

DOI: 10.5846/stxb201807281610

巫明焱,董光,王艺积,熊瑞东,李悦,程武学,付志奎,范曙峰.川西米亚罗自然保护区森林地上碳储量遥感估算.生态学报,2020,40(2):621-628.  
Wu M Y, Dong G, Wang Y J, Xiong R D, Li Y, Cheng W X, Fu Z X, Fan S F. Estimation of forest aboveground carbon storage in Sichuan Miyaluo Nature Reserve based on remote sensing. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 621-628.

## 川西米亚罗自然保护区森林地上碳储量遥感估算

巫明焱<sup>1,2</sup>, 董光<sup>1,3</sup>, 王艺积<sup>1,3</sup>, 熊瑞东<sup>1,3</sup>, 李悦<sup>4</sup>, 程武学<sup>1,3,\*</sup>, 付志奎<sup>5</sup>, 范曙峰<sup>6</sup>

1 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101

2 成都理工大学地学空间信息技术国土资源部重点实验室, 成都 610059

3 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610068

4 四川省林业勘察设计研究院, 成都 610084

5 四川师范大学生命科学学院, 成都 610068

6 江苏省常州市武进区林业工作站, 常州 213159

**摘要:**研究米亚罗自然保护区的森林地上碳储量,有利于掌握高山峡谷区森林植被碳储量的分布特点,对区域森林资源的有效科学管理和维护森林生态环境具有重要意义。通过对保护区内的7个主要树种分别构建模型来初步估测森林地上碳储量,利用实地调查的样地数据与同期 Landsat 8 遥感卫星影像,得到波段信息、植被指数、主成分分析、纹理特征、地形因子、植被生长六大类共80个因子,用以构建乔木层不同树种地上碳储量的多元线性逐步回归模型,而灌木层的碳储量则由生物量密度法估算得出。研究结果表明:①模型预测值与实测值相关系数在0.675—0.775之间,精度较高,预测结果可靠;②米亚罗自然保护区森林地上碳储量为5.861 Tg,其中乔木层5.632 Tg,灌木层0.229 Tg。云冷杉林是研究区分布最广的林分类型,其碳储量为5.098 Tg,占森林地上碳储量总量的86.98%,在维持区域碳平衡方面发挥着重要作用。③研究区森林平均碳密度为53.138 t/hm<sup>2</sup>,其中冷杉的碳密度最高,达到74.467 t/hm<sup>2</sup>。④区域内森林地上碳储量以杂谷脑河流域及支流为中心,以一定缓冲距离呈树枝状发散分布,海拔3000—4000 m区域的森林植被碳储量最大,且阴坡的碳储量明显高于阳坡。

**关键词:**Landsat 影像;碳储量;生物量;多元回归;空间分布

## Estimation of forest aboveground carbon storage in Sichuan Miyaluo Nature Reserve based on remote sensing

WU Mingyan<sup>1,2</sup>, DONG Guang<sup>1,3</sup>, WANG Yiji<sup>1,3</sup>, XIONG Ruidong<sup>1,3</sup>, LI Yue<sup>4</sup>, CHENG Wuxue<sup>1,3,\*</sup>, FU Zhixi<sup>5</sup>, FAN Shufeng<sup>6</sup>

1 The Institute Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China

2 Laboratory of earth-science spatial information technology of Ministry of Land and Resources of P.R. China, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

4 Sichuan Forestry Exploration and Design Research Institute, Chengdu 610084, China

5 College of Life Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

6 The Forestry Workstation of Wujin District, Changzhou 213159, China

**Abstract:** The Miyaluo Nature Reserve is an important carbon sequestration region in Western Sichuan. Study of aboveground forest carbon storage in Miyaluo Nature Reserve is necessary for elucidating the distribution characteristics of forest vegetation carbon storage in alpine gorge areas. Furthermore, it is of great significance to the scientific management of

基金项目:四川省科技厅应用基础项目(2017JY0155);四川省中医药管理局重大专项(2018PC005)

