

利用 TM 影像和偏最小二乘回归方法估测三峡库区森林蓄积量

张超¹ 彭道黎¹ 涂云燕¹ 党永峰² 智长贵²

(1 北京林业大学林学院 2 国家林业局调查规划设计院)

摘要:为进一步提高遥感模型预测森林蓄积量的精度和稳定性,分析了遥感特征因子、地形特征因子、郁闭度与森林蓄积量之间的相关关系。在此基础上,利用偏最小二乘回归方法构建了森林蓄积量遥感预测模型,生成了三峡库区森林蓄积量空间等级分布图,并与地面实测值进行比较。结果表明:该模型的最佳主成分数为3,且郁闭度、海拔、坡度、TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM7、NDVI、RVI、TM7/TM3、TM4×TM3/TM2、亮度和湿度为预测森林蓄积量的入选变量;森林蓄积量预测的调整决定系数为0.524,相对误差为7.33%,均方根误差为1.763 m³;利用该模型计算出三峡库区森林总蓄积量约为1.12亿 m³,总体预测精度达到89.58%。研究结果为提高森林蓄积量遥感预测的精度提供了一种有效手段,有利于大面积应用和推广。

关键词:三峡库区; TM 影像; 森林蓄积量; 偏最小二乘回归

中图分类号:S758.5⁺1; S771.8 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2013)03-0011-07

ZHANG Chao¹; PENG Dao-li¹; TU Yun-yan¹; DANG Yong-feng²; ZHI Chang-gui². **Predicting forest volume in Three Gorges Reservoir Region using TM images and partial least squares regression.**

Journal of Beijing Forestry University (2013)35(3)11-17 [Ch,20 ref.]

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing, 100714, P. R. China.

In order to further improve the accuracy and stability of predicting forest volume by remote sensing, the study analyzed the relative relationship between remote sensing variables, topographic factor, forest canopy and forest volume. The partial least squares (PLS) regression model was generated from the significant variables and the space level distribution map of forest volume was constructed. The results indicated that for the PLS regression model, the number of the best principal components was 3, and canopy, elevation, slope, 6 single bands, normalized difference vegetation index (NDVI), ratio vegetation index (RVI), TM7/TM3, TM4×TM3/TM2, brightness and wetness were identified as the predictors for predicting forest volume. The results showed that the determination coefficient (R^2), relative error (RE) and the root mean square error (RMSE) between estimated value and measured one of forest volume were 0.524, 7.33% and 1.763 m³, respectively. The total forest volume in Three Gorges Reservoir Region was 1.12×10⁸ m³, while the total average prediction accuracy of PLS regression model reached 89.58%. The results indicate that PLS regression method can provide an effective way to improve the accuracy of predicting forest volume at large scale by remote sensing data.

Key words Three Gorges Reservoir Region; TM images; forest volume; partial least square regression

三峡库区森林作为库区乃至整个长江流域的重要生态屏障,其森林数量和质量直接影响到该区域的生态安全。森林蓄积量是衡量森林质量优劣的关

键指标,传统的森林蓄积量调查方法费时费力,仅适用于小范围研究,而遥感技术的迅速发展,为快速、准确、实时大面积监测森林资源变化提供了一种有

收稿日期:2012-11-25 修回日期:2013-01-02

基金项目:国家级林业推广项目(201145)、“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD23B05)。

第一作者:张超,博士生。主要研究方向:林业遥感。Email:izhangcici@gmail.com 地址:100083 北京市清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者:彭道黎,教授,博士生导师。主要研究方向:森林资源监测与评价。Email:dlpeng@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

