

乌鲁木齐南山森林生物量和碳储量空间分布特征

李路^{1,2}, 常亚鹏^{1,2}, 许仲林^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学 资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 乌鲁木齐南山分布有大面积的雪岭云杉林, 探究其生物量和碳储量的空间分布特征, 能够为该地区碳储量的研究和森林生态系统管理提供依据。以 2015 年 4—5 月的 Landsat TM 遥感影像为主要数据源, 结合样地实测数据, 基于遥感统计模型法, 利用逐步回归法建立模型估算了乌鲁木齐南山雪岭云杉林的生物量。以此为基础, 分析了生物量的空间分布规律和碳储量的空间分布格局。结果表明: 生物量模型估算值与实测值的平均相对误差为 12.72%, 精度较高。雪岭云杉林的平均生物量为 91.21 t/hm, 生物量总量为 8.2×10^6 t, 山区生物量密度的分布总体呈现西南高、东北低的趋势。森林生态系统碳储量为 4.1×10^6 t, 平均碳密度为 45.61 t/hm, 山区及其周边的森林碳密度分布不均衡。研究表明, 乌鲁木齐南山生物量密度分布不均可能和人类活动有关, 且碳储量主要集中在中高密度等级。

关键词: 生物量; 碳储量; 回归模型; 空间分布特征

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0072-06

Spatial Distribution Characteristics of the Biomass and Carbon Storage of Forest in Nanshan Mountain, Urumqi

LI Lu^{1,2}, CHANG Yapeng^{1,2}, XU Zhonglin^{1,2}

(1. College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environmental Science, Urumqi 830046, China)

Abstract: Forest vegetation in Nanshan Mountain constitutes main part of the forest in Urumqi. The spatial distribution characteristics of the biomass and carbon reserve are explored in order to provide the basis for the sustainable forest ecosystem management in this area. Landsat TM remote-sensing images in April and May of 2015 were used to calculate the vegetation index. Coupling with fields measured biomass data, we constructed stepwise regression models to estimate the biomass *Picea schrenkiana* forest in Nanshan Mountain. We converted the biomass to carbon stocks in the study area. The results indicated that the average relative error between the estimated biomass and the measured value was 12.72%; the total biomass of forest ecosystem in Nanshan was 8.2×10^6 t, spatial pattern of biomass showed a trend of high in southwest and low in northeast; the total carbon reserve stock was 4.1×10^6 t with an average carbon density of 45.61 t/hm²; the spatial distribution of carbon showed the relative higher stock of carbon in mountainous areas. The study showed that the biomass density distribution may be related to human activities in Nanshan Mountain, and carbon stocks were mainly concentrated in medium and high density grades.

Keywords: biomass; carbon storage; regression model; spatial distribution characteristics

近年来,作为主要的温室气体,大气 CO₂ 浓度的升高导致全球气候变化加快,进而引起陆地生态系统结构和功能发生改变,生态系统的可持续发展面临严

峻挑战^[1]。因此,如何采取有效措施减缓和适应急剧变暖的气候条件,成为各国科学家和决策者共同关注的焦点问题。就减缓气候变化的策略而言,森林生态

系统也许能够发挥关键的作用,因为生态系统中森林植被的固碳量约占陆地植被总固碳量的 82.5%^[2]。因此,准确的估算森林生态系统的碳储量对于研究区域以及全球碳循环有重要的理论和实际意义^[3-4]。

植被碳库是森林生态系统碳储量的重要组成部分^[5]。植被碳库的碳储量可通过估算森林生物量来推算^[6]。估算森林生物量的方法有生物量模型(包括相对生长关系法和生物量—蓄积量法)^[7]、生物量估算参数法^[8]、3S 法^[9]等。一些学者通过上述方法建立生物量模型估算了我国不同森林的生物量,但是目前对大区域尺度的研究较多^[10],而对中等尺度定位研究相对较少,其相应的森林生物量和碳储量的获取方法也相对缺乏。