收稿日期:2018-07-28; 网络出版日期:2019-11-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cwx714826@163.com

forest resources and the maintenance of forest ecological environments in the nature reserves. In this study, carbon storage models were established for seven main tree species to estimate the carbon storage on forest land. Firstly, 897 samples were obtained from a field survey, and sample biomass and carbon storage were calculated based on the volume-derived biomass method. Secondly, Landsat 8 satellite remote sensing data were used to obtain image characteristics of forest vegetation. Thirdly, combined with forest survey data, 80 factors were determined that were classified into six categories (band information, vegetation index, principal component analysis, texture features, topographic factors, and vegetation growth). Moreover, the correlation between these factors and the biomass of different tree species was analyzed, according to the order of Pearson's correlation coefficient, the significant correlation factors were then introduced into the multiple linear stepwise regression equation as independent variables, and the estimation models of aboveground carbon storage of different tree species in the tree layer were established. Finally, the aboveground carbon storage of the arbor layer was calculated by the estimation model, and the carbon storage in the shrub layer was calculated using the average biomass density method. The results showed that ① the accuracy of models for carbon storage estimation was within the margin of error, and the correlation coefficient between the measured value and the predicted value of the model was 0.675—0.775. ② The total carbon storage in the forest in the Miyaluo Nature Reserve was 5.861 Tg, of which the aboveground carbon storage in the arbor layer was 5.632 Tg, and the carbon storage in the shrub layer was 0.229 Tg. The order of the aboveground carbon storage of the prominent species was *Abies fabri* > *Picea asperata* > *Tsuga chinensis* > *Larix gmelimi* > *Quercus acutissima* > *Betula chinensis* > *Pinus tabulaeformis* > *Pinus armandi*; The total carbon storage of fir trees was 5.098 Tg, accounting for 86.98% of the aboveground carbon storage in the study area. The spruce-fir forest was the most widely distributed forest type in the Miyaluo Nature Reserve, and it played an important role in maintaining the carbon balance. ③ The average carbon density in the forest in Miyaluo Nature Reserve was 53.138 t/hm<sup>2</sup>, and the carbon density of Chinese fir species was higher than the average. The carbon density of fir was much higher than that of other tree species and was 74.467 t/hm<sup>2</sup>. ④ The spatial distribution characteristics of aboveground forest carbon storage in the study area were obtained by overlapping the Digital Elevation Model (DEM) with carbon storage. Taking the Zagunao River and its tributaries as the center, the carbon storage spatial distribution data were extended to the surrounding area by a given buffer distance in the whole region, similar to arborization. The largest area of forest vegetation carbon storage was distributed in regions with elevation of 3000—4000 m. The aboveground carbon storage on shady slopes was higher than that on sunny slopes.

**Key Words:** Landsat image; carbon storage; biomass; regression; spatial distribution

森林作为陆地生态系统的主体,是地球上最大的碳库,它不仅具有调节区域生态环境的功能,还在维持全球碳平衡方面发挥着重要作用<sup>[1-4]</sup>。随着全球气候变暖,森林生态系统对气候的影响成为了研究焦点,森林植被碳储量的相关研究不断拓展,研究的广度和深度也逐渐提升<sup>[5-6]</sup>。遥感与 GIS 技术以其快速、经济、方便等特点,逐渐显现出极大的优势<sup>[7-9]</sup>。美国 Landsat、法国 SPOT 等中高分辨率遥感影像的获取,以及森林资源连续清查数据的逐步完善,为森林植被碳储量遥感估算与动态监测奠定了基础<sup>[10]</sup>。

众多学者在运用遥感技术估算植被碳储量方面做了大量研究。Foody 等<sup>[11]</sup>利用神经网络和多元线性回归的方法建立热带森林研究站点生物量估算模型,并探究该估算模型的区域可转移性。Fauzi 等<sup>[12]</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,探究碳储量在不同海拔梯度上表现出的显著变化。覃连欢<sup>[13]</sup>使用生物量换算因子法估算广西省森林植被的碳储量,研究了不同林龄结构树种的碳储量和碳密度特征。黄绍霖等<sup>[14]</sup>将马尾松林的实测数据与 ALOS 遥感影像的植被光谱信息进行比较,得出了长汀河田盆地马尾松林碳储量反演模型。徐丽华等<sup>[15]</sup>基于 Quickbird 高分辨率遥感影像对浙江省义乌市城区的林地碳储量进行遥感估测,精度比较理想。总结已有研究,国内外对森林植被碳储量研究的理论技术逐渐成熟并不断深入,研究的方法不断改进和优化,基于遥感技术估算生物量或者碳储量主要应用于大空间尺度下,对研究区