效的途径。近年来,基于遥感技术的森林蓄积量估测已成为国内外学者研究的热点,其中,以遥感信息参数与蓄积量间的拟合关系法来估测蓄积量的研究最多^[1-10]。Nelson 等^[4]基于 Laser 数据和对数方程建立了蓄积量预测模型,对美国佐治亚州南部森林蓄积量进行了估测,与地面实测值相比,模型预测结果总体平均偏差在 2.60% 以内。张友静等^[5]利用 K-T 变换得到的绿度、湿度分量以及郁闭度特征为自变量,构造了具有物理意义的森林蓄积量遥感估算模型,其平均估算精度达到 90%,适用于我国南方地区。Tomppo 等^[6]利用 TM 数据、IRS-1C WIFS 数据结合地面调查数据,基于非参数 KNN 法构建了非线性回归模型,对大面积区域的森林蓄积量进行了估算,预测值与实测值很接近。琚存勇等^[7]利用 TM 影像和云南思茅地区的 129 个一类清查样地,基于泛化改进的 BP 神经网络进行了蓄积量估测模型研究,发现其预报值与实测值的相对误差比普通 BP 神经网络模型的相对误差要小。Wijaya 等^[8]构建了基于遥感方法和野外测定并结合 GIS 系统方法的两种材积预测模型,发现前者预测值比后者要低一些,并且发现遥感灰度共生矩阵纹理特征与材积相关性很高。除了常用的多元回归、主成分回归等方法外,近年来发展起来的偏最小二乘回归方法也逐渐应用到林学领域的研究中^[9-10]。本研究以三峡库区为研究对象,以遥感因子、地形因子及样地调查因子与森林蓄积量之间的定量关系为基础,采用 TM 影像和偏最小二乘回归方法,构建森林蓄积量遥感预测模型,并验证其精度及适应性评价,旨在进一步提高和完善森林蓄积量遥感监测体系、模型预测精度及稳定性。

1 研究区概况

三峡库区西起重庆市区,东至湖北省宜昌市宜陵区,地理坐标为 106°14' ~ 111°28'E、28°56' ~ 31°44'N,全长 660 km,总面积 5.8 万 km²^[11]。库区可分为东部的大巴山—巫山山区和西部的渝东平行岭谷区两部分,山地和丘陵面积占全区总面积的 96% 以上^[12],库区海拔跨度较大。库区地处中纬度地区,受副热带东、西季风环流控制,全年气候季节性变化明显;同时库区地形起伏显著,使区内气候具有明显的垂直变化特征。三峡库区属亚热带常绿、落叶和针阔混交林区。库区针叶林所占森林面积最大,针叶树种主要有马尾松 (*Pinus massoniana*)、柏木 (*Cupressus funebris*) 和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*); 落叶阔叶树以栎属 (*Quercus*)、枫香 (*Liquidambar formosana*) 和刺槐 (*Robinia*

pseudoacacia) 为主;常绿阔叶林中石栎 (*Lithocarpus glaber*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 和栲 (*Castanopsis fargesii*) 所占比重较大^[13]。截至 2010 年,三峡库区森林面积 250.86 万 hm²,森林覆盖率达到 43.50%,活立木总蓄积量为 1 亿 2 505.18 万 m³,其中森林蓄积量 1 亿 1 836.59 万 m³^[14]。

2 材料与方法

2.1 数据获取与预处理

三峡库区森林蓄积量遥感定量估测研究的基础资料如下。

1) 森林资源一类清查数据:获取重庆市 2007 年和湖北省 2009 年森林资源一类清查的样地数据,均为 667 m² 的方形样地,包括样地号、样地类型、地形图幅、GPS 横坐标、GPS 纵坐标、株数、郁闭度、优势树种、平均树高、平均胸径、坡位、坡度、坡向、海拔等。根据样地 GPS 定位坐标,将不属于研究区的点剔除,在 GIS 中生成研究区样地点状矢量图层。

2) 遥感数据:综合考虑了时相、季相、云量和与一类清查数据的匹配性,共选取 2009—2010 年覆盖三峡库区的 9 景 TM 遥感影像,空间分辨率为 30 m,采用 PCI 9.1 对影像数据进行正射校正,均方根误差控制在 1 个像元之内。利用 ENVI 4.7 对影像进行波段组合、图像镶嵌与裁剪等预处理,以满足森林蓄积量遥感定量估测分析需要。