因此,本研究以乌鲁木齐南山雪岭云杉林为例,利用 2015 年野外实测样地的数据结合陆地卫星 TM 影像^[11],采用逐步回归分析的方法构建最优云杉林生物量遥感估算模型,估算该区域雪岭云杉林的生物量,并探究雪岭云杉林碳储量的空间分布特征。

1 基础数据

1.1 研究区概况

本研究位于乌鲁木齐县南山,其经纬度范围为 43°07′09″—43°27′42″N,87°04′30″—87°29′15″E,自南向北延伸 60 km^[12],总面积为 120 km²,属于山区气候,年降水量的 40%集中在 6—8 月份,平均降水量为 456 mm。南山北坡是森林的主要分布区,其森林的分布范围是海拔 1 500 m 到 2 800 m 的中低山区,林区中生长的乔木树种有 90%以上为雪岭云杉(*Piceas chrenkiana*)林。

1.2 数据采集与处理

采用样地数据为 2015 年 4 月至 5 月野外实测数据,共 40 个样地。野外采样工作中,选取海拔梯度连续的坡面,以 50 m 海拔高度为间隔,设置样地。每个样地选择一个中心,用激光测距仪测出半径 8 m 的样圆,用 GPS 定位每个样地中心点的海拔和经纬度,对样地的树木按顺序进行标记,统计株数,并记录树高和胸径。按照张绘芳等^[13]构建的雪岭云杉器官生物量模型(表 1)计算每株树木生物量,再按照样地面积求得样地总生物量。

表 1 森林生物量模型^[13]

序号	模型	模型参数			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
1	$w=a\times D^b\times H^c$	地上生物量	0.1273	2.1199	0.2604
2	$w=a\times D^b\times H^c$	树干生物量	0.02374	1.8674	0.9266
3	$w=a\times (D^3/H)^b$	树枝生物量	0.07946	0.9581	

2 遥感数据处理及地形与气候因子

2.1 遥感因子提取与处理

本研究采用的是 NASA 的 Landsat TM 数据,为保持影像信息和地面调查时间一致,本研究采用 2015 年 4—5 月的影像。野外样本采集区域覆盖 2 幅 TM 影像(行列号分别是 142 条带的 30 行和 143 条带的 30 行)。分别对两幅影像进行辐射定标和大气校正(FLAASH),将处理好的影像分别用乌鲁木齐县的矢量图进行裁剪并拼接。TM 影像共分 6 个波段,投影方式为 UTM/WGS84,空间分辨率为 30 m。本研究中取其中的 5 个原始波段(TM2, TM3, TM4, TM5, TM7),在 ArcGIS 下提取波段值作为模型建立的输入变量。

2.2 植被指数的计算和因子的提取

植物体中的色素、水分和结构有着特殊的光谱响应,因此可以利用植物多光谱遥感信息来获取植物的相关信息^[14]。植被指数作为植被特有光谱特征,是将可见光和近红外波段进行组合形成的能反映绿色植被生长状况和分布的特征指数^[15]。与单波段值估算生物量相比,利用植被指数监测生物量的准确性更高。本研究运用 ENVI 的波段运算功能计算常用的植被指数(表 2),并将植被指数和原始波段进行线性或非线性变换得到新的参数^[16],依此对植被的生物量作进一步的分析。

表 2 植被指数模型^[15]

序号	植被指数	模型
1	差值植被指数	$VI=DVI_4-A\times B_3$
2	归一化植被指数	$NDVI=(B_4-B_3)/(B_4+B_3)$
3	垂直植被指数	$PVI=(B_4-A\times B_3-B)/SQRT(1+A^2)$
4	比值植被指数	$RVI=B_4/B_3$
5	中红外植被指数	$VI_3=100\times (B_4-B_5)/(B_4+B_5)$

其中: B_3 为红光波段; B_4 为近红外波段; B_5 为红外波段; A 和 B 为经验系数; $A=0.969\ 16$; $B=0.084\ 726$ (参考 MSS 和 TM 的取值)^[22]。

利用 90 m 栅格分辨率的 SRTM—DEM 数据,对样地的坡度和坡向数据进行提取,并从 Worldclim 数据^[17]中提取样地的年均温度和年降水量数据,作为参与建模的地学和气候因子变量。通过 GIS 技术获取部分地学和气候因子参与生物量估算,可提高生物量估算的精度。