内的所有林木进行较为笼统的建模。但森林植被类型复杂多样,区域特征明显,不同类型植被的固碳能力及碳储量存在差异。针对此问题,本研究充分考虑不同类型植被的差异性,将建模对象细化,使模型的估测结果更加科学可靠。

米亚罗自然保护区作为川西地区典型的高山峡谷地貌区,域内植被茂盛,森林覆盖率高,是川西地区重要的固碳场所<sup>[16]</sup>。探究该区域的森林地上碳储量及其分布特征,对维护岷江上游高山峡谷区的森林结构和生态环境具有重要意义。本研究采用遥感卫星影像与实地调查数据相结合的方法,提取表征森林植被生物量的建模因子,对保护区内的冷杉、云杉、落叶松等 7 个主要树种分别构建关于碳储量的多元线性逐步回归模型,进而计算得出保护区森林地上碳储量。利用 GIS 技术将碳储量进行空间化表达,分析其不同海拔、不同坡向的空间分布特征,为研究区的生态环境保护及森林可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

米亚罗自然保护区隶属四川省阿坝藏族羌族自治州理县,介于 31°24′—31°55′ N、102°35′—103°04′ E 之间,地处川西北高原东南边缘,是青藏高原向四川盆地过渡地带,位于龙门山断裂带中段,地势西北高东南低,平均海拔 2700 m,平均坡度 30°—40°,是典型的高山峡谷地貌,地理位置如图 1。区内气候类型属川西山地季风气候,日照强烈,寒冷干燥,多大风<sup>[16]</sup>,降水集中在 5—10 月,年降水量 700—1000 mm,年蒸发量 1000—1900 mm。年均气温 6—9 °C<sup>[17]</sup>。保护区内植被覆盖面积达 90%,森林覆盖率 75%<sup>[18]</sup>,是岷江上游支流及杂谷脑河谷地带重要的生态屏障。据《四川米亚罗自然保护区科学考察报告》统计,保护区内的植物共计 181 科 576 属 1546 种,其中冷杉、云杉、油松、落叶松等主要树种分布广泛,生长良好。本研究中涉及的油松、华山松、落叶松、冷杉、云杉、铁杉、桦木共 7 个树种涵盖了研究区全部主要树种,其覆盖面积约为 87124.98 hm<sup>2</sup>,占研究区森林面积的 95.13%。

### 1.2 数据来源与预处理

本研究所用数据主要来源于四川省林业勘察设计研究院的森林资源二类调查数据和 2013 年米亚罗自然保护区林地变更调查数据,遵循典型和随机抽样的原则,在 1:50000 的地形图上以 1 km×1 km 的间距布设样地,样地的面积大小为 30 m×30 m<sup>[19]</sup>。选取 7 个主要树种的样地共计 897 块,其中油松 77 块,华山松 59 块,冷杉 234 块,云杉 199 块,铁杉 104 块,落叶松 112 块,桦木 112 块。

研究区遥感数据为 Landsat 8 OLI\_TIRS 卫星影像,成像时间 2013 年 8 月 1 日,影像质量好,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。依据 SRTM1 高程数据、实测 GPS 经纬度坐标,对影像进行几何校正与地形校正,在辐射定标与大气校正等处理后,裁剪出米亚罗自然保护区的遥感影像。

### 1.3 样本生物量估算

本研究选取自然保护区内的冷杉、云杉、油松等主要树种作为研究对象,调查样地共计 897 块,随机选取每一树种样地的 75% 用于碳储量估算模型的构建,余下 25% 的样地用于精度验证。样本生物量的估算依据样本数据的平均胸径和树高,采用四川省二元材积表计算各树种的材积,并计算树种的单位蓄积量,然后选取乘幂曲线模型计算各样本的生物量<sup>[20]</sup>,如表 1。

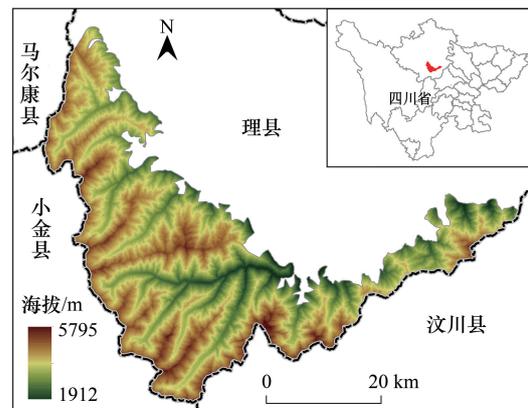


图 1 米亚罗自然保护区地理位置示意图

Fig.1 The location of Miyalu Natural Reserve

表 1 各树种样地生物量估算模型及碳储量转换系数

Table 1 The biomass estimation model and carbon storage conversion coefficient of different species