3) 其他的地面辅助资料包括:三峡库区行政边界、长江三峡工程生态与环境监测公报(2011)和覆盖研究区的 2 景 DEM 数据(分辨率为 25 m,西安 80 投影坐标)。

2.2 特征变量选取

根据已有研究,对单波段进行线性和非线性组合,可以在不同程度上增强植被信息或抑制非植被信息,选取包括单波段、植被指数、波段运算组合和缨帽变换等在内的遥感信息作为备选自变量^[15]。此外,林木的生长还受环境因素的制约,因此还选取了地学信息和郁闭度信息作为备选自变量进行分析。文中共选取包含遥感、地形和样地信息的 23 个特征因子作为备选变量(表 1),利用 ERDAS 和 ArcGIS 提取对应样地点的各变量指标的值,然后再筛选出与森林蓄积量密切相关的特征参数,进而完成对森林蓄积量的遥感估测。

对一类清查样地数据,运用标准差分析方法进行筛选,剔除各遥感因子、GIS 因子和郁闭度中 $|x_{ij} - \bar{x}_j| > 2\sigma_j$ 的样本数据,其中 x_{ij} 为第 i 个样本第 j 个变量的测量数据, \bar{x}_j 为第 j 个变量的样本平均值, σ_j 为第 j 个变量的样本标准差。剔除异常样本数据

后得到 1 470 个总样本用于建模和检验,在 SPSS 18.0 中随机抽取总样本的 60% ~ 70% 作为建模样本,即 979 个,余下 491 个为检验样本。借助 SPSS 软件采用逐一分析各备选变量与样地蓄积量之间的

相关系数,从相关系数的大小和显著性水平,并考虑到因子之间的多重共线性后综合决定最后用于 PLS 回归模型构建的自变量。

表 1 森林蓄积量遥感估测模型备选变量
Tab.1 Independent variables for forest volume estimation model

备选变量	计算公式或说明
单波段	X_1 TM1
	X_2 TM2
	X_3 TM3
	X_4 TM4
	X_5 TM5
	X_6 TM7
植被指数	X_7 (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)
	X_8 TM4/TM3
	X_9 TM4 - TM3
波段运算	X_{10} TM4/TM2
	X_{11} TM7/TM3
	X_{12} TM3/TM1
	X_{13} TM3/TM5
	X_{14} TM4 × TM3/TM2
	X_{15} TM4 × TM3/TM7
缨帽变换	X_{16} (TM4 + TM5 - TM2)/(TM4 + TM5 + TM2)
	X_{17} 0.303 7TM1 + 0.279 3TM2 + 0.434 3TM3 + 0.558 5TM4 + 0.508 2TM5 + 0.186 3TM7
	X_{18} -0.284 8TM1 - 0.243 5TM2 - 0.543 6TM3 + 0.724 3TM4 + 0.084 0TM5 - 0.180 0TM7
地形因子	X_{19} 0.150 9TM1 + 0.197 3TM2 + 0.327 9TM3 + 0.340 6TM4 - 0.711 2TM5 - 0.457 2TM7
	X_{20}
	X_{21} 从 DEM 数据提取
	X_{22}
样地信息	X_{23} 从一类清查样地数据提取

注:TM1 ~ TM5、TM7 代表波段 1 ~ 5 和波段 7 的 DN 值; X_7 为归一化植被指数 (NDVI), X_8 为比值植被指数 (RVI), X_9 为差值植被指数 (DVI); X_{17} 、 X_{18} 、 X_{19} 分别为缨帽变换的亮度分量 (B)、绿度分量 (G) 和湿度分量 (W), X_{20} 、 X_{21} 、 X_{22} 分别为海拔、坡度和坡向, X_{23} 为郁闭度。下同。

