

基于 Landsat-8 影像的西宁市南北山森林生物量估测模型研究

杨伟志¹,赵鹏祥^{1*},薛大庆²,侯逸晨¹,张晓莉¹,王志涛³

(1. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2. 韩城市农林局,陕西 韩城 715400;3. 青海省林业科学研究所,青海 西宁 810000)

摘 要:基于 Landsat-8 遥感影像结合同期的野外调查样地数据,建立青海省西宁市南北山森林生物量估测模型。通过对 Landsat-8 遥感数据 6 个原始波段的灰度值和 4 个常用植被指数(DVI、NDVI、EVI、SAVI),开展主成分分析后得到主分量 PCA1、缨帽变换得到 BRIGHT、GREEN、WET,分析遥感信息与生物量的相关性,运用逐步回归分析法建立研究区森林生物量回归估测模型: $B=119.495+3.704E^{-24}e^{DVI}+0.026OLI-5^2-3.478OLI-5(R^2=0.554,p<0.01)$,经检验模型的平均相对误差为 13.509%,反演得到西宁市单位面积森林生物量为 5.227 t/hm²,总森林生物量为 998 991.768 t。结合西宁市遥感影像,绘制了西宁市森林生物量分布图。

关键词:生物量;模型;Landsat-8;逐步回归分析;西宁市

中图分类号:S757 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)02-0033-05

Estimation of Forest Biomass Model of North and South Mountains Based on Landsat-8 Remote Sensing Image Data in Xining

YANG Wei-zhi¹, ZHAO Peng-xiang^{1*}, XUE Da-qing², HOU Yi-chen¹, ZHANG Xiao-li¹, WANG Zhi-tao³

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Agriculture and Forestry Bureau of Hancheng City, Hancheng, Shaanxi 715400, China; 3. Forestry Research Institute of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract:Based on Landsat-8 remote sensing image data, combined with field survey data during the same period, a forest biomass estimating model of North and South Mountains in Xining, capital of Qinghai Province was established. Different band spectral reflectances of each plot were obtained, and the vegetation indices, bright, green, wet and derived factors by linear or nonlinear transformation were computed by using ENVI software. In order to select appropriate factors as variables for the establishment of forest biomass model, the correlations between those factors and forest biomass were calculated. The multiple regression model was built using stepwise regression analysis. Model $B=119.495+3.704E^{-24}e^{DVI}+0.026OLI-5^2-3.478OLI-5$ could be used to estimate forest biomass in Xining, its multiple correlation coefficient was 0.554 ($p<0.01$). The predicted average relative error was 13.509%. The results showed that the average forest biomass density of Xining was 5.227 t · hm⁻², and the total forest biomass was 998 991.768 t.

Key words:biomass; model; Landsat-8; stepwise regression analysis; Xining City

森林生物量约占地球陆地生态系统生物量的 85%^[1],森林生物量能够充分体现森林生态系统环境的质量,是衡量森林生态系统生产力、生态系统结构功能的最好指标^[2],精确估测森林生物量、碳贮量及其固碳能力正逐渐引起全球瞩目^[3-4]。目前国内 外森林生物量的 2 种基本估测方法:基于森林资源

清查的方法和基于遥感估测的方法^[5],前者通常只能获得点上的数据,且劳动强度大、成本高,不利于研究生物量的空间分布和变化,而通过遥感信息技术可以测定从林分到区域等不同空间尺度的森林生物量^[6],具有宏观、动态、综合、快速的特点^[7-8],其发展推动了森林生物量的研究,研究范围、研究精度和

收稿日期:2015-04-18 修回日期:2015-05-05

作者简介:杨伟志,男,硕士研究生,研究方向:“3S”技术在资源与环境中的应用。E-mail:zblue_yang@qq.com

* 通信作者:赵鹏祥,男,副教授,研究方向:林业遥感。E-mail:zpx666@aliyun.com

实时性^[89]都得到了明显的提高,这为区域森林生物量估算提供了一种经济、适用的新途径^[10-12]。

Landsat 系列卫星对启蒙和推动遥感应用技术的发展起到了重要作用,其遥感图像数据在我国得到了广泛应用^[13],由于 Landsat-5 的退役和 Landsat-7 的故障,一度出现数据空缺的现象,2013 年 2 月 11 日发射的 Landsat-8 卫星保持了 Landsat-7 卫星的基本特征,同时影像的分辨率有了提升^[14],可以承担长期对地观测的使命。本研究根据 Landsat-8 卫星的光谱信息结合西宁市南北山的地面调查数据,尝试建立森林生物量估测模型,反演得到西宁市森林生物量等级分布图。

