#### DOI: 10.5846/stxb202001050035

师吉红,项佳,刘健,邓洋波,李明慧,余坤勇.南方红壤典型水土流失区马尾松林地上林木碳储量的遥感监测———以长汀县河田镇为例.生态学报,2021,41(6):2151-2160.

Shi J H, Xiang J, Liu J, Deng Y B, Li M H, Yu K Y.Remote sensing monitoring of aboveground carbon storage of *Pinus massoniana* forests in a typical red soil erosion area in Southern China: Hetian, Changting County of Fujian Province.Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6):2151-2160.

# 南方红壤典型水土流失区马尾松林地上林木碳储量的 遥感监测

——以长汀县河田镇为例

师吉红<sup>1,2,3</sup>,项 佳<sup>1,2,3</sup>,刘 健<sup>1,2,3</sup>,邓洋波<sup>1,2,3</sup>,李明慧<sup>1,2,3</sup>,余坤勇<sup>1,2,3,\*</sup>

1 福建农林大学林学院,福州 350002

2 3S 技术与资源优化利用福建省高校重点实验室,福州 350002

3 福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室,福州 350002

**摘要:**森林碳储量动态变化对揭示区域水土流失治理成效具有重要指示意义。以长汀县河田镇为例,2017 年随机设置 34 个马 尾松林样本作为建模集,分别与同期 Landsat 影像的原始波段、植被指数及主成分因子进行回归分析,构建马尾松((*Pinus massoniana*))林地上林木碳储量的最佳反演模型,基于伪不变特征原理的线性归一化法实现该模型在 2003、2010 年影像上的适 用性校正转换,实现研究区 2003、2010、2017 年马尾松林地上林木碳储量的反演及时空分异特征的研究。结果表明:研究区 2017 年马尾松林地上林木碳储量最佳遥感反演模型是以绿色植被指数(GNDVI)为自变量构建的指数模型: *C*<sub>2017</sub> = 0.006e<sup>14,357CNDVI</sup>2017,该模型拟合的决定系数为 0.57,平均相对精度为 82.19%;2003 年、2010 年马尾松林地上林木碳储量遥感估 测模型为: *C*<sub>2003</sub> = 0.006e<sup>(16,4086CNDVI</sup>2003<sup>+1,1428)</sup>、*C*<sub>2010</sub> = 0.006e<sup>(15,1677CNDVI</sup>2010<sup>+1,5821)</sup>,两期校正模型的决定系数均在 0.85 以上;2003、 2010 及 2017 年碳储量分别为 8.24 t/hm<sup>2</sup>、11.34t/hm<sup>2</sup>、16.14 t/hm<sup>2</sup>,整体呈上升趋势;地上林木碳储量随海拔、坡度的升高而增 加,向阳坡地上林木碳储量高于背阴坡;碳储量增长率随海拔、坡度的升高而降低,背阴坡碳储量增长率高于向阳坡。 关键词:马尾松林;地上林木碳储量;遥感;伪不变特征;时空分异特征

# Remote sensing monitoring of aboveground carbon storage of *Pinus massoniana* forests in a typical red soil erosion area in Southern China: Hetian, Changting County of Fujian Province

SHI Jihong<sup>1,2,3</sup>, XIANG Jia<sup>1,2,3</sup>, LIU Jian<sup>1,2,3</sup>, DENG Yangbo<sup>1,2,3</sup>, LI Minghui<sup>1,2,3</sup>, YU Kunyong<sup>1,2,3,\*</sup>

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 3S Technology and Resources Optimized Utilization Key Laboratory of Fujian University, Fuzhou 350002, China

3 Fujian Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Monitoring and Sustainable Management and Utilization, Fuzhou 350002, China

Abstract: The dynamic changes of forest carbon storage have important indications for revealing the effectiveness of regional soil erosion control. Take Hetian Town, Changting County as an example. In 2017, 34 Masson pine (*Pinus massoniana*) forests samples were randomly set as the modeling set, and the original waveband, vegetation index and principal component factor regression analysis of the Landsat images of the same period were used to construct the best inversion model for the aboveground forest carbon storage of Masson pine forests. The best inversion model, the linear normalization method based

基金项目:国家自然科学基金项目(31770760);福建农林大学科技创新专项(KF2015086,CXZX2016060)