林分类型 Stand type	树种 Species	蓄积量-生物量估算模型 Biomass estimation model	转换系数/% Conversion coefficient
云冷杉 Spruce-fir	冷杉	$Y = 2.137V0.7532$	50.50
	云杉		51.60
	铁杉		50.00
松类 Pine	落叶松	$Y = 0.5272V1.0793$	52.59
	油松		53.14
	华山松		54.37
软阔 Soft broadleaved	桦木	$Y = 2.1529V0.6085$	49.38

表中  $Y$  表示地上生物量 ( $T_g$ ),  $V$  表示树种蓄积量 ( $m^3/hm^2$ )

#### 1.4 乔灌木碳储量估算

研究利用 Landsat 8 卫星遥感数据获取研究区森林植被的影像特征参数,结合地面实地的森林调查数据,得到波段信息、植被指数、主成分分析、纹理特征、地形因子、植被生长六大类共 80 个因子,如表 2 所示。利用 GIS 技术提取出遥感影像的波段信息因子 7 个,波段运算得到植被指数因子 9 个,再运用灰度共生矩阵方法提取出纹理特征 8 个。通过对主成分分析运算结果及特征窗口,选取特征值较大第一、第二、第三主成分用于建模。植被郁闭度数据来源于森林资源二类清查变更数据,植被覆盖度则是采用基于像元二分模型的遥感估算方法计算所得。针对每一树种进行建模因子相关性分析得出相关程度较高的因子,采用多元线性逐步回归的方法构建乔木层主要树种的生物量估测模型,再参考黄从德<sup>[20]</sup>对该区域不同树种生物量与碳储量转换系数(表 1)的研究,构建各主要树种的地上碳储量估算模型,从而计算出森林乔木层地上碳储量。

米亚罗自然保护区灌木层优势树种为灌状栎等,本研究利用植被平均生物量密度方法估算其生物量及其碳储量<sup>[21]</sup>。关于灌木单位面积生物量的计算方法较多<sup>[22-23]</sup>,以覃连欢<sup>[13]</sup>、李夏等<sup>[24]</sup>对灌木层森林植被碳储量的估算结果作为参考,森林灌木碳密度为  $9.88 t/hm^2$ 。

表 2 建模因子表

Table 2 The factors of establishing the mode

因子类型 Types of factors	因子 Factors	简写 Abbreviation	因子类型 Types of factors	因子 Factors	简写 Abbreviation
波段信息 Band information	原始波段 1—7	$B_{1-7}$	主成分因子 Principal component	第一、第二、第三主成分	$PC_{1-3}$
纹理特征 Texture feature	均值	$M_{1-7}$	植被指数 Vegetation index	比值植被指数	RVI
	方差	$V_{1-7}$		归一化植被指数	NDVI
	熵	$E_{1-7}$		增强型植被指数	EVI
	对比度	$Con_{1-7}$		差值植被指数	DVI
	相关性	$Cor_{1-7}$		垂直植被指数	PVI
	相异性	$D_{1-7}$		转换型植被指数	TVI
	均一性	$H_{1-7}$		湿度植被指数	WVI
	角二阶矩	$S_{1-7}$		绿度植被指数	GVI
地形因子 Topography	坡度	Slope	亮度植被指数	BVI	
	坡向	Aspect	植被生长 Vegetative growth	Cov	
	海拔	DEM	郁闭度	Den	

## 2 结果与分析

### 2.1 碳储量估算模型

在植被碳储量的遥感估测的模型构建中,常用到回归模型<sup>[25]</sup>。依据不同类型树种的样地生物量数据,分

别对 80 个建模因子进行相关性分析,再按 Pearson 相关系数的大小次序将因子逐一引入回归方程,并依次进行显著性检验,从而选取显著相关的因子作为模型的自变量,得到多元线性回归方程,最后依据米亚罗自然保护区各树种的生物量与碳储量的转换系数(表 2),构建出米亚罗自然保护区乔木层主要树种的地上碳储量估算模型,如表 3 所示。