1 研究区概况

研究区为青海省西宁市南北山(101°32′55″—101°55′47″E、36°32′38″—36°45′59″N),西宁市地处祁连山东段南侧,全市最高海拔 2 808 m,最低海拔 2 261 m,市区平均海拔为 2 275 m。西宁市土地总面积 7 424. 11 km²,其中市区土地面积 346. 05 km²,建城区面积约 75 km²。市区主要为河谷冲积平原,被南北两山环抱,南山长约 27 km,北山长约

35 km,地形东西狭长呈带状,山势起伏,地形破碎^[15]。研究区主要林分类型为以青杨(*Populus cathayana*)或河北杨(*Populus hopeiensis*)为优势树种的中幼龄阔叶混交林,青海云杉(*Picea crassifolia*)幼龄人工林,油松(*Pinus tabulaeformis*)中幼龄人工林。

2 研究方法

2.1 样地数据采集与处理

2013 年 5 月至 6 月,于研究区域进行了样地调查,在每块样地中随机布设角规点,对样地内的乔木进行每木测量,各个布设点用手持 GPS 进行定位,共调查了 46 个不同年龄、不同优势树种的调查样地,样地面积 20 m×20 m,尽量与 Landsat-8 数据的空间分辨率一致。

样地内的所有树木均进行每木检尺,测定树高、胸径、优势树种、郁闭度、树木株数、坡向、坡度和海拔等数据,以相关公式^[16]求出样地森林生物量。剔除异常的 3 个样地之后,随机选取其中 36 个样地数据作为建模样本,保留 9 个作为独立检验样本。

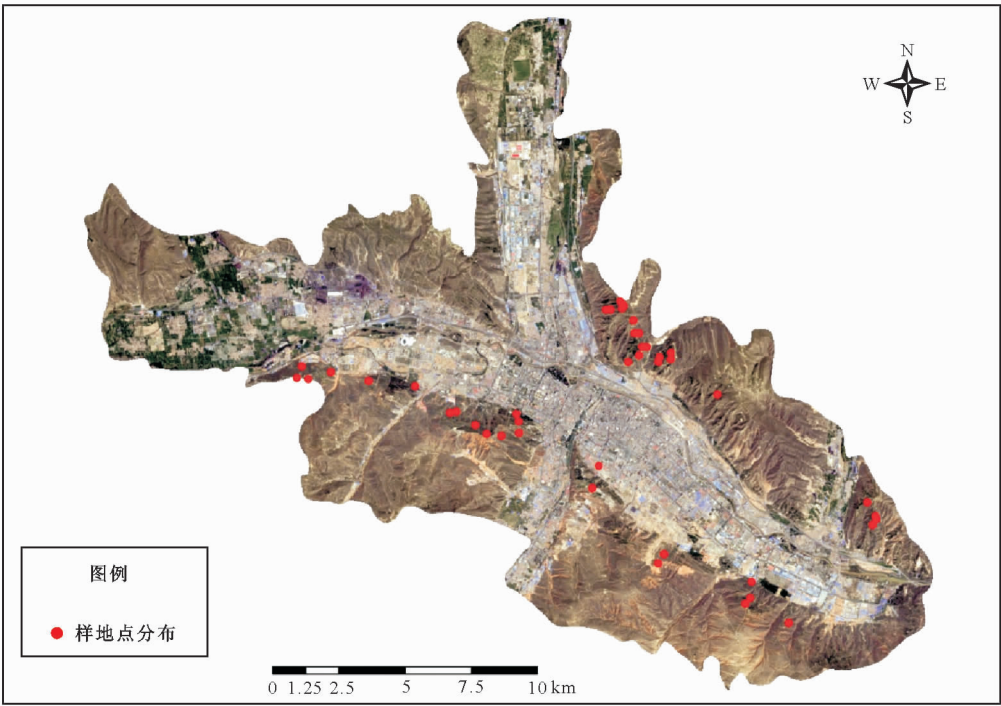


图 1 研究区样地分布

Fig. 1 Distribution of sample plots in the study region

2.2 遥感数据采集与处理

本研究采用 2013 年 2 月 11 日 NASA 成功发射的 Landsat-8 陆地资源卫星数据,Landsat-8 卫星上携带有 2 个主要载荷 OLI 和 TIRS,其中 OLI(全称:operational land imager,陆地成像仪)由卡罗拉