收稿日期:2020-01-05; 网络出版日期:2021-03-05

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yuyky@126.com

on the principle of pseudo invariant feature (PIF), realizes the applicability correction conversion of the model on the images of 2003 and 2010, and realizes the inversion of the carbon storage of the Masson pine forests in the study area in 2003, 2010 and 2017. Research on spatio-temporal differentiation characteristics. The results show that the best remote sensing inversion model for the aboveground forest carbon storage of Masson pine forests in the study area in 2017 is an index model constructed with the Green Normalized Vegetation Index (GNDVI) as the independent variable;  $C_{2017} = 0.006e^{14.357 \text{CNDVI}_{\text{mar}}}$ , the fitting coefficient of determination of this model is 0.57, and the average relative accuracy is 82.19%; In 2003 and 2010, the remote sensing estimation models of the aboveground forest carbon storage of Masson pine forests are:  $C_{2003} = 0.006e^{(16.4086 \text{CNDVI}_{\text{mar}}+1.1428)}$ ,  $C_{2010} = 0.006e^{(15.1677 \text{CNDVI}_{\text{mar}}+1.5821)}$ , The coefficient of determination of the two-period calibration model is above 0.85; Carbon storage in 2003, 2010 and 2017 were 8.24 t/hm<sup>2</sup>, 11.34 t/hm<sup>2</sup> and 16.14 t/hm<sup>2</sup>, respectively, showing an overall upward trend; the aboveground forest carbon storage increases with the elevation and slope, and the aboveground forest carbon storage on the shady slope; The growth rate of carbon storage decreases with the increase of altitude and slope, and the growth rate of carbon storage on the shady slope is higher than that on the sunny slope.

Key Words: Masson pine forests; aboveground forest carbon storage; remote sensing; pseudo-invariant features; spatiotemporal differentiation characteristics

南方红壤区是我国重要的林木产区。由于侵蚀性降雨集中、土壤抗蚀性差、林下植被匮乏<sup>[1]</sup>以及强烈的 人为干扰<sup>[2]</sup>,南方红壤区已成为仅次于黄土高原的中国第二大水土流失区<sup>[3]</sup>。长汀县是我国南方水土流失 最严重的地区之一<sup>[4]</sup>,该地区通过人工植树种草<sup>[5]</sup>、封山育林<sup>[6]</sup>等措施,水土流失势头得到了初步控制。森 林碳储量不仅能够维持生态平衡<sup>[7]</sup>、反映森林质量<sup>[8]</sup>,也对水土流失治理成效有一定的指示作用。因此,森 林碳储量可为区域生态环境评价、区域水土流失治理成效评估提供辅助<sup>[9]</sup>。

马尾松(Pinus massoniana)作为长汀水土流失区生态恢复和重建的先锋树种<sup>[10]</sup>,具有耐贫瘠、成活率高的特点<sup>[11]</sup>。马尾松林地上林木碳储量的变化直接反映区域森林总碳储量的状况。传统的碳储量测量方法多采用样地清查法<sup>[12]</sup>,该方法成本高,工作量大,仅适用于较小的区域,并且人为选择样地,主观因素强,导致结果具有不确定性。针对大面积的碳储量估算,遥感技术具有明显的优势。遥感技术可以对大面积的森林进行动态监测<sup>[13]</sup>,更好地了解森林碳储量的变化。众多学者利用遥感技术对森林碳储量进行估算。Fauzi等<sup>[14]</sup>对马来西亚吉兰丹热带森林不同海拔梯度碳储量进行估算。覃连欢<sup>[15]</sup>使用生物量换算因子法估算广西省森林植被的碳储量。马尾松单木生物量模型是准确测算马尾松林碳储量不可缺少的工具,对马尾松林生物量、碳储量的研究多采用福建省通用模型估算<sup>[16-17]</sup>。但众多研究表明,不同起源<sup>[18]</sup>、不同生态环境<sup>[19]</sup>、不同林龄<sup>[20]</sup>的同一树种的生长存在较大差异。长汀水土流失区马尾松所处的生态环境比福建其他地区马尾松林特殊,土壤极度贫瘠,造成该区域马尾松生长状况较差,同年生马尾松的胸径、树高通常达不到正常生长水平,导致通用模型并不适用于该区马尾松生长预测。

基于此,研究以长汀县河田镇马尾松林为对象,利用项佳等<sup>[21]</sup>提出的长汀红壤侵蚀区马尾松林生物量估 算模型,结合地面样地碳储量数据和河田镇 2017 年 11 月 1 日 Landsat 8 OLI 遥感影像,构建马尾松林地上林 木碳储量遥感反演模型。基于伪不变特征原理的线性归一化法((pseudo-invariant features, PIF)),实现反演 模型在 2003 年、2010 年同期影像上的适用性校正,反演 3 期马尾松林地上林木碳储量,进一步分析区域马尾 松林地上林木碳储量时空分异特征,以期为我国南方水土流失区下一步生态恢复重建工作提供重要依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