将波段值、植被指数值、地学和气候因子以及波段和植被指数的变换值共 19 个因子作为参与建立估算模型的变量。

2.3 生物量估算模型及误差评估

在 SPSS 22.0 中,以上述参数作为初始自变量,对初始自变量进行多重相关性分析,并计算各初始自变量与生物量之间的相关性,提取与生物量显著相关的自变量,采用逐步回归法建立森林生物量非线性估算模型。

由于预测模型对样本数据的拟合程度有限,实测值与估算值之间存在偏差^[18-19],因此需要通过计算预测误差来衡量估算模型的精度。在所有样地中,随机选取 27 个样地作为建模样本,剩余 13 个作为检验样本。模型检验过程中,本研究采用绝对误差(式 1)和相对误差(式 2)评估模型的精度估算:

$$\Delta = |x_{\text{估算}} - x_{\text{实测}}| \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{|x_{\text{估算}} - x_{\text{实测}}|}{x_{\text{实测}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Δ 是为绝对误差; σ 为相对误差。

2.4 雪岭云杉碳储量的估测

按照植物干重有机物中碳所占的比重将植物生物量转化为碳储量,树木的种类、年龄和种群结构以及转化率之间存在差异,但差异不大,因此,其转化率一般在 0.45~0.5 变化^[20]。由于各种植被类型转化

率的获取难度较大,因此国际上以 0.5 作为常用转化率^[21]。本文采用 0.5 的转化率计算碳储量。

3 结果与分析

3.1 相关性分析与生物量模型建立

变量的相关系数矩阵反映了各变量之间的相关性,由表 3 可以看出,某些变量的相关系数值在 0.85 以上(如 PVI 与 RVI,PVI 与 NDVI 等),表明这些变量之间存在冗余信息。由于回归模型中的自变量有独立性的要求,因此,需要剔除相关性较高的自变量,而利用相关系数较低的变量建立生物量模型,此种处理可减少相关变量隐含的冗余信息。此外,选择自变量的另一个原则是其与生物量(因变量)的相关性较高且关系显著。因此,可选择与生物量相关性较高的 B_5 与 B_7 波段($p<0.05$)、植被指数变量中的 DVI($p<0.05$)与 VI_3 ($p<0.01$)建立它们与生物量之间的关系。为进一步提高模型的性能,对以上 4 个变量进行变换,分别得到 B_5^2 、 B_7^2 、 $\ln(\text{DVI})$ 以及 $\ln(VI_3)$,并引入年均温度(T)和年降水量(P)数据,选用它们的线性组合并采用最小二乘法估计得到多元线性回归模型,相关回归模型如表 4 所示。

表 3 自变量之间及与生物量的相关性

	海拔	坡度	坡向	B_2	B_3	B_4	B_5	B_7	DVI	NDVI	PVI	RVI	VI_3
海拔	1												
坡度	-0.0014	1											
坡向	-0.1711	-0.1348	1										
B_2	-0.2191	-0.2699	-0.0322	1									
B_3	-0.1758	-0.2700	-0.0927	0.9480	1								
B_4	-0.0196	-0.0980	-0.2172	0.7645	0.8701	1							
B_5	-0.0620	0.1772	-0.2479	-0.0586	-0.0596	0.0725	1						
B_7	-0.0410	0.2142	-0.2499	-0.0830	-0.0930	0.0407	0.9907	1					
DVI	-0.3900	-0.0646	0.0550	0.2586	0.2052	0.1480	0.3828	0.3534	1				
NDVI	0.3453	0.2070	-0.2951	-0.2827	-0.1895	0.2509	0.3419	0.3718	-0.0792	1			
PVI	0.3232	0.3517	-0.2397	-0.4121	-0.3115	0.1971	0.2547	0.2613	-0.1345	0.8614	1		
RVI	0.2375	0.3463	-0.1903	-0.2155	-0.0930	0.3966	0.1968	0.2014	-0.0338	0.7947	0.9488	1	
VI_3	0.1257	0.1856	-0.0454	-0.0336	-0.1303	0.0871	0.5290	0.5324	0.1025	0.4419	0.4280	0.3467	1
生物量	-0.022	-0.187	0.117	0.127	0.025	-0.004	0.345*	0.357*	0.351*	0.144	-0.058	-0.76	0.459**