多州的鲍尔航天技术公司研制;TIRS(全称:thermal infrared sensor,热红外传感器)由 NASA 的戈达德太空飞行中心研制^[17]。影像数据投影方式为 UTM/WGS84,共分 11 个波段,空间分辨率为 30 m,其中包括 1 个 15 m 的全色波段。为保持影像信

息与地面调查时间相近,采用 2013 年 6 月 12 日的影像(Path /row:132/35),该影像上西宁市辖区影像清晰,无云层覆盖。

利用 ENVI 5.1 软件打开西宁市 Landsat-8 影像,进行辐射定标、大气校正,之后以经过校正的西宁市 Quickbird 影像为基准,选取 30 个控制点(GCP),选择二次多项式法进行几何精校正,校正误差在一个像元之内,满足精度要求。利用西宁市行政边界图进行裁剪,保留研究区部分的影像,之后将外业测得的样地点坐标与影像在 ArcGIS 10.2 软件中进行叠加,选择距样地坐标最近的像元代表该样地的位置。

植物的结构以及体内的色素、水分有特殊的光谱响应,可通过多光谱遥感信息获得植物的相关信息;利用 ENVI 对影像进行波段光谱反射率提取,选取其中 6 个原始波段(OLI-2、OLI-3、OLI-4、OLI-5、OLI-6、OLI-7)。植被指数是利用遥感卫星探测数据的线性和非线性组合而形成的能反映绿色植被生长状况和分布的特征指数^[18],比单波段用来探测生物量有更好的灵敏性,因此运用 ENVI 的波段运算功能得到常用的植被指数(NDVI、DVI、SAVI、EVI)。为获取更多的遥感信息,对原始波段和植被指数进行线性或者非线性变化得到新的参数^[18];对影像进行主成分变换,产生主分量 PCA1;进行缨帽变换产生亮度(BRIGHT)、绿度(GREEN)、湿度(WET)。

差值植被指数(DVI): $DVI=NIR-R$;
归一化差值植被指数(NDVI):
 $NDVI=(NIR-R)/(NIR+R)$;
土壤调整植被指数(SAVI):

$$SAVI=\frac{1.5(NIR-R)}{NIR+R+0.5};$$

增强植被指数(EVI):

$$EVI=\frac{2.5(NIR-R)}{NIR+6R-7.5B+1}$$

式中, NIR 代表近红外波段也即 OLI-5, R 代表红外波段也即 OLI-4, B 代表蓝色波段也即 OLI-2。

2.3 生物量模型建立

提取以上参数作为建立估测模型的初始自变量,在 SPSS20.0 软件的相关分析中,计算各个初始自变量和生物量之间的相关性,选出相关性显著的自变量作为建模自变量,采用逐步回归分析法建立森林生物量估测模型,综合分析方程的显著性(Sig)、相关系数(R)、复相关系数(R^2)、调整相关系数(调整 R^2)及模型独立性检验指标值(F)等指标,选出最适合估测西宁市南北山的森林生物量模型。

3 结果与分析

3.1 生物量与初始自变量的相关性

采用 SPSS 软件将生物量与初始自变量一一进行相关性分析,选取其中与生物量显著相关的变量作为建模自变量。由表 3 可以看出,在所选的 6 个原始波段中只有 OLI-5 与生物量相关性较高,呈现极显著正相关($p<0.01$);而经过主成分变换和缨帽变换后的参数与生物量之间相关性均不明显;各个植被指数中,DVI 与生物量呈现显著相关($p<0.05$);经过线性和非线性变化的各变量中,OLI-5²、e^{DVI}与生物量均呈现极显著正相关($p<0.01$),可以看出,经非线性变换后,OLI-5、DVI 与生物量的相关性均有所提高。

表 1 自变量与生物量的相关性
Table 1 Correlation of variables with biomass

变量	OLI-2	OLI-3	OLI-4	OLI-5	OLI-5 ²	OLI-6	OLI-7	BRIGHT	GREEN	WET
相关系数	-0.029	0.026	-0.043	0.467**	0.498**	-0.072	-0.134	0.163	0.269	0.202
显著水平	0.866	0.879	0.805	0.004	0.002	0.677	0.435	0.342	0.112	0.237
变量	NDVI	DVI	e ^{DVI}	ln ^{DVI}	EVI	SAVI	PCA1	郁闭度	海拔	
相关系数	0.290	0.370*	0.589**	0.290	-0.135	0.291	0.093	0.120	0.049	
显著水平	0.086	0.026	0.000	0.086	0.432	0.086	0.589	0.486	0.777	