河田镇(东经116°16′—116°34′,北纬25°30′—25°44′)位于福建省长汀县中部地区,总面积约296 km<sup>2</sup>

(图 1)。该地区属亚热带海洋性季风气候,年均温 17—19.5℃,年降雨量 1700 mm<sup>[22]</sup>,降雨强度大。全镇 低山高丘陵环绕,属于河谷盆地,平均海拔为 390 m,以 山地丘陵红壤为主,侵蚀严重,土壤贫瘠、地表含沙量 大,属于强水土流失区。以河田镇为中心的红壤侵蚀劣 地,原有地带性植被常绿阔叶林被次生马尾松林代替, 稀疏矮小、生长缓慢的"小老头马尾松"众多,林下分布 以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主,形成以马尾松-芒萁为主的植被群落结构<sup>[19]</sup>。在大力开展封山育林、 种植水保林草、改造低效林等工程措施的综合治理下, 河田镇水土流失治理取得初步成效,但林分结构不稳 定、地表径流频发的背景下其生态环境仍十分脆弱。

## 1.2 数据的获取与预处理

1.2.1 样地的设置

根据典型取样原则,于 2017 年 7 月在全镇范围内 随机但空间上又具有一定均匀性和代表性设置 45 个 20 m×20 m 的样地,采用 UG905 高精度手持 GPS 准确 定位。考虑到研究区马尾松林木林分质量相对较弱,故



本次调查起测胸径为3 cm。对45 个样地内达到起测胸径的马尾松进行每木检尺,测量并记录胸径、树高和冠幅。

1.2.2 样地碳储量的计算

基于马尾松林样地每木检尺的胸径、树高信息,利用项佳等<sup>[21]</sup>提出的长汀红壤侵蚀区马尾松林生物量估 算模型(见表1),计算各样地蓄积量、生物量。

Table 1 Masson pine biomass model						
最优模型 Optimal model	公式 Formula	最优模型 Optimal model	公式 Formula			
单木材积 Single timber volume	$V = 0.000162257 D^{1.784} H^{0.590}$	树冠生物量 Canopy biomass	$W = 499.4899126D^{0.580}H^{-1.693}Cl^{0.904}V$			
树干生物量 Trunk biomass	$W = 217.325106 (DH)^{0.153} V$	单木生物量 Single wood biomass	$W = 482.6386206 (DH)^{0.075} V$			

表1 马尾松生物量模型

V:立木材积 Volume (m<sup>3</sup>);W:地上生物量 Aboveground biomass (t/hm<sup>2</sup>);D:胸径 Diameter at breast height (cm);H:树高 Height (m);Cl:冠长 Crown length (m)

采用李海奎<sup>[23]</sup>提出的马尾松含碳系数(0.4596)计算各样地地上林木碳储量值:

$$C = B \times C_c \tag{1}$$

式中,C为平均碳储量( $t/hm^2$ );B为平均生物量( $t/hm^2$ ); $C_c$ 为含碳系数。

#### 1.2.3 遥感数据获取及预处理

利用遥感影像定量反演时,理论上外业调研时间应与影像获取时间保持一致或接近。但区域可获取的2017年7月份左右有效卫星影像缺失,考虑到本研究时间跨度长、马尾松生长指标相同年份内变化相对较小,最终选定2017年11月1日的Landsat8OLI影像作为同期模型构建的基础数据,2003年、2010年则选择的2003年12月29日、2010年1月14日Landsat5TM影像,以上数据均来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)。在此基础上采用2017年分辨率更高的Spot6影像和EcoDrone-UAS八旋翼无人机获取的无人机影像作为参考影像,对3期基础影像进行匹配校准,配准精度在0.5个栅格以内,并对影像进行辐射定标、

大气校正、影像裁剪等预处理。

#### 1.3 模型自变量的选择

研究区马尾松林下以芒萁等耐旱瘠草为主。曾宏达<sup>[24]</sup>在对比马尾松与芒萁的光谱曲线后,发现芒萁反 射率高于马尾松,特别是在绿光、红光等波段差异明显。而植被指数是光谱反射率的组合运算,可以突出影像 中的植被信息。为此,研究选取植被指数(表 2)、红光波段、绿光波段参与建模。