注:*,**分别表示 0.05,0.01 显著性水平。

表 4 所列的回归模型中,单波段自变量(B_5 和 B_7)建立的估算模型(1~4)相关系数 R 较低($R<0.4$)。模型 5 和模型 6 是以中红外植被指数(VI_3)和差值植被指数(DVI)为自变量建立的模型,相关系数 R 分别为 0.544,0.672,高于单波段自变量建立的模型。模型 7 是

以中红外植被指数(VI_3)、差值植被指数(DVI)、 T 和 P 为自变量建立的模型,相关系数为 0.694。模型 8 是以中红外植被指数(VI_3)和差值植被指数(DVI)经过非线性变换后共同建立的非线性方程,相关系数为 0.711。模型 10 是中红外植被指数(VI_3)和差值植被指数(DVI)

经过非线性变换后结合 T 和 P 共同建立的非线性方程,其相关系数最高($R=0.726$)。从各预测模型中可以看出,自变量与森林生物量之间并非简单的线性关系,相比于线性模型,非线性模型对研究区森林生物量的拟合效果更好。引入年均温度和年降水量参

数提高了模型的精度,说明年均温度和年降水量对生物量有一定的影响。模型 10 的 R^2 最高($R^2=0.528$),并且 $F=6.14>F_{0.01}=4.24$,因此 $B=-263.290+36.367\times\ln(\text{DVI})+63.653\times\ln(\text{VI}_3)+3.191\times T+0.393\times P$ 为最优生物量估算模型。

表 4 生物量估算模型

序号	模型	R	R^2	F	Sig.
1	$B=25.438+0.172\times B_5$	0.385	0.148	4.360	0.047
2	$B=26.269+0.001\times B_5^2$	0.387	0.150	4.396	0.046
3	$B=25.639+0.312\times B_7$	0.391	0.153	4.519	0.044
4	$B=29.480+0.005\times B_7^2$	0.388	0.151	4.436	0.045
5	$B=7.541+0.414\times \text{VI}_3$	0.544	0.296	10.534	0.003
6	$B=-9.602+0.402\times \text{VI}_3+0.115\times \text{DVI}$	0.672	0.452	9.880	0.001
7	$B=-137.334+0.374\times \text{VI}_3+0.106\times \text{DVI}+3.702\times T+0.500\times P$	0.694	0.481	5.100	0.005
8	$B=-172.179+67.495\times\ln(\text{VI}_3)+39.204\times\ln(\text{DVI})$	0.711	0.506	12.269	0.000
9	$B=-173.540+36.806\times\ln(\text{DVI})+66.971\times\ln(\text{VI}_3)+1.533\times T$	0.719	0.518	8.225	0.001
10	$B=-263.290+36.367\times\ln(\text{DVI})+63.653\times\ln(\text{VI}_3)+3.191\times T+0.393\times P$	0.726	0.528	6.142	0.002

为检验估算模型的精度,利用未参与模型构建的 13 个样地实测生物量数据对模型进行估算精度检验。由表 5 知,模型 10 平均估算精度为 87.28%,基本符合生物量的估算要求,反演得到的估算值与实测值的差值范围是 0.18~8.21 t/hm²,估算值的平均值为 31.85 t/hm²,实测值的平均值为 31.51 t/hm²,绝对误差为 0.13 t/hm²,平均相对误差为 12.72%,说明模型的精度较好,可以用来估算乌鲁木齐南山的森林生物量。