注: ** 在 0.01 水平上极显著, * 在 0.05 水平上显著。

3.2 生物量模型的建立、选取以及检验

根据相关性分析得知选取 OLI-5、DVI 以及经过非线性变化后的 OLI-5²、e^{DVI}作为建立生物量估测模型的自变量,在 SPSS 中,将选取的建模自变量与森林生物量进行逐步回归分析,选取模型显著值 ≤ 0.05 的方程,得到表 4。

建模过程中发现,模型 1~4 为以单个自变量建立的估测模型,其模型决定系数 R^2 普遍偏低,调整

R^2 均 <0.4 ,拟合效果较差;而模型 5、模型 6 则为以 OLI-5 的反射率和差值植被指数(DVI)经过非线性变化后得到的自变量 e^{DVI}共同建立的多元曲线方程,调整 R^2 分别为 0.442、0.554,明显高于单个自变量建立的模型。表 4 中,模型 1、模型 3 为线性方程,与之对应的模型 2、模型 4 则是经过非线性变化后得到模型,均为非线性方程;对比可知研究地区的森林生物量与单个自变量之间的关系并非简单的线

表 2 不同遥感因子生物量估算模型

Table 2 Models of biomass estimation with different remote sensing factors

序号	模型	<i>R</i>	<i>R</i> ²	调整 <i>R</i> ²	<i>F</i>	<i>Sig.</i>
1	$-22.751+0.414OLI-5$	0.467	0.218	0.195	9.495	0.004
2	$-8.867+0.003OLI-5^2$	0.498	0.248	0.226	11.214	0.002
3	$-0.526+0.215DVI$	0.370	0.137	0.112	5.397	0.026
4	$5.556+4.343E^{-24}e^{DVI}$	0.589	0.347	0.328	18.085	0.000
5	$-5.665+3.629E^{-24}e^{DVI}+0.002OLI-5^2$	0.688	0.474	0.442	14.854	0.000
6	$119.495+3.704E^{-24}e^{DVI}+0.026OLI-5^2-3.478OLI-5$	0.769	0.592	0.554	15.466	0.000

性关系,部分经过非线性变化之后的模型更适合估测西宁市南北山森林生物量。

对于模型的选取,应当综合分析方程的显著性(*Sig.*)、相关系数(*R*)、复相关系数(*R*²)、调整相关系数(调整 *R*²)及模型独立性检验指标值(*F*)。从表 4 可以看出模型 6 相对于模型 5 调整相关系数(调整 *R*²)更高,为 0.554 且 $F=15.466>F_{0.01}=4.46$,方程拟合效果较好。故选模型 6; $B=119.495+3.704E^{-24}e^{DVI}+0.026OLI-5^2-3.478OLI-5$ 为估测西宁市南北山森林生物量最优模型。

为了检验估测模型的模拟效果,选取未参与模型构建的 9 个样地实测数据,与根据模型 6 得到的模拟值进行误差分析。从表 5 可以看出,根据模型 6 反演得到的 9 个预测值和实测值之间的差值范围为 $-2.572\sim6.515\text{ t/hm}^2$,用差值与实测值之间的比值来判断模型反演的好坏,可以看出 9 个样地点的反演误差与实测值比值的范围为 $0.101\sim0.366$,表明利用模型 6 反演的预测值与实测值较为接近。同时计算生物量反演均值为 10.246 t/hm^2 ,与实测均值 11.846 t/hm^2 进行比较,绝对误差为 1.600 t/hm^2 ,平均相对误差为 13.509% ,可以使用模型 6 来反演西宁市南北山森林生物量。

表 3 生物量实测值与估测模型预测值的误差

Table 3 Error contrast of the observation value and the simulation value based on the estimated model

	实测值	预测值	差值	差值/实测值
1	30.414	23.899	6.515	0.214
2	33.633	30.215	3.418	0.101
3	8.423	5.337	3.085	0.366
4	6.528	4.183	2.345	0.359
5	6.593	4.648	1.945	0.295
6	5.078	3.879	1.199	0.236
7	3.566	4.000	-0.434	-0.121
8	3.423	4.522	-1.099	-0.321
9	8.958	11.531	-2.572	-0.287