	]	Table 2       Vegetation Index	
	缩写	公式	参考文献
Name	Abbreviation	Formula	References
归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	NDVI=(Nir-Red)/(Nir+Red)	[25]
绿色植被指数 Green Normalized Vegetation Index	GNDVI	CNDVI=(Nir-Green)/(Nir+Green)	[26]
宽动态植被指数 Wide Dynamic Range Vegetation Index	WDRVI	WDRVI=(aNir-Red)/(aNir+Red)	[27]
新归—化比值指数 Nitrogen Reflectance Index	NRI	NRI=Nir/Green	[28]
比值植被指数 Ratio Vegetation Index	RVI	RVI=Nir/Red	[25]
差值植被指数 Difference Vegetation Index	DVI	DVI=Nir-Red	[29]
垂直植被指数 Perpendicular Vegetation Index	PVI	$PVI=(Nir-bRed-c) / \sqrt{1+b^2}$	[25]
修改型土壤调整植被指数 Modified Soil-adjusted Vegetation Index	MSAVI	$MSAVI = \left[ (2Nir+1) - \sqrt{(2Nir+1)^2 - 8(Nir-Red)} \right]/2$	[25]

表 2 植被指数

表中 Green 代表绿光波段;Red 代表红光波段;Nir 代表近红外波段;a为加权系数,在0.1-0.2之间;b为土壤线的截距;c为土壤线的斜率

多元回归常用于多变量模型的构建,多变量的引入可以提高模型的决定系数(*R*<sup>2</sup>)。通过对各植被指数 进行相关性分析后发现,各植被指数间均存在极显著正相关,如果直接进行多元回归可能造成模型的"估计 不稳定"。主成分分析可在保留原指标信息的同时避免了多元变量的共线性问题。基于此,为减少变量相关 性对模型估测的影响,研究通过主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)选取主成分因子(Principal Component Factor, PCF)(式 2)参与建模。

PC = 0.902NDVI + 0.977GNDVI + 0.906WDRVI + 0.976NRI + 0.907RVI + 0.894DVI + 0.890PVI + 0.890PVI

0.952MSAVI

(2)

1.4 基于伪不变特征原理的线性归一化法

研究区模型是基于 2017 年 11 月 1 日 Landsat 8 OLI 影像构建的,为更好的将模型反演于 2003 年 12 月 9 日、2010 年 1 月 14 日 Landsat 5 TM 影像,研究基于伪不变特征原理(PIF),实现三期影像的数据匹配校正。 伪不变特征原理(PIF)是从多幅影像中选取不变特征点,提取这些点的灰度值,建立参考影像与目标影像特 征间的回归方程,达到目标影像校正的目的。由于研究时序长,且研究区属于山区,2003 年至 2017 年间不变 地物特征点相对难寻,故通过分析在确定不变地物点上采取间接的方法更加合适。

#### 2 结果与分析

2.1 2017年马尾松林地上林木碳储量反演模型的确定

2.1.1 2017年马尾松林地上林木碳储量遥感估测模型的构建

利用公式(1)计算了 45 个样地的马尾松林地上林木碳储量。在对 45 个样地点进行初步回归拟合和残差分析的基础上,去掉 3 个异常点。按照建模集样本 80%的选取原则,随机选取 34 个样本作为建模集,8 个样本作为检验集。

利用 SPSS 软件对 34 个建模样本进行指数回归模型的拟合,采用决定系数(R<sup>2</sup>)和 F 统计量、显著性水平(Sig.)、估算标准误差等指标比较模型拟合效果。各模型及拟合指标见表 3。

	Table 3	The parameters and fit in	ndex of exponential re-	gression model	
名称 Name	模型汇总 Model summary	决定系数 Coefficient of determination	F 统计量 F statistic	显著性水平 Sig.	估算标准误差 Estimated standard error
NDVI	$y = 0.019 e^{9.983x}$	0.41	22.05	0.00	0.49
GNDVI	$y = 0.006 e^{14.357x}$	0.57	41.60	0.00	0.42
WDRVI	$y = 14.928e^{6.253x}$	0.42	23.33	0.00	0.49
NRI	$y = 0.049 e^{1.694x}$	0.57	42.08	0.00	0.42
RVI	$y = 0.415 e^{0.718x}$	0.44	24.82	0.00	0.48
DVI	$y = 0.602 \mathrm{e}^{13.971x}$	0.41	21.84	0.00	0.49
PVI	$y = 1.936 e^{9.971x}$	0.40	21.55	0.00	0.50
MSAVI	$y = 0.381 e^{9.594x}$	0.46	26.99	0.00	0.47
PCF	$y = 0.174 e^{0.462x}$	0.52	34.60	0.00	0.44
Green	$y = 15.599 \mathrm{e}^{-4.172x}$	0.00	0.06	0.81	0.64
Red	$y = 16.606 \mathrm{e}^{-8.309x}$	0.01	0.29	0.59	0.64