表 5 实测值与估算值的误差及估算精度

序号	实测值/ (t·hm ⁻²)	估算值/ (t·hm ⁻²)	差值	估算 精度/%
1	32.47	27.28	5.19	84.02
2	33.89	38.33	-4.44	86.91
3	33.77	27.28	6.49	80.79
4	24.44	29.51	-5.07	79.26
5	49.1	46.74	2.36	95.19
6	18.53	20.87	-2.34	87.38
7	38.23	38.05	0.18	99.52
8	26.06	26.46	-0.40	98.47
9	24.94	33.16	-8.22	67.04
10	35.42	28.14	7.28	79.45
11	16.55	19.19	-2.64	84.06
12	33.22	34.92	-1.70	94.89
13	43.05	44.08	-1.03	97.62

3.2 生物量估算及空间分布

运用逐步回归分析方法得到的模型 10,结合 ArcGIS 10.1 软件监督分类划分的森林模块,进行乌鲁木齐南山森林生物量的反演。通过计算得出乌鲁木

齐南山森林生物总量为 8.2×10^6 t,最大值为 219.67 t/hm,平均森林生物量为 91.21 t/hm。由图 1A 知,乌鲁木齐南山森林生物量密度分布不平衡,西南地区大于东北地区,少数分布在乡镇边缘。生物量随着纬度的增加而减少,这是因为随着纬度的增加,夏季的平均气温增加而年均降水量减少,影响了树木的生长;由于乌鲁木齐南山森林经度的跨度较小,所以生物量在经度上没有明显的变化趋势。总体来说,生物量密度的分布呈现西南高、东北低的趋势。

3.3 碳储量估算及空间分布

根据碳储量的转换系数(0.5)以及森林生物量密度的空间分布计算森林碳储量的空间分布(图 1B)。乌鲁木齐南山森林碳储量为 4.1×10^6 t,平均碳密度为 45.61 t/hm。若将碳储量密度划分为低,中,高 3 个等级,则统计结果表明,低密度等级的碳储量占总量的 0.32%,中密度等级的碳储量占总量的 57.14%,高密度等级的碳储量占总量的 42.54%,因此,乌鲁木齐南山森林碳储量主要集中在中高密度等级。

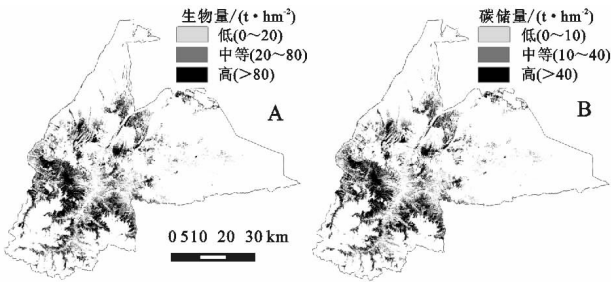


图 1 乌鲁木齐南山森林的空间分布

4 讨论

4.1 森林遥感信息生物量估算模型

利用遥感估算模型来估算森林生物量是目前的研究热点之一。牛志春等人研究表明,基于遥感信息的非线性回归模型要优于线性回归模型^[22]。Fan 等研究表明森林生物量与植被遥感参数之间存在非线性关系^[23],因此可以选择非线性方法来建立森林生物量模型。Wu 等人认为利用多个遥感数据的相关波段可以提高生物量的估算精度^[24],彭守璋等在祁连山青海云杉林生物量的研究中引入降水和温度等气候要素提高模型精度^[25],因此,本研究利用 5 个原始波段(TM2, TM3, TM4, TM5, TM7)、年均温度和年降水量参与非线性生物量估算模型的建立,提高了估算的精度(平均估算精度为 87.28%)。此外,基于自学习过程的神经网络方法,也能够显著的提高估算生物量的精度。例如,袁野等利用改进型 B-P 神经网络模型,分别对西雪岭云杉林的幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林进行生物量估算,其估算精度为 91.97%^[26],这表明神经网络相比于多元回归模型能够更加真实的反映实际的情况。需要提及的是,由于遥感影像分辨率、遥感影像获取时间、建模因子的选择、样地的数量和选取等都可能影响生物量的估算,因此选取何种模型进行估算,需考虑上述多种数据的可获取性和适用性^[27]。