2.3 偏最小二乘回归方法

偏最小二乘回归是一种先进的多元回归分析方法,它将典型相关分析、主成分回归分析、多元回归分析的有机地结合在一起,通过主成分的提取,能有效地解决模型变量间存在的多重相关性、噪声及变量多的问题,使建立的 PLS 回归模型比一般的回归模型更合理可靠^[16-20]。本文仅涉及单因变量偏最小二乘回归方法,其基本思路详见文献[16]。本研究在 MATLAB 软件中编程实现 PLS 回归过程,最佳成分个数通过交叉有效性分析确定。

2.4 模型评价

利用预留独立验证样本,绘制森林蓄积量预测值与实测值间的线性拟合曲线,进行模型精度检验

和适应性评价,采用调整决定系数 (R^2)、误差平均值 (AE)、均方根误差 (RMSE)、总预报偏差的相对误差 (RE) 为评价指标。计算公式如下:

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

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RE = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中: y_i 为蓄积量实测值, \hat{y}_i 为蓄积量模型预测值, \bar{y} 为蓄积量实测样本平均值, n 为检验样本数。

3 结果与分析

3.1 特征变量与蓄积量间的相关分析

通过相关性分析得到与样地蓄积量存在极显著关系的15个入选自变量(表2),其中: X_{23} (郁闭度)与 V (样地蓄积量)关系最密切,相关系数达到0.679;其次是 X_1 (TM1)、 X_2 (TM2)、 X_3 (TM3)、 X_5 (TM5)、 X_6 (TM7)、 X_{17} (B)、 X_{19} (W),相关系数均

在0.3以上。入选的15个变量中多数变量两两之间存在严重的多重相关性,特别是 X_1 (TM1)与 X_2 (TM2)、 X_2 (TM2)与 X_3 (TM3)、 X_3 (TM3)与 X_6 (TM7)、 X_5 (TM5)与 X_6 (TM7)、 X_5 (TM5)与 X_{17} (B)、 X_6 (TM7)与 X_{19} (W)、 X_{11} (TM7/TM3)与 X_{19} (W),其相关系数均达到0.85以上。因此利用偏最小二乘回归方法构建蓄积量模型可以获得较好的预测结果。

表2 入选变量与样地蓄积量的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between independent variables and forest volume

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_{11}	X_{14}	X_{17}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{23}
V	-0.319**	-0.374**	-0.346**	-0.163**	-0.351**	-0.334**	0.149**	0.147**	-0.220**	-0.144**	-0.348**	0.303**	0.273**	0.118**	0.679**
X_1	1	0.886**	0.835**	0.155**	0.526**	0.603**	-0.551**	-0.559**	0.088**	0.165**	0.625**	-0.389**	-0.439**	-0.126**	-0.315**
X_2	0.886**	1	0.907**	0.330**	0.708**	0.752**	-0.464**	-0.456**	0.275**	0.159**	0.786**	-0.552**	-0.301**	-0.120**	-0.322**
X_3	0.835**	0.907**	1	0.186**	0.716**	0.857**	-0.630**	-0.604**	0.331**	0.269**	0.741**	-0.674**	-0.223**	-0.173**	-0.339**
X_4	0.155**	0.330**	0.186**	1	0.645**	0.351**	0.627**	0.639**	0.459**	0.522**	0.765**	-0.267**	0.108**	0.065**	-0.124**
X_5	0.526**	0.708**	0.716**	0.645**	1	0.904**	-0.054**	-0.024	0.787**	0.442**	0.954**	-0.886**	0.037	-0.024	-0.294**
X_6	0.603**	0.752**	0.857**	0.351**	0.904**	1	-0.382**	-0.346**	0.758**	0.356**	0.837**	-0.929**	0.002	-0.087**	-0.314**
X_7	-0.551**	-0.464**	-0.630**	0.627**	-0.054**	-0.382**	1	0.970**	0.106**	0.207**	0.014	0.304**	0.263**	0.168**	0.166**
X_8	-0.559**	-0.456**	-0.604**	0.639**	-0.024	-0.346**	0.970**	1	0.146**	0.213**	0.038	0.266**	0.296**	0.173**	0.177**
X_{11}	0.088**	0.275**	0.331**	0.459**	0.787**	0.758**	0.106**	0.146**	1	0.325**	0.643**	-0.853**	0.278**	0.037	-0.177**
X_{14}	0.165**	0.159**	0.269**	0.522**	0.442**	0.356**	0.207**	0.213**	0.325**	1	0.491**	-0.286**	0.085**	-0.015	-0.163**
X_{17}	0.625**	0.786**	0.741**	0.765**	0.954**	0.837**	0.014	0.038	0.643**	0.491**	1	-0.723**	-0.045	-0.039	-0.303**
X_{19}	-0.389**	-0.552**	-0.674**	-0.267**	-0.886**	-0.929**	0.304**	0.266**	-0.853**	-0.286**	-0.723**	1	-0.111**	0.036	0.259**
X_{20}	-0.439**	-0.301**	-0.223**	0.108**	0.037	0.002	0.263**	0.296**	0.278**	0.085**	-0.045	-0.111**	1	0.249**	0.286**
X_{21}	-0.126**	-0.120**	-0.173**	0.065**	-0.024	-0.087**	0.168**	0.173**	0.037	-0.015	-0.039	0.036	0.249**	1	0.194**
X_{23}	-0.315**	-0.322**	-0.339**	-0.124**	-0.294**	-0.314**	0.166**	0.177**	-0.177**	-0.163**	-0.303**	0.259**	0.286**	0.194**	1