表 3 指数回归模型的参数结果

由表 3 可知,除绿光波段反射率和红光波段反射率外,其余植被指数建模 Sig.值均为 0.00,模型具有显著性。其中以 GNDVI、NRI、PCF 为自变量拟合的回归模型 R<sup>2</sup>大于 0.5, F 统计值分别为 42.08、41.60、34.60,估算标准误差分别为 0.42、0.42、0.44。初步选择这三组指数模型为较优模型。





http://www.ecologica.cn

### 2.1.2 模型精度检验

采用均方根误差、平均相对精度两个指标对上述3种较优模型的估算精度进行检验。由图2可知,三组 模型对马尾松林地上林木碳储量整体估算效果均较好。结合表4可知,以GNDVI构建的指数模型(C<sub>2017</sub> = 0.006e<sup>14.357GNDVI2017</sup>)均方根误差较低、平均相对精度较高,最终选定该模型为估算长汀县河田镇马尾松林地上 林木碳储量的反演模型。

	Tuble 4 Results of	tinee optimar model myersions	
估算指标	估算模型	均方根误差	平均相对精度
Estimated index	Estimation model	Root mean square error	Average relative accuracy
GNDVI	$C_{2017} = 0.006 \mathrm{e}^{14.357 \mathrm{GNDVI}_{2017}}$	2.77	82.19
NRI	$C_{2017} = 0.049 \mathrm{e}^{1.694 \mathrm{NRI}_{2017}}$	3.24	80.87
PCF	$C_{2017} = 0.174 e^{0.462 PCF_{2017}}$	5.04	77.82

表4 3种优选模型反演精度检验结果 Table 4 Passific of three optimal model inversions

#### 2.2 2003年、2010年模型的确定及3期林木碳储量的反演

基于伪不变特征原理的线性归一化法(PIF),在提取三期不变地物点 GNDVI 值基础上,以校正之后的 2010 年 GNDVI 影像校正 2003 年的 GNDVI 影像,最终得到三期影像 GNDVI 值间的校正关系(表 5)。两个模型拟合 *R*<sup>2</sup>均达到 0.85 以上,整体表明拟合效果可以满足不同时期影像校正需求。采用均方根误差检验待校 正影像(2003 年、2010 年)与参考影像的相似性关系,检验结果见表 6。校正后影像 GNDVI 值的均方根误差 均小于校正前。

表 5 5 册影像对应不受象元 GNDVI 值线性天涯
-----------------------------

Table 5	Linear relationship	between GNDVI	of invariant	points in the	image of the	e three period

年份 Year	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination
2010	$GNDVI_{2017} = 1.0564GNDVI_{2010} + 0.1102$	0.86
2003	$\text{GNDVI}_{2010} = 1.0819 \text{GNDVI}_{2003} - 0.0290$	0.95
	$GNDVI_{2017} = 1.1429GNDVI_{2003} + 0.0796$	

将表 5 中 2017 年 GNDVI 与 2003 年、2010 年 GNDVI 值转换关系式分别代入构建的马尾松林地上林木碳 储量遥感反演模型 y = 0.006e<sup>14.357x</sup> 中,得到三个时期的长汀县河田镇马尾松林地上林木碳储量遥感反演模型 见表 7。利用构建的遥感估算模型反演 2003 年、2010 年及 2017 年长汀县河田镇马尾松林地上林木碳储量。

表 6 校正前后影像与 2017 年影像 GNDVI 值均方根误差			表 7 马尾松林地上林木碳储量遥感反演模型		
Table 6       The root mean square error of the GNDVI value of the			Table 7 Re	mote sensing inversion model of aboveground forest	
image before and after correction and the 2017 image			carbon storage of Masson pine forests		
n+#0	均方根误差 Root 1	nean square error	年份	回归方程	
时 <del>期</del> – Period	校正前	校正后	Year	Regression equation	
	Before correction	After correction	2003	$C_{2003} = 0.006e^{(16.4086 \text{CNDVI}_{2003} + 1.1428)}$	
2003 —2017	0.1704	0.1354	2010	$C_{2010} = 0.006e^{(15.1667 \text{GNDVI}_{2010} + 1.5821)}$	
2010 —2017	0.1542	0.1110	2017	$C_{2017} = 0.006e^{14.357 \text{GNDVI}_{2017}}$	

根据区域碳储量数值分布范围,将碳储量划分为 0—10 t/hm<sup>2</sup>、10—20 t/hm<sup>2</sup>、20—30 t/hm<sup>2</sup>、30—40 t/hm<sup>2</sup>、40—50 t/hm<sup>2</sup>、>50 t/hm<sup>2</sup>这 6 个等级进行统计,得到马尾松林地上林木碳储量等级分布专题图(见图 3)。