3.3 研究区森林生物量制图与空间分析

将经过前期处理的西宁市遥感影像在 ARC-GIS10.2 软件中进行监督分类划分出森林模块,结合西宁市南北山森林生物量最优估测模型即模型

6,计算出西宁市单位面积森林生物量为 5.227 t/hm^2 ,总森林生物量为 $998\,991.768\text{ t}$ 。从图 2 可以看出,西宁市森林生物量主要分布于西宁市的东北、东南以及西南部,多分布于南山和北山,少数分布于城市的边缘以及公园。生物量分布呈现东高西低,南高北低的状况,且普遍偏低,这与研究区的气候、土壤条件、植被分布状况有关。西宁市南北山地处浅山地区,地形复杂、沟壑纵横,气候干旱,植被稀疏,水土流失严重,现有的森林均为人工林,造林难度较大,造林树种以杨、柳为主,且多为幼龄林,郁闭度较低,加之人类活动频繁,因此实测的生物量均普遍偏低。

4 结论与讨论

通过西宁市南北山森林生物量与 Landsat-8 遥感数据 6 个原始波段反射率值、4 个植被指数、主成分分析后得到的主分量 PC1、缨帽变换得到的 BRIGHT、GREEN、WET 以及经过线性和非线性变换后派生变量的相关性分析得出,*OLI-5* 与森林生物量呈现极显著正相关($p<0.01$),*DVI* 与森林生物量呈现显著相关($p<0.05$);*OLI-5* 和 *DVI* 经过非线性变化后的派生变量与生物量相关性更高。

以 *OLI-5* 和 *DVI* 经过非线性变化后得到的派生变量 *OLI-5*² 和 e^{DVI} 建立的曲线方程拟合效果优于以 *OLI-5* 和 *DVI* 建立的线性方程;以多个变量(*OLI-5*²、 e^{DVI} 和 *OLI-5*)构建的估测模型要比以单个变量(*OLI-5* 或 e^{DVI})建立的估测模型拟合效果好。

生物量估测模型 $B=119.495+3.704E^{-24}e^{DVI}+0.026OLI-5^2-3.478OLI-5$,能较好地估测西宁市南北山森林生物量。基于此回归模型的反演,西宁市单位面积森林生物量为 5.227 t/hm^2 ,总森林生物量为 $998\,991.768\text{ t}$ 。从图 2 可以看出,西宁市森林生物量主要分布于西宁市的东北、东南以及西南部,具体分布于南山和北山,森林生物量普遍偏低,呈现东高西低,南高北低。