3.2 偏最小二乘回归模型

在MATLAB 2008a中按照偏最小二乘原理编写PLS回归源代码,计算得到偏最小二乘模型,建模提取的最佳成分个数为3个,还可得到原始变量的回归方程系数,据此可以写出偏最小二乘回归方程:

$$V = 3.1950 + 0.0067X_1 - 0.0172X_2 + 0.0016X_3 - 0.0046X_4 - 0.0084X_5 - 0.0001X_6 - 0.5739X_7 - 0.0806X_8 - 0.8336X_{11} - 0.0017X_{14} - 0.0039X_{17} + 0.0105X_{19} + 0.0009X_{20} - 0.0039X_{21} + 5.0166X_{23} \quad (5)$$

式中: V 为蓄积量, m^3 。

3.3 模型评价

利用式(5)预测独立样地的森林蓄积量,以蓄积量实测值为自变量,偏最小二乘回归模型预测值为因变量,建立 $Y = Ax + B$ 的一元线性回归方程,绘制蓄积量预测值与实测值的拟合曲线(图1),最优直线方程为 $Y = 0.508x + 1.334$, R^2 为0.525。

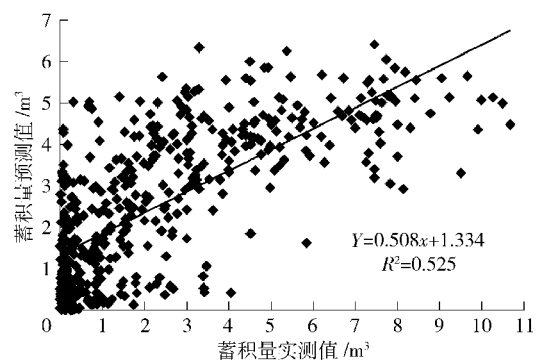


图1 样地蓄积量预测值与实测值的拟合曲线

Fig. 1 Scatter plot of the observed and estimated values for forest volume

为了评价偏最小二乘回归模型的优劣,采用逐步回归和主成分回归建立蓄积量预测模型,并根据公式(1)~(4)可以计算得到3种模型验证样本的 R^2 、AE、RE和RMSE(见表3)。一般来说,在回归模型中,调整 R^2 的取值范围为0~1,值越大则模型越