2.3 马尾松林地上林木碳储量的时空分异特征

2.3.1 马尾松林地上林木碳储量的时间分异特征

河田镇马尾松林地上林木碳储量统计结果见图 4。2003、2010 及 2017 年地上林木碳储量分别为



图 3 2003—2017 年马尾松林地上林木碳储量分布图 Fig.3 Aboveground forest carbon storage of Masson pine forests from 2003 to 2017

8.24 t/hm<sup>2</sup>、11.34t/hm<sup>2</sup>、16.14 t/hm<sup>2</sup>,整体呈上升趋势。

分别对 2003、2010 及 2017 年马尾松林各等级地上 林木碳储量像元数进行统计,由表 8 可知,2003—2017 年地上林木碳储量在 0—10 t/hm<sup>2</sup>的林分面积不断减 少,地上林木碳储量大于 10t/hm<sup>2</sup>的林分面积不断增 加。2010 年地上林木碳储量在 0—10 t/hm<sup>2</sup>的区域比 2003 年减少了 7.43 个百分点;2017 年地上林木碳储量 在 0—10 t/hm<sup>2</sup>的区域比 2010 年减少了 27.84 个百分 点。2010 年地上林木碳储量在 10—20 t/hm<sup>2</sup>、20—30 t/hm<sup>2</sup>、30—40 t/hm<sup>2</sup>、40—50 t/hm<sup>2</sup>和>50 t/hm<sup>2</sup>的区域 比 2003 年分别增加了 3.45、1.68、0.71、0.34 和 1.25 个 百分点;2017 年地上林木碳储量在 10—20 t/hm<sup>2</sup>、20— 30 t/hm<sup>2</sup>、30—40 t/hm<sup>2</sup>、40—50 t/hm<sup>2</sup>和>50 t/hm<sup>2</sup>的区域 域比 2010 年分别增加了 17.28、6.05、2.77、1.07 和 0.67 个百分点。

#### 2.3.2 马尾松林地上林木碳储量的空间分异特征

由图 5 可知,2003 年、2010 年和 2017 年马尾松林



图 4 2003—2017 年马尾松林地上林木碳储量变化图 Fig.4 Change of aboveground forest carbon storage for Masson pine forests from 2003 to 2017

地上林木碳储量在海拔<300m的区域碳储量最少、在海拔>500m的区域碳储量最大,碳储量随海拔的升高而 增加。2003—2010年,各海拔梯度上地上林木碳储量增长率分别为107.82%、59.94%、27.92%、37.78%、 26.08%、5.77%和-9.90%;2010—2017年,各海拔梯度上地上林木碳储量增长率分别为123.22%、84.35%、 34.26%、16.51%、20.44%、24.85%和21.16%,整体表现出随海拔增加碳储量增长率降低的特征。

由图 6 可知,2003 年、2010 年和 2017 年马尾松林地上林木碳储量在坡度 0—5°的区域碳储量最少、在坡度>45°的区域碳储量最大,碳储量随坡度的增加而增加。2003—2010 年间,各坡度地上林木碳储量增长率分别为 53.71%、46.09%、37.99%、25.94%、16.36%、14.56%;2010—2017 年,各坡度地上林木碳储量增长率分别为 81.52%、70.27%、41.86%、28.51%、8.31%、4.27%,表现出随坡度增加碳储量增长率降低的特征。

图 7 表明,向阳坡(67.5°-247.5°)碳储量高于背阴坡(0-67.5°,247.5°-360°)。2003-2010年间,向阳

坡和背阴坡地上林木碳储量增长率分别为 35.06%、53.96%;2010—2017 年间,向阳坡和背阴坡地上林木碳储 量增长率分别为 28.02%、119.39%,表现出背阴坡地上林木碳储量增长率高于向阳坡。

Table 8       2003—2017       Masson pine forests aboveground forest carbon storage classification statistics table						
碳储量 Carbon storage/ (t/hm <sup>2</sup> )	2003		2010		2017	
	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%	面积 Area/hm <sup>2</sup>	比例 Ratio/%
(0,10]	11548.17	80.35	10480.14	79.92	6479.37	45.08
(10,20]	1236.78	8.61	1733.04	12.06	4216.86	29.34
(20,30]	575.28	4.00	816.12	5.68	1685.07	11.72
(30,40]	312.03	2.17	414.18	2.88	811.98	5.65
(40,50]	221.85	1.54	270.81	1.88	424.08	2.95
>50	478.62	3.33	658.44	4.58	755.37	5.26







Fig.5 Aboveground forest carbon storage and aboveground forest carbon storage growth rate of Masson pine forests at different altitudes