本研究基于 Landsat-8 遥感影像数据结合同期的野外调查样地数据,采用逐步回归分析法,建立生

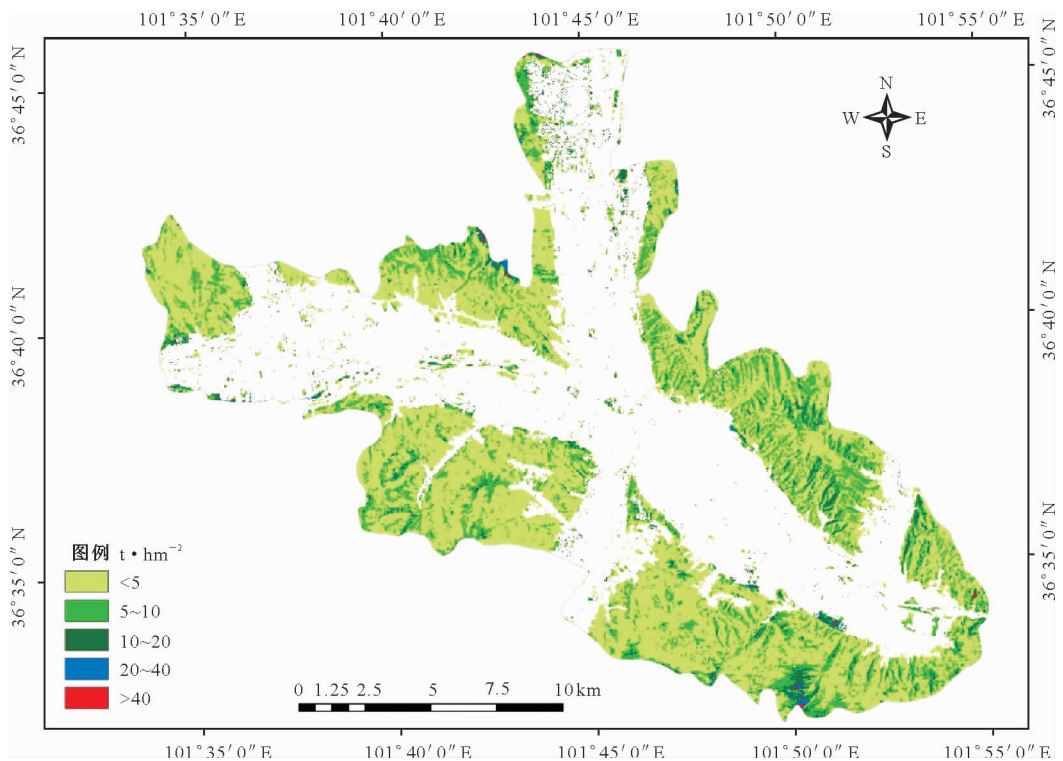


图 2 西宁市森林生物量等级分布

Fig. 2 Distribution of forest biomass in Xining

物量多元非线性回归模型估算西宁市南北山森林生物量。该森林生物量估测模型的精度还不算高,存在若干不足以及需要改进的地方。调查样地数目不够,构建模型以及反演的样本有限制,对估测模型的精度有一定影响。在之后的研究中可增加野外调查样地的数量,且更加均匀的布设样地点的位置,使研究数据更加充实。可尝试更多的方法建立生物量模型,除了多元线性回归之外可采用人工神经网络的方法来构建模型。

参考文献:

[1] LIETH H, WHITTAKER R H. Primary Productivity of the Biosphere [M]. New York: Springer-Verlag, 1975.

[2] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1468-1472.

ZHAO M, ZHOU G S. Forest inventory data (FID) based biomass models and their prospects [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1468-1472. (in Chinese)

[3] 蒋延玲, 周广胜. 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 481-484.

JIANG Y L, ZHOU G S. Carbon equilibrium in *Larix gmelinii* forest and impact of global change on it [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 481-484. (in Chinese)

[4] 杨清培, 李鸣光, 王伯荪, 等. 粤西南亚热带森林演替过程中的生物量与净第一性生产力动态 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2136-2140.

YANG Q P, LI M G, WANG B S, *et al.* Dynamics of biomass and net primary productivity in succession of south subtropical

forests in Southwest Guangdong [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2136-2140. (in Chinese)

[5] 张志, 田昕, 陈尔学, 等. 森林地上生物量估测方法研究综述 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 144-150.

ZHANG Z, TIAN X, CHEN E X, *et al.* Review of methods on estimating forest above ground biomass [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(5): 144-150. (in Chinese)

[6] 王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 等. 森林生物量模型综述 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 58-63.

WANG W F, LEI Y C, WANG X F, *et al.* A review of forest biomass models [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2): 58-63. (in Chinese)

[7] 刘纪远, 庄大方, 凌扬荣. 基于 GIS 的中国东北植被综合分类研究[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 285-291.

[8] 吴展波, 郑炜, 刘胜祥, 等. 利用 3S 技术估算鹿门寺林场马尾松林生物量 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(6): 196-199.

WU Z B, ZHEN W, LIU S X, *et al.* Estimation of *Pinus massoniana* biomass in lumensi forest farm by 3S technology [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6): 196-199.

[9] 张慧芳, 张晓丽, 黄瑜. 遥感技术支持下的森林生物量研究进展 [J]. 世界林业研究, 2007, 20(4): 30-34.

ZHANG H F, ZHANG X L, HUANG Y. Applications of RS technology in forest biomass research [J]. World Forestry Research, 2007, 20(4): 30-34. (in Chinese)

[10] PATENAUDE G, MILEN R, DAWSON T P. Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation; Reporting to the kyoto protocol [J]. Environment Science and Policy, 2005, 8(2): 161-178.

[J]. 浙江林业科技, 2001, 21(2): 42-45, 70.

YU Z F, HE S F, SUN J G, *et al.* Studies on negative effect of coverage in *Phyllostachys propinqua* stand and countermeasures[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2001, 21(2): 42-45, 70. (in Chinese)

[17] 丁兴萃, 田新立, 潘雁红, 等. 早竹覆盖栽培的衰老生理机制[J]. 林业科学, 2009, 45(4): 41-45.