好,而均方根误差的值越小说明该模型越好。由表3可知,3种模型的相关系数(r)分别为0.724、0.567和0.724,调整 R^2 分别为0.524、0.320和0.524,即逐步回归和PLS回归模型的相关系数和调整 R^2 值大于主成分回归模型,说明主成分回归模型的效果不如逐步回归和PLS回归模型。进一步比较逐步回归和PLS回归模型,其AE为0.449和

0.173,RE为19.04%和7.33%,RMSE为 1.809 m^3 和 1.763 m^3 ,发现PLS回归模型预测值与实测值的误差均值、相对误差和误差均方根都比逐步回归的小很多,说明PLS回归模型比逐步回归更优。综上所述,认为偏最小二乘回归模型是3种模型中预测能力最好的模型。

表3 3种建模方法的精度比较

Tab.3 Comparison in accuracy of three models

模型	实测值均值/ m^3	预测值均值/ m^3	r	调整 R^2	AE/ m^3	RE/%	RMSE/ m^3
逐步回归	2.358	2.807	0.724	0.524	0.449	19.04	1.809
主成分回归	2.358	2.179	0.567	0.320	0.179	7.59	2.095
偏最小二乘回归	2.358	2.531	0.724	0.524	0.173	7.33	1.763

3.4 基于PLS回归的森林蓄积量估测

依据上述分析,首先对遥感影像进行判读得到三峡库区林地掩膜图,然后基于TM影像和DEM图像生成15个自变量的栅格图像,再在ERDAS Imagine软件中调用Model maker模块,利用构建好

的偏最小二乘回归模型,结合特征影像,预测整幅影像各像元的蓄积量。在此基础上,通过林地掩膜去掉非林地数据后,得到三峡库区森林蓄积量遥感预测图(图2)。

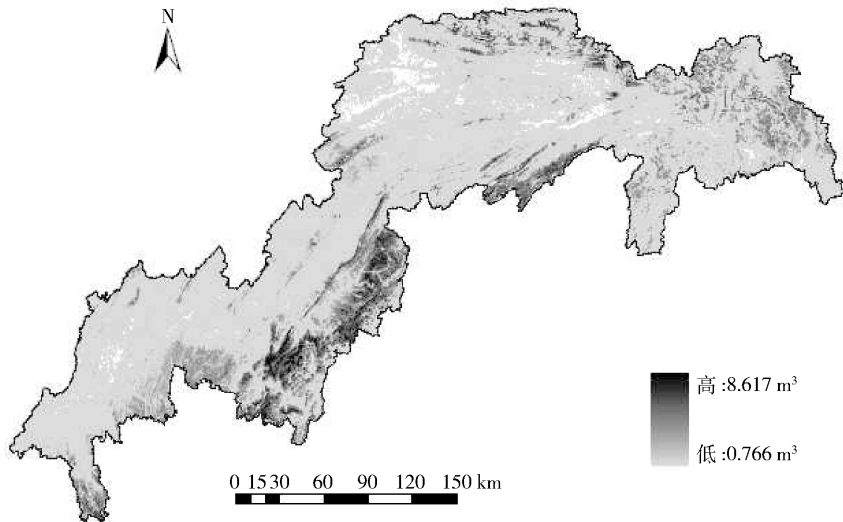


图2 三峡库区森林蓄积量预测图

Fig.2 Predicting map of forest volume in Three Gorges Reservoir Region

区域平均森林蓄积量(地区总蓄积量与地区土地总面积的比值)的高低,是区域生态环境质量优劣的重要指标。图3为2010年三峡库区单位面积蓄积量的分布情况,分析发现,单位面积平均森林蓄积量主要分布在 $45\sim 90\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 范围内,而大于 $90\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的实际区域很少,并且研究区域面积较大,所以很难直接在分级专题图上看出来。统计得到单位面积蓄积量的最大、最小值分别为 $129.26\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $11.49\text{ m}^3/\text{hm}^2$,并计算出三峡库区森林总蓄