#### 3 结论与讨论

本研究以长汀县河田镇马尾松林为研究对象,基于 2017 年 Landsat 8 OLI 遥感影像,充分提取与碳储量潜 在相关的信息,构建马尾松林地上林木碳储量遥感反演模型,并基于伪不变特征原理的线性归一化法(PIF) 实现该遥感反演模型在 2003 年、2010 年 Landsat 5 TM 影像上的适用性校正转换。实现对长汀县河田镇马尾 松林地上林木碳储量的遥感估测和时空分异特征研究。

2017 年遥感估算的平均碳储量值与研究布设的 42 个样地实测碳储量平均值接近,表明研究构建的遥感 模型对碳储量的估算结果具有可靠性。2003、2010、2017 年长汀县河田镇马尾松林地上林木碳储量超过 50 t/ hm<sup>2</sup>的面积分别占 3.33%、4.58%、5.26%,表明了以河田镇为代表的南方水土流失区虽然森林覆盖度恢复显 著,但林木生长质量并不佳、森林碳汇功能的发挥仍较弱,这与刘政等<sup>[3]</sup>的研究结果大体一致。2010—2017 年这 7 年间各级碳储量变化幅度大于前 7 年,说明研究区在水土流失治理工作中采取的封山育林、种植水保 林草及低效林改造等措施是成功的。

研究区马尾松林碳储量空间分布与海拔、坡度、坡向的空间分布密切相关。马尾松林碳储量随海拔升高 而增加,这一结果与黄绍霖<sup>[30]</sup>的研究结果大体一致。海拔变化间接造成局地气候条件变化,且随海拔增高人 为干扰强度减小,马尾松分布相对密集,而低海拔区除人类活动频繁外,地面原生植被覆盖较少,多以补植的



图 6 不同坡度等级马尾松林地上木碳储量碳及储量增长率

Fig.6 Aboveground Carbon storage and aboveground carbon storage growth rate of Masson pine forests at different slope







幼龄林为主,林分固碳能力差。平均碳储量增长率随海拔升高而降低,产生这种空间分异规律的原因可能是: 低海拔区域生态治理强度大,马尾松林生长快速,高海拔区域多以封山育林为主,且部分结构不合理、立地质 量差的林分存在倒退的可能。马尾松林地上林木碳储量随着坡度增加而增加,分析原因可能有两方面:一方 面是坡面增加了林冠层接受光照的面积,有利于马尾松林木的生长和吸收固定 CO<sub>2</sub>;另一方面,与人类活动密 不可分,随坡度上升,虽然土壤养分流失增多,但森林采伐利用难度也增加,人为干扰活动较少,使得这部分马 尾松林分生长健康稳定。碳储量增长率随坡度升高而降低,主要原因可能是早期水土流失治理主要选择在森 林覆盖较低、生长质量较差的缓坡区,该部分区域补植造林强度较大,随着树木生长到一定年龄,生物量碳储 量会显著增加,而陡峭区域更多采取封山育林等保护政策,自然更新能力低于人为治理下林木生长更新。向 阳坡的马尾松地上林木碳储量高于背阴坡,主要原因可能有两方面;一是河田镇位于北半球,向阳坡受到的太 阳辐射强度和日照时长远高于背阴坡,且马尾松具有喜光喜温的特性,光照充足的条件有利于马尾松生长和 干物质的积累;二是在水、肥、气、热的影响下,阳坡和半阳坡土壤养分和土壤碳储量的积累增强了马尾松生长 能力,同时,山地不同坡向迎风、背风效果不同,迎风坡容易造成地形雨,局部降水分配强度不同也会影响马尾 松碳储量的积累。背阴坡碳储量增长率远高于向阳坡,产生这种背阴坡碳储量总值低但增长率高的原因可能 和水土流失治理密不可分,补植的马尾松处于生长初期,胸径、树高在一定年龄内生长较快,而随着年龄的增