DING X C, TIAN X L, PAN Y H, *et al.* Physiological mechanism of precocious senescence of *Phyllostachys violascens* stands promoted by mulching cultivation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(4): 41-45. (in Chinese)

[18] 郑炳松, 金爱武, 程晓建, 等. 雷竹光合特性的研究[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(4): 359-362.

ZHENG B S, JIN A W, CHENG X J, *et al.* Study on the photosynthetic characteristics of Lei Bamboo leaves[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2001, 21(4): 359-362. (in Chinese)

[19] 黄真娟, 江洪. 太湖源雷竹光合作用日变化规律研究[J]. 北方园艺, 2013, (19): 87-90.

HUANG Z J, JIANG H. Study on the diurnal variations of photosynthesis of *Phyllostachys praecox*[J]. Northern Horticulture, 2013, (19): 87-90. (in Chinese)

[20] 周资行, 焦健, 李毅, 等. 民勤沙拐枣克隆种群构件结构及与环境因子的灰色关联分析[J]. 林业科学, 2012, 48(5): 141-149.

ZHOU Z H, JIAO J, LI Y, *et al.* The grey relatedness analysis between the modular structure of clonal population of *Calligonum mongolicum* and the environmental factors in the Min-qin Desert[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(5): 141-149. (in Chinese)

[21] RIIS T, LAMBERTINI C, OLESEN B, *et al.* Invasion strategies in clonal aquatic plants: are phenotypic differences caused by phenotypic plasticity or local adaptation [J]. Annals of botany, 2010, 106(5): 813-822.

[22] YU F H, WANG N, HE W M, *et al.* Adaptation of rhizome connections in drylands: increasing tolerance of clones to wind erosion [J]. Annals of Botany, 2008, 102(4): 571-577.

[23] 陈珊. 雷竹主要器官对林地覆盖经营的生态适应及其衰老机理[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014: 26-30.

[24] 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5623-5630.

GUO Z W, YU W X, CHEN S L, *et al.* Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in *Phyllostachys praecox* stand[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5623-5630. (in Chinese)

[25] 徐祖祥, 陈丁红, 李良华, 等. 临安雷竹种植条件下土壤养分的变化[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 247-250.

XU Z X, CHEN D H, LI L H, *et al.* A study on the change in soft nutrients under the condition of Bamboo shoot planting in Lin'an [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(13): 247-250. (in Chinese)

[26] 季海宝, 孙晓, 桂仁意, 等. 集约经营对雷竹林土壤与植株铝含量的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(1): 15-20.

JI H B, SUN X, GUI R Y, *et al.* Influence of intensive management on soil extractable Al and *Phyllostachys praecox* Al content[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(1): 15-20. (in Chinese)

(上接第 37 页)

[11] LU D. The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(7): 1297-1328.

[12] 翟晓江, 郝红科, 麻坤, 等. 基于 TM 的陕北黄龙山森林生物量模型[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 41-45.

ZHAI X J, HAO H K, MA K, *et al.* TM based estimation biomass model of the Huanglong Mountain in Northern Shaanxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1): 41-45. (in Chinese)

[13] 初庆伟, 张洪群, 吴业炜, 等. Landsat-8 卫星数据应用探讨[J]. 遥感信息, 2013, 28(4): 110-114.

CHU Q W, ZHANG H Q, WU Y W, *et al.* Application research of Landsat-8 [J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(4): 110-114. (in Chinese)

[14] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat-8 遥感影像新增特征及其生态环境意义 [J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3249-3257.

XU H Q, TANG F. Analysis of new characteristics of the first Landsat 8 image and their eco-environmental significance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3249-3257. (in Chinese)

[15] 刘得俊, 魏志强. 西宁市南北山土壤侵蚀风险度评价研究[J]. 中国水土保持, 2011, 10: 51-52.

[16] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 58.

[17] 张玉君. Landsat8 简介 [J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 176-177.

[18] 李素英, 李晓兵, 莺歌, 等. 基于植被指数的典型草原区生物量模型——以内蒙古锡林浩特市为例 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 23-31.

LI S Y, LI X B, YING G, *et al.* Vegetation indexes_biomass models for typical semi-arid steppe—a case study for Xilinhot in Northern China [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 23-31. (in Chinese)