表 3 各树种地上碳储量估算模型

Table 3 Estimation model of aboveground carbon storage in different tree species

林分类型 Stand type	树种 Species	地上碳储量估算模型 Aboveground carbon storage estimation model
云冷杉 Spruce-fir	冷杉	$W = 0.741 \times \text{Den} + 78.023 \times \text{EVI} - 0.253 \times \text{Slope} - 5.280 \times \text{Cor}_3 - 12.328 \times M_3 + 8.434 \times M_4 + 68.663$
	云杉	$W = 0.459 \times \text{Den} + 0.023 \times \text{DEM} - 10.452 \times \text{Con}_7 - 39.308$
	铁杉	$W = 0.433 \times \text{Den} - 0.011 \times \text{DEM} + 102.478 \times S_5 + 0.672 \times M_5 + 98.222$
松类 Pine	落叶松	$W = 0.462 \times \text{Den} - 14.743 \times \text{Cor}_3 + 14.573 \times \text{Cor}_5 - 171.665 \times PC_2 - 0.403 \times \text{Slope} + 70.015$
	油松	$W = 89.482 \times M_1 + 44.520 \times H_6 + 18.050 \times E_6 + 0.242 \times \text{Den} - 116.436$
	华山松	$W = 45.188 \times M_1 - 11.907 \times M_4 - 9.031 \times V_4 + 75.852 \times PC_2 - 6.905$
软阔 Soft broadleaved	桦木	$W = -250.197 \times \text{WVI} - 0.011 \times \text{DEM} + 0.225 \times \text{Den} + 22.973 \times V_4 + 57.884$

## 2.2 模型精度检验

随机选取每一树种样地数据的 75% 用于各树种地上碳储量估算模型的构建,余下 25% 的作为实测值用于模型的精度检验。通过计算模型预测值与实测值的相关系数指标对碳储量估测模型进行精度评价。从表 4 中可以看出,各树种地上碳储量估算模型的预测值与实测值相关系数介于 0.675—0.775 之间,相关系数较高,且均值的标准误差较小,表明模型精度较高,预测结果可靠。

表 4 模型精度检验结果

Table 4 Accuracy test results for each model

模型 Model	标准差 Standard deviation	均值的标准误差 Standard error	相关系数 Coefficient of association
油松 Chinese Pine	11.527	2.578	0.767
落叶松 Larch	25.128	4.749	0.706
华山松 Huashan Pine	10.169	2.626	0.753
冷杉 Fir	14.392	1.890	0.775
云杉 Spruce	26.178	3.702	0.675
铁杉 Hemlock	10.843	2.127	0.703
桦木 Birch	10.563	1.996	0.659

## 2.3 森林地上碳储量

根据模型计算出米亚罗自然保护区各优势树种的地上碳储量,对比其碳储量分布情况,得出该区域碳储量的总值,如表 5 所示。米亚罗自然保护区森林植被生长良好,固碳效果显著,乔木层地上碳储量为 5.632 Tg,灌木层植被碳储量为 0.229 Tg,自然保护区森林植被地上碳储量总量为 5.861 Tg,其中杉类的固碳效果最好,碳储量达 5.098 Tg,占总量的 86.98%。保护区内冷杉的分布最广,面积达 49928.248 hm<sup>2</sup>,其碳储量为 3.718 Tg,占比 63.44%。从碳密度上看,杉类树木远高于其他树种,其中冷杉的碳密度达 74.467 t/hm<sup>2</sup>,为各树种最高。米亚罗自然保护区优势树种地上碳储量的大小顺序是:冷杉>云杉>铁杉>落叶松>灌状栎>桦木>油松>华山松,这除了与各树种的固碳能力有关系外,还与各树种的分布面积有很大的关系。

## 2.4 碳储量空间分布特征

米亚罗自然保护区位于杂谷脑河流域,森林植被有着良好的生长环境。根据碳密度的大小将米亚罗自然保护区森林植被分为 ≤15、15—30、30—45、45—60 和 ≥60 五个等级,依次为低密度、较低密度、中等密度、较