积量为1亿1201万6426.70 m^3 。

进一步对2010年三峡库区森林总蓄积量预测结果进行精度检验(表4)。以长江三峡工程生态与环境监测公报(2011)的2010年蓄积量数据为实测值^[14],基于偏最小二乘回归的蓄积量预测值为判读值,比较森林面积和蓄积判读因子的误差。

由表4可以看出,遥感影像森林面积的判读误差为8.06%,总体精度达到91.94%,森林蓄积量的判读误差为10.42%,精度达到89.58%。

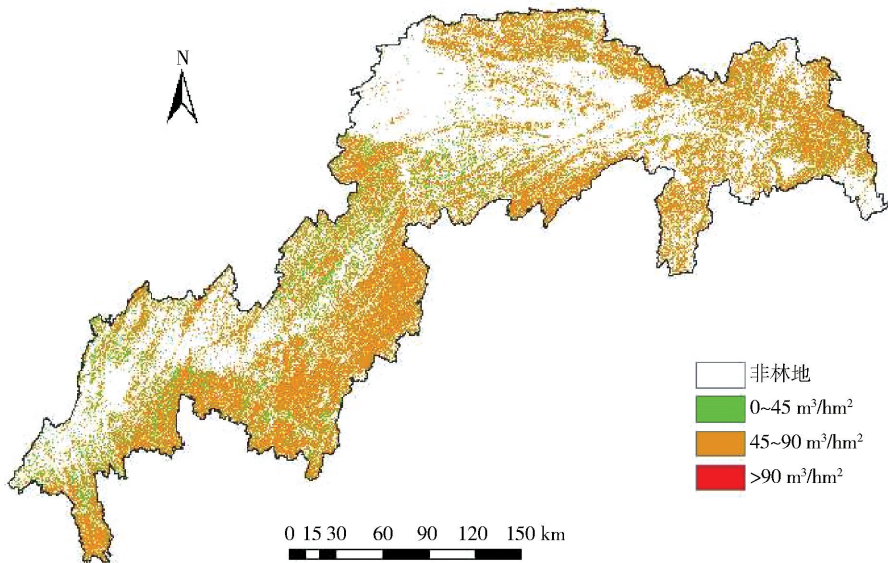


图3 三峡库区森林蓄积量密度

Fig. 3 Forest volume density in Three Gorges Reservoir Region

表4 三峡库区森林面积和蓄积判读误差比较

Tab. 4 Error comparison of total forest area and volume in Three Gorges Reservoir Region

项 目	森林面积/hm ²	活立木总蓄积/m ³
长江三峡工程生态与环境监测公报(2011)	2 508 600.00	125 051 800.00
判读结果	2 710 910.00	112 016 426.70
相对误差	202 310.00	13 035 373.00
误差百分比/%	8.06	10.42

4 结论与讨论

以TM数据为主要信息源,研究了基于逐步回归、主成分回归和偏最小二乘回归的三峡库区森林蓄积量遥感估测方法。得到的主要结论如下:

1) 利用相同的建模样本数据和检验数据,采用逐步回归、主成分回归和偏最小二乘回归方法进行了森林蓄积量遥感预测模型的建模实验。独立样本检验结果表明,逐步回归模型的相对误差最大,主成分回归模型次之,而偏最小二乘回归模型的相对误差最小,其相对误差小于10%。逐步回归模型中保留下来的变量较少,易造成遥感信息利用不充分,导致模型的估测效果较差。主成分回归方法可以消除模型中自变量多重相关性的影响,但对于未经训练的新数据,其泛化能力较差,预测值存在负值的情况,从而导致模型的估测精度不可靠。偏最小二乘回归吸收了主成分分析与典型相关分析的成分提取方法,不受人的主观控制,运算更灵活方便,预测精度也较高。在实际应用中,当自变量噪音较多时,宜