http://www.ecologica.cn

长,马尾松生长速度会减缓至平稳状态。

本研究的研究对象为马尾松地上乔木层部分的碳储量,未进一步考虑林下芒萁对碳储量的影响。在选择 植被指数作为遥感反演模型自变量时,虽然参考了前人研究中能有效区分芒萁和马尾松的光谱信息,但尚未 实现芒萁和马尾松的剥离,而研究时段内林下芒萁覆盖度的变化,可能会对模型反演的结果产生误差。因此, 可以考虑从像元尺度剥离芒萁的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] 袁再健,马东方,聂小东,廖义善,黄斌,卓慕宁.南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展.土壤学报,2020,57(1):12-21.
- [2] 谢锦升,杨玉盛,解明曙.亚热带花岗岩侵蚀红壤的生态退化与恢复技术.水土保持研究, 2004, 11(3): 154-156.
- [3] 刘政,许文斌,田地,葛志强,刘骏,胡亚林.南方红壤严重侵蚀地不同恢复年限马尾松人工林生态系统碳储量特征.水土保持通报, 2019,39(1):37-42.
- [4] 徐凯健,曾宏达,任婕,谢锦升,杨玉盛.亚热带典型红壤侵蚀区人类活动对植被覆盖度及景观格局的影响.生态学报,2016,36(21): 6960-6968.
- [5] 张灿, 徐涵秋, 张好, 唐菲, 林中立. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估——以福建省长汀县为例. 自然资源 学报, 2015, 30(6): 917-928.
- [6] 涂成悦,龙贺兴,刘金龙.森林景观恢复视角下的福建长汀水土流失治理经验.林业经济,2016,38(3):14-18.
- [7] 汪燕明. 开化县森林碳储量测算与碳平衡能力分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [8] 张春华,王莉媛,宋茜薇,陈晓凤,高慧,王希群. 1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化.中国环境科学,2018,38(12): 4678-4686.
- [9] 张仕山,朱雄斌,汪小钦.基于年际 Landsat 系列数据的长汀县水土流失治理区植被恢复监测.长江科学院院报, 2020, 37(4):43-49.
- [10] 林培治. 福建长汀水土流失区马尾松种群动态及其机制研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [11] 杨贤宇,李守中,宋铁燕,王从容,刘聪,吴语嫣,宁秋蕊,姜良超.长汀侵蚀退化区砍伐迹地马尾松种群动态.生态学报,2018,38(9): 3175-3182.
- [12] 续珊珊.森林碳储量估算方法综述.林业调查规划, 2014, 39(6): 28-33.
- [13] 王雪军. 基于多源数据源的森林资源年度动态监测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [14] Fauzi N, Hambali K, Nawawi S A, Busu I, Yew S K. Biomass and carbon stock estimation along different altitudinal gradients in tropical forest of Gunung Basor, Kelantan. Malayan Nature Journal, 2017, 69(1): 57-62.
- [15] 覃连欢. 广西森林植被碳储量及价值估算研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [16] 黄绍霖,徐涵秋,林娜,曾宏达,刘智才,陈文惠,王琳,杨冉冉.亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算——以长汀河田盆地为例.生态学报,2013,33(10):2992-3001.
- [17] 陈淑桂. 水土流失治理区马尾松林生物量遥感研究 [D]. 福州: 福建师范大学, 2011.
- [18] 张振,金国庆,周志春,孙林山.马尾松广东种源与湖北种源的人工林生物量分配差异.浙江农林大学学报,2019,36(2):271-278.
- [19] 朱佳,黄志宏,陈振雄,孙华.马尾松生物量影响因素的通径分析.中南林业科技大学学报,2016,36(8):88-95.
- [20] Saraev V, Valatin G, Peace A, Quine C. How does a biodiversity value impact upon optimal rotation length? An investigation using species richness and forest stand age. Forest Policy and Economics, 2019, 107:1-11.
- [21] 项佳, 余坤勇, 陈善沐, 吴清泉, 刘健, 陈昌雄. 长汀红壤侵蚀区马尾松林生物量估算模型的构建. 东北林业大学学报, 2019, 47(5): 58-65.
- [22] 吴语嫣,李守中,孙眭涛,杨贤宇,黄思彤,王凯.长汀水土流失区侵蚀劣地马尾松种群动态.生态学报,2019,39(6):2082-2089.
- [23] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [24] 曾宏达,徐涵秋,谢锦升,黄绍霖,陈文惠. 红壤侵蚀区马尾松林碳储量估算的遥感植被指数选择——以长汀河田地区为例. 地理科学, 2014,34(7):870-875.
- [25] 韩婷婷, 习晓环, 王成, 王方建, 万怡平. 基于 TM 数据的西双版纳地区森林叶面积指数反演. 遥感信息, 2014, 29(2): 26-30.
- [26] 傅银贞, 汪小钦, 江洪. 马尾松 LAI 与植被指数的相关性研究. 国土资源遥感, 2010, 22(3): 41-46.
- [27] Testa S, Soudani K, Boschetti L, Mondino B. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 64: 132-144.
- [28] 王莉雯, 卫亚星. 植被氮素浓度高光谱遥感反演研究进展. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2823-2827.
- [29] 刘婧怡,汤旭光,常守志,贾明明,董张玉,邵田田,丁智.森林叶面积指数遥感反演模型构建及区域估算.遥感技术与应用,2014,29 (1):18-25.
- [30] 黄绍霖.亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算及其时空变化分析[D]. 福州:福州大学, 2015.