本研究所采用的野外调查的数目较少,因此用于构建估算模型和验证模型的样本有限,且样地分布不均匀,因此对模型精度造成了一定的影响。此外,地形纹理特征、土壤信息等因子也会影响森林生物量的估算^[28]。在未来的研究中需要增加野外调查样地数量,并且研究区内的样点要均匀分布,进一步优化建模因子,加入土壤、纹理等因子^[29],建立精度更高、实用性更强的生物量估算模型。由于森林生物量是时刻变动的,为了能够更加精确的估算生物量密度的空间分布,可考虑建立具有物理机制和生理学意义的生物量模型进行估算^[30]。

4.2 乌鲁木齐南山森林碳储量/碳密度的空间分布特征

地形对森林碳密度有一定的影响^[31],徐少君等研究表明森林碳储量密度随海拔的增高呈现明显的增长趋势^[32],李海涛等人研究表明乔木层碳密度随着海拔的升高而增加,且样地的总碳密度也随着海拔的上升而增加^[33]。本研究表明,森林碳密度主要集中在中密度等

级,但是在不同海拔梯度上没有明显的变化规律(图 2),说明碳密度还与不同海拔梯度上的温度、降水和土壤等有关。刘倩楠等研究表明碳储量(碳密度)随坡度和坡向的分布特征明显^[34]。徐新良等研究表明我国森林植被碳储量和碳密度空间差异显著^[35],因此在进一步的研究中,应考虑引入坡度、坡向等因素来探究云杉林碳储量和碳密度的空间变化特征。

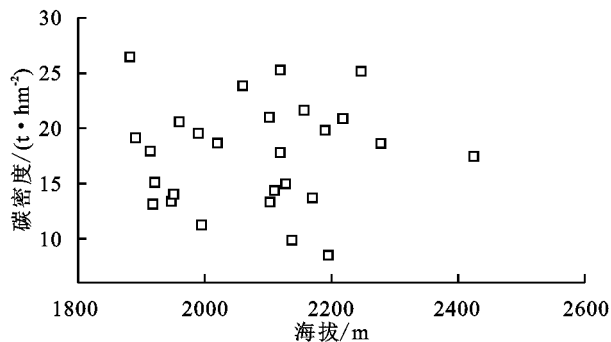


图 2 碳密度随海拔的变化关系

5 结论

(1) 研究中选取与生物量相关性较高且关系显著的自变量,并结合年均温度和年降水量数据进行回归方程的拟合。得到的最优生物量估算模型为 $B = -263.290 + 36.367 \times \ln(DVI) + 63.653 \times \ln(VI_3) + 3.191 \times T + 0.393 \times P$, 相关系数为 0.726。

(2) 本文建立的最优估算模型拟合效果较好,从模型的检验来看,估算精度为 87.28%,具有较高的预估精度。适应于森林生物量的估算,能够较为真实的反映实际情况。

(3) 本研究表明,由于乌鲁木齐南山东北部区域人类活动较为频繁,因此,生物量密度的分布呈现西南高、东北低的趋势。将碳储量密度划分为低,中等,高 3 个等级,结果表明,乌鲁木齐南山森林碳储量主要集中在中高密度等级。

参考文献:

- [1] 陈洋勤. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Sabine C L, Heimann M, Artaxo P, et al. Current status and past trends of the global carbon cycle. [J]. Scope, 2004, 62: 17-44.
- [3] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [4] Nogueira E M, Fearnside P M, Nelson B W, et al. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from