选用偏最小二乘回归方法建模。

在建模方法上,文中采用的是经验模型中比较常见的几种线性方法,且建模的遥感信息特征主要选择的是光谱信息。在以后的研究中,可以加入纹理特征、其他影像变换等信息,利用神经网络、支持向量机等非线性方法构建森林蓄积量估测模型,采用多种算法进行对比分析,选择更好的模型模拟方法,提高大尺度范围的森林蓄积量模型的估测精度。

2) 对三峡库区森林总蓄积量进行了较为准确的估测,得出2010年库区森林总蓄积量为1亿1201万6426.70 m³。与2011年长江三峡工程与生态环境监测公报上统计的2010年三峡库区活立木总蓄积量进行蓄积误差比较分析可知,总体平均精度达到89.58%,说明利用该PLS回归模型预测森林蓄积量是可行的。研究结果为利用3S准确估测大尺度范围的森林蓄积量提供了一种有效的途径。

参 考 文 献

- [1] TROTTER C M, DYMOND J R, GOULDING C J. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(10): 2209-2223.
- [2] FRANCO-LOPEZ H, EK A R, BAUER M E. Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the *k*-nearest neighbors method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77(3): 251-274.
- [3] 冯仲科, 杨伯钢, 罗旭, 等. 应用LIDAR技术预测林分蓄积量 [J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(增刊2): 45-51.
- [4] NELSON R, KRABILL W, TONELLI J. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(2): 247-267.

- [5] 张友静,方有清,陈钦峦. 南方山地森林蓄积量遥感估算研究[J]. 国土资源遥感,1993(2):39-47.
- [6] TOMPPA E, NILSSON M, ROSENGREN M, et al. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1CWiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(1):156-171.
- [7] 琚存勇,蔡体久. 用泛化改进的BP神经网络估测森林蓄积量[J]. 林业科学,2006,42(12):59-61.
- [8] WIJAYA A, KUSNADI S, GLOAGUEN R, et al. Improved strategy for estimating stem volume and forest biomass using moderate resolution remote sensing data and GIS[J]. Journal of Forestry Research, 2010, 21(1):1-12.
- [9] 杜晓明,蔡体久,琚存勇. 采用偏最小二乘回归方法估测森林郁闭度[J]. 应用生态学报,2008,19(2):273-277.
- [10] 洪奕丰,林辉,严恩萍,等. 基于偏最小二乘法的平南县森林蓄积量估测模型研究[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(7):80-85.
- [11] 张宝雷,周万村,周启刚,等. 基于RS和GIS的三峡库区林地变化及气候响应研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(4):62-66.
- [12] 刘晔,沈泽昊. 长江三峡库区昆虫丰富度的海拔梯度格局:气候、土地覆盖及采样效应的影响[J]. 生态学报,2011,31(19):5663-5675.
- [13] 曾立雄,王鹏程,肖文发,等. 三峡库区主要植被生物量与生产力分配特征[J]. 林业科学,2008,44(8):16-22.
- [14] 长江三峡工程生态与环境监测公报:2011[R]. 北京:中华人民共和国环境保护部,2011:14-15.
- [15] 李崇贵,赵宪文. 遥感区域大小对森林蓄积估测影响规律的研究[J]. 北京林业大学学报,2001,23(4):29-34.
- [16] 王惠文,吴载斌,孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006:97-127.
- [17] QIN S J. RECURSIVE PLS algorithms for adaptive data modeling [J]. Computers & Chemical Engineering, 1998, 22(4/5):503-514.
- [18] WOLD S, SJÖSTRÖM M, ERIKSSON L. PLS_regression: A basic tool of chemometrics [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2):109-130.
- [19] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3):偏最小二乘回归与PLS过程[J]. 数理统计与管理,2002,21(2):58-64.
- [20] 谭昌伟,王纪华,黄文江,等. 基于TM和PLS的冬小麦籽粒蛋白质含量预测[J]. 农业工程学报,2011,27(3):388-392.

(责任编辑 冯秀兰)