用[J]. *工程技术研究*, 7(12): 219–221.
- 郑吉林, 蔡艳龙, 郭晓宇, 等. 2024. 基于 InVEST 模型的晋北土地利用变化与碳储量研究[J]. *地质通报*, 43(1): 173–180.