

旺业甸实验林场针叶林蓄积量估测模型的研究

张 凝¹, 冯仲科¹, 冯跃文², 樊江川¹

(1. 北京林业大学 测绘与 3S 技术中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要: 蓄积量是森林资源监测的一个重要指标, 而蓄积量遥感估测一直是林业遥感研究的重要内容之一。采用 Landsat-TM 数据为遥感信息源, 提取各个波段的差值以及比值组合信息、影像各波段灰度值以及植被指数, 并利用 DEM 数据提取坡度和坡向数据。以内蒙古赤峰市旺业甸林场针叶林为研究对象, 分析 RS 和 GIS 因子与蓄积量的相关性, 利用 SPSS 分析工具建立像元蓄积量与 RS 和 GIS 因子之间的非线性估测模型。模型精度达到 76.16%, R 为 0.726, 对其适用性进行 F 检验, 在 0.01 显著性水平下满足要求。

关键词: 森林资源监测; 针叶林蓄积量; 遥感估测; 像元蓄积量; 相关分析; 精度检验

中图分类号: S758.5⁺1; S771.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2013)11-0083-05

Research on coniferous forest volume estimation model for Wangyedian experimental forest farm

ZHANG Ning¹, FENG Zhong-ke¹, FENG Yue-wen², FAN Jiang-chuan¹

(1. 3S Technical Centre, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Volume of forest resources monitoring is one of the important targets, and volume of remote sensing estimation has been one of the important contents of forestry remote sensing researches. By using Landsat-TM data as remote sensing information source, the differences among different bands and ratios combination information were extracted, the gray values and vegetation indexes of band images were also extracted, and the slope gradient and slope aspect data were extracted by using the DEM data. By taking the coniferous forest in Chifeng city in Inner Mongolia as the research object, the correlations of RS and GIS factors and volume were analyzed and the nonlinear estimation models between pixel volume and RS and GIS factors were established by using SPSS analysis tools. The experimental results show that the model accuracy reached 76.16%, R value was 0.726, the applicability F test was done, which was at 0.01 significant level, the model accuracy met the requirements.

Key words: forest reserves monitors; coniferous forest volume; remote sensing estimation; pixel volume; correlation analysis; accuracy test

林分中全部林木的材积称为林分的蓄积量, 简称为蓄积。林分蓄积量的增减变化是森林资源监测的一个重要内容, 是林业经营的重要决策依据。通常对森林蓄积量的测定方法可以概括为实测法和目测法两大类。实测法又可以分为全林实测和局部实测。在实际工作中, 多采用局部实测的方法, 根据调查目的, 采用典型选择样地标准地进行实测, 然后按面积比例扩大推算全体蓄积。在遥感和 GIS 技术支持下, 分析影像林分蓄积量的诸多因子, 通过 RS 以及 GIS 技术, 结合少量地面调查资料, 建立以像元为单位的森林蓄积量估测模型, 达到减少地

面调查工作量, 能实现快速、准确进行森林蓄积量的估测和预报。通常在进行森林蓄积量模型估测中, 采用多元回归分析和人工神经网络及其衍生方法建立相对应的线性模型^[1-2]。本文中以旺业甸林场针叶林为研究对象, 结合实地数据和 RS 以及 GIS 因子, 采用遥感和多元回归分析技术, 构建林场针叶林蓄积量非线性估测模型, 以减少实地测量数据工作量, 提高蓄积量估测精度。

1 研究区概况

喀喇沁旗旺业甸实验林场位于内蒙古赤峰市

收稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAH34B01) “亚太森林恢复与可持续管理网络”; 旺业甸林场多功能林业试点示范项目

作者简介: 张 凝 (1987-), 女, 河北人, 硕士生, 主要研究方向: 3S 技术在资源环境中的应用; E-mail: ZNYZ@126.com

通讯作者: 冯仲科 (1962-), 男, 甘肃人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 精准林业, 林业 3S 技术应用;

E-mail: fengzhongke@126.com

喀喇沁旗西南部, 是一个集森林经营、木材加工、苗木生产、旅游开发于一体的综合性实验林场, 为内蒙古赤峰市重点国有林场之一。

旺业甸林场属燕山山脉北麓七老图山支脉, 东经 $118^{\circ}09' \sim 118^{\circ}30'$, 北纬 $41^{\circ}21' \sim 41^{\circ}39'$, 为茅荆达坝次生林区之一部分, 是喀喇沁母亲河——锡伯河的发源地。属温带季风气候, 冬季漫长寒冷, 夏季温热短暂, 气温变化剧烈, 日照时间在 2 700 h 以上。森林植被主要以油松 *Pinus tabulaeformis*、落叶松 *Larix gmelinii* 以及山杨 *populus*、白桦 *Betula platyphylla*、蒙古栎 *Quercus mongolica* 等为主。林场土地总面积为 25 958 hm^2 , 有林地面积为 23 118 hm^2 , 活立木总蓄积达 128 万 m^3 。

2 材料与方法

2.1 研究区数据及资料获取

2.1.1 样地实测数据

地面实测数据采用旺业甸林场样地数据。调查时间为 2012 年 6 月, 在林场内布设多边形样地, 每块样地实测 9 棵典型树木, 获取其坐标、树高、胸径、冠幅等信息。此次实地测量共选取基本覆盖林场的 201 块样地, 经整理后得到每块样地的属性, 包括坐标、高程、树木平均高、平均胸径、蓄积量、林分密度等。

2.1.2 Landsat-TM 数据及其他资料

考虑到 2 年内树木生长情况变化幅度对 2 年内蓄积量影