高密度和高密度,各等级碳储量的森林植被空间分布状况如图 2 所示。保护区内人为活动少,森林植被群落结构稳定,保持了较原始的植被生长状况,主要生长在高山峡谷区域,因而森林植被碳储量的空间分布主要以杂谷脑河流域为中心,以一定缓冲距离向周围延展,整体贯穿全区域呈树枝状发散分布。高密度碳储量区域主要分布在距离河谷有一定距离的中间地带。

表 5 米亚罗自然保护区森林地上碳储量

Table 5 Statistics of forest aboveground carbon storage

林分类型 Stand type	树种 Species	面积 Area/hm <sup>2</sup>	碳储量 Carbon storage/Tg	碳密度 Carbon density/(t/hm <sup>2</sup> )
云冷杉 Spruce-fir	冷杉	49928.248	3.718	74.467
	云杉	19188.480	1.073	55.919
	铁杉	5697.116	0.307	53.887
松类 Pine	落叶松	5159.384	0.244	47.292
	油松	1892.261	0.092	48.619
	华山松	418.080	0.014	33.486
软阔 Soft broadleaved	桦木	4841.406	0.184	38.006
灌木 Shrub	灌状栎等	23172.660	0.229	9.880
总计 Total		110297.635	5.861	53.138

将米亚罗森林植被的碳储量分布与 DEM 数据进行叠加分析,可以分别得出不同海拔梯度和不同坡向的碳储量与碳密度值,如图 3 和图 4 所示。在垂直空间上,海拔 3000—4000 m 区域内的森林植被碳储量最大,占保护区森林地上碳储量总量的 80.81%。海拔 4000 m 以上的区域主要受积雪覆盖和气温的影响,植被长势差,固碳能力弱。海拔 3000 m 以下的区域森林植被保护较好,但范围较小,故碳储量较少。此外,坡向对森林植被碳储量的影响较为显著,阴坡的太阳辐射强度小于阳坡,地表水分蒸发较慢,土壤湿润,更有利于植被生长,植被碳储量也明显高于阳坡。阴坡、半阴坡的碳储量占森林地上碳储量总量的 68.77%,约为其他坡向的两倍。各坡向的森林植被碳密度差异相对较小,区别不明显。

### 3 结论与讨论

植被的碳储量值是衡量地区生态环境质量的重要指标。研究米亚罗自然保护区的森林碳储量,对岷江上游高山峡谷区森林结构的相关研究具有一定的参考价值。本研究利用 Landsat 8 卫星遥感数据获取研究区森林植被的影像特征参数,结合地面实地的森林调查数据,充分考虑不同植被之间的固碳能力及碳储量的差异性,将较为笼统的建模对象细化,对研究区内的冷杉、云杉、油松等 7 个主要树种分别建立估算碳储量的多元线性逐步回归模型,模型的预测值与实测值的相关系数在 0.675—0.775 之间,模型精度较高,碳储量估算结果可靠,其空间分布特征与已有的相关研究相符<sup>[20]</sup>。表明对小范围内不同树种分别构建模型估算碳储量精度更加准确,能更好的估算区域碳汇价值<sup>[26-27]</sup>,对米亚罗自然保护区的生态环境保护及森林可持续发展具有重要意义。

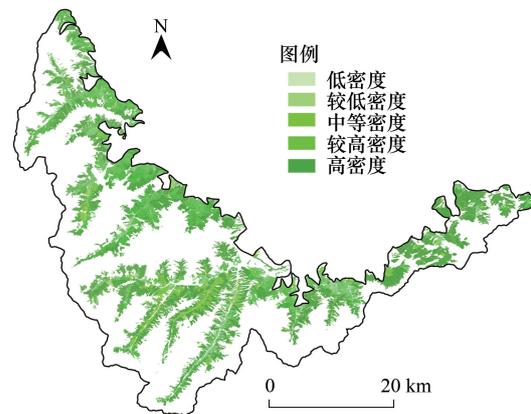


图 2 米亚罗自然保护区森林地上碳储量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of forest aboveground carbon storage