- wood-volume inventories[J]. *Forest Ecology & Management*, 2008,256(11):1853-1867.
- [5] 程鹏飞,王金亮,王雪梅,等. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展[J]. *林业调查规划*,2009,34(6):39-45.
- [6] 张继平,张林波,刘春兰,等. 井冈山中亚热带森林植被碳储量及固碳潜力估算[J]. *生态环境学报*,2016,25(1):9-14.
- [7] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's Larix forests. [J]. *Forest Ecology & Management*, 2002,169(1):149-157.
- [8] Brown S L, Schroeder P E. Spatial patterns of aboveground production and mortality of woody biomass for eastern U. S. forest[J]. *Ecological Applications*, 1999,9(3):968-980.
- [9] Peng S Z, Zhao C Y, Peng H H, et al. Spatial distribution of Tamarix ramosissima aboveground biomass and water consumption in the lower reaches of Heihe River, Northwest China. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010,21(8):1940-1946.
- [10] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. *植物生态学报:英文版*,2001,43(9):967-973.
- [11] 黄燕平,陈劲松. 基于 SAR 数据的森林生物量估测研究进展[J]. *国土资源遥感*,2013,25(3):7-13.
- [12] 徐金发. 新疆的又一颗旅游风景明珠:乌鲁木齐南山风景区[J]. *旅游学刊*,1988(S):92-100.
- [13] 张绘芳,高亚琪,朱雅丽,等. 新疆雪岭杉生物量模型对比研究[J]. *西北林学院学报*,2015,30(6):52-58.
- [14] 杨伟志,赵鹏祥,薛大庆,等. 基于 Landsat-8 影像的西安市南北山森林生物量估测模型研究[J]. *西北林学院学报*,2016,31(2):33-37.
- [15] 郑炳松,金爱武,程晓建,等. 雷竹光合特性的研究[J]. *森林与环境学报*,2001,21(4):359-362.
- [16] Zheng B, Jin A, Cheng X, et al. Study on the photosynthetic characteristics of Lei bamboo leaves [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2001,21(4):359-362.
- [17] Waltari E, Schroeder R, McDonald K, et al. Bioclimatic grids-Worldclim[J]. *Methods in Ecology and Evolution*,2014,5(10):1033-1042.
- [18] 杨存建,刘纪远,张增祥. 热带森林植被生物量遥感估算探讨[J]. *地理与地理信息科学*,2004,20(6):22-25.
- [19] 杨桂元,王军. 对预测模型误差的分析:相对误差与绝对误差[J]. *统计与信息论坛*,2003,18(4):21-24.
- [20] 徐天蜀. 基于遥感信息的森林生物量、碳储量估测技术研究[J]. *林业调查规划*,2008,33(3):11-13.
- [21] 杨洪晓,吴波,张金屯,等. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*,2005,41(2):172-177.
- [22] 牛志春,倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型[J]. *地理学报*,2003,58(5):695-702.
- [23] 范文义,李明泽,杨金明. 长白山林区森林生物量遥感估测模型[J]. *林业科学*,2011,47(10):16-20.
- [24] WU L, LIU X N, ZHOU B T, et al. Spatial-time continuous changes simulation of crop growth parameters with multi-source remote sensing data and crop growth model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012,24(6):1173-1191.
- [25] 彭守璋,赵传燕,郑祥霖,等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J]. *应用生态学报*,2011,22(7):1689-1694.
- [26] 袁野,李虎,刘玉峰. 基于改进型 B-P 神经网络的西雪岭云杉林生物量估算[J]. *福建师大学报:自然科学版*,2011,27(2):124-132.
- [27] 曾晶,张晓丽. 高分一号遥感影像下崂山林场林分生物量反演估算研究[J]. *中南林业科技大学学报*,2016,36(1):46-51.
- [28] 刘芳,冯仲科,赵芳,等. 资源三号遥感卫星影像的生物量反演研究[J]. *西北林学院学报*,2015,30(3):175-181.
- [29] 李丹丹. 北京市森林生物量遥感反演模型研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [30] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, et al. Special paper: A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate[J]. *Journal of Biogeography*, 1992,19(2):117-134.
- [31] Tomppo E, Nilsson M, Rosengren M, et al. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS1-C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass [J]. *Remote Sensing Environ*, 2002,82:156-171.
- [32] 徐少君,曾波,苏晓磊,等. 基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究[J]. *生态学报*,2012,32(7):2174-2184.
- [33] 李海涛,王姗姗,高鲁鹏,等. 赣中亚热带森林植被碳储量[J]. *生态学报*,2007,27(2):693-704.
- [34] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. *地理科学进展*,2007,26(6):1-10.
- [35] 刘倩楠,欧阳志云,李爱农,等. 重庆市森林植被生物量和碳储量的空间分布特征研究[J]. *水土保持研究*,2016,23(6):221-226.