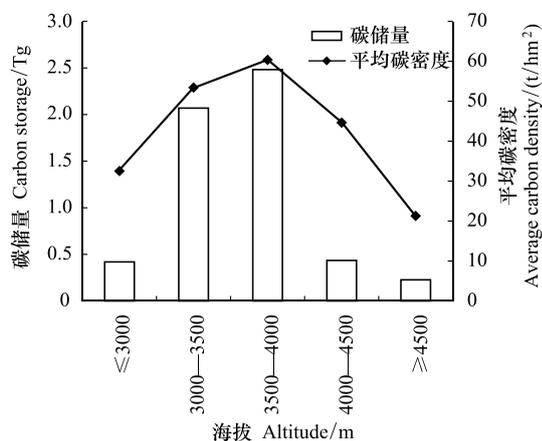


图3 不同海拔梯度的碳储量和碳密度

Fig.3 Carbon storage and carbon density at different altitudes

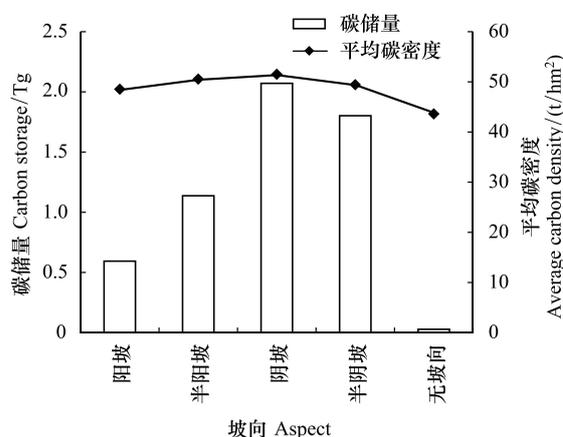


图4 不同坡向的碳储量和碳密度

Fig.4 Carbon storage and carbon density in each aspect

根据模型估算得出米亚罗自然保护区的森林地上碳储量为 5.861 Tg, 主要树种的地上碳储量大小顺序为:冷杉>云杉>铁杉>落叶松>灌状栎>桦木>油松>华山松。这除了树木本身的固碳能力影响外,还与各树种的分布面积具有很大关系,杉类树种的分布面积最广,碳储量最大,达 5.098 Tg,占森林地上碳储量总量的 86.98%。桦木、油松、华山松的分布较少,碳储量也受到一定限制。从碳密度上看,米亚罗自然保护区森林地上平均碳密度为 53.138 t/hm<sup>2</sup>。不同树种间差异较大,杉类树种碳密度都在平均水平以上,其中冷杉的碳密度更是远高于其他树种,达 74.467 t/hm<sup>2</sup>。

米亚罗自然保护区森林植被碳储量的空间分布主要以杂谷脑流域及支流为中心,以一定缓冲距离向周围延展,整体贯穿全区域并呈现树枝状发散分布,而高密度等级的碳储量主要分布于距离河谷地带有一定距离的中间区域,较高密度以上等级的区域分布较广,占保护区森林面积的 71.7%,表明区内林业生态保护工程效果良好,森林植被对区域生态环境的调节与保护起到了重要的作用。从不同海拔梯度上看,海拔 3000—4000 m 的区域固碳能力最强,森林植被碳储量最大,占保护区森林地上碳储量总量的 80.81%。从坡向上看,植被碳密度差异不大,阴坡、半阴坡的碳储量明显高于其他坡向,占森林地上碳储量总量的 68.77%。

遥感数据是重要基础数据,其成像时间、空间分辨率等因素的差异都会对研究结果产生一定的影响<sup>[28]</sup>。本研究使用的遥感数据为 Landsat 8 卫星影像,影像质量较好,空间分辨率为 30 m,能够在一定程度上表达出地表信息,但与地面的真实情况依然存在着较大差距。若协同高分资源卫星、WorldView 资源卫星数据、雷达数据等多源遥感数据,可以得到更加准确的地表植被信息,森林地上碳储量估算模型精度也将得到提升<sup>[2]</sup>。

目前的遥感技术仅能获取到地面表层信息,运用遥感估算法研究森林碳储量难以获得森林下层的植被信息。本研究中的森林地上碳储量仅包括活立木及灌木的碳储量,未能计算森林中的下木层、草本层、枯枝落叶层和土壤层等的碳储量。此外,植被生长的过程也是森林植被固碳能力变化的过程,由于缺乏相关连续的森林植被数据,本研究未能实现对森林植被地上碳储量的动态分析与变化趋势预测。构建基于树木生长过程/机理的模型,把握森林碳储量的累积过程与动态变化趋势,预测未来碳储量及森林固碳潜力,是深入研究的重要方向。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 刘金山,张万林,杨传金,杨帆. 森林碳库及碳汇监测概述. 中南林业调查规划, 2012, 31(1): 61-65.
- [ 2 ] 乌迪. 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变化[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.
- [ 3 ] Güner Ş Ç T, Çömez A, Özkan K. Predicting soil and forest floor carbon stocks in Western Anatolian Scots pine stands, Turkey. African Journal of Agricultural Research, 2012, 7(28): 4075-4083.

- [ 4 ] Schlamadinger B, Bird N, Johns T, Brown S, Canadell J, Ciccarese L, Dutschke M, Fiedler J, Fischlin A, Fearnside P, Forner C, Freibauer A, Frumhoff P, Frumhoff N, Kirschbaum M U F, Labat A, Marland G, Michaelowa A, Yamagata Y. A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto protocol and Marrakech accords. *Environmental Science & Policy*, 2007, 10(4): 271-282.
- [ 5 ] 林青山, 洪伟. 中国森林碳储量研究综述. *中国农学通报*, 2009, 25(6): 220-224.
- [ 6 ] 程武学, 杨存建, 周介铭, 周万村, 刘悦翠. 森林蓄积量遥感定量估测研究综述. *安徽农业科学*, 2009, 37(16): 7746-7750.
- [ 7 ] 程武学, 董光, 巫明焱, 何兰, 陈佳丽. 基于 3S 技术的四川省川红花资源适宜性空间分布研究. *中国中药杂志*, 2017, 42(15): 2939-2945.
- [ 8 ] 张锋. 基于遥感信息估测森林生物量的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003.
- [ 9 ] 孙文杰. 基于 TM 数据的森林植被碳储量变化研究——以宣城市为例[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [ 10 ] 张芳, 乌兰娜, 康海峰. 中高分辨率遥感影像在林业中的应用现状及其存在的问题. *内蒙古林业调查设计*, 2015, 38(3): 132-134.
- [ 11 ] Foody G M, Boyd D S, Cutler M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 463-474.
- [ 12 ] 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, Malaysia. *Malayan Nature Journal*, 2017, 69(1): 57-62.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 徐丽华, 张结存, 黄博, 王欢欢, 岳文泽. 基于 QuickBird 影像的城市森林碳储量遥感估测. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2787-2793.
- [ 16 ] 蒋欣. 川西米亚罗自然保护区景观多样性与生态系统服务功能研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [ 17 ] 郭宁. 川西米亚罗林区森林可持续状况和冷杉林特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [ 18 ] 郭宁, 邢韶华, 姬文元, 崔国发, 汪明, 薛樵, 蒋先敏. 川西米亚罗林区冷杉林群落特征与生态因子的关系. *生态学杂志*, 2010, 29(6): 1054-1060.
- [ 19 ] 郭焱, 周旺明, 于大炮, 周莉, 谷晓萍, 吴志军, 吴胜男, 王晓雨, 代力民. 长江上游天然林资源保护工程区森林植被碳储量研究. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(S1): 221-228.
- [ 20 ] 黄从德. 四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [ 21 ] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 傅伯杰. 中国主要灌丛植被碳储量. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 539-544.
- [ 22 ] 杨昆, 管东生. 森林林下植被生物量收获的样方选择和模型. *生态学报*, 2007, 27(2): 705-714.
- [ 23 ] 何列艳, 亢新刚, 范小莉, 高延, 冯启祥. 长白山林区林下主要灌木生物量估算与分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(5): 45-50.
- [ 24 ] 李夏. 基于森林资源二类调查数据的森林碳储量及其价值评价[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [ 25 ] 王淑君, 管东生. 神经网络模型森林生物量遥感估测方法的研究. *生态环境*, 2007, 16(1): 108-111.
- [ 26 ] 刘建泉, 李进军, 邸华. 祁连山森林植被净生产量、碳储量和碳汇功能估算. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 1-7.
- [ 27 ] 杨传金, 杨帆, 梅浩, 刘金山, 戴前石. 区域森林碳储量估算方法概述. *中南林业调查规划*, 2012, 31(3): 62-66.
- [ 28 ] 巫明焱, 董光, 税丽, 胡大川, 程武学, 范曙峰. 基于 Landsat 8 影像的济宁市春季主要作物种植面积变化监测. *江苏农业学报*, 2018, 34(3): 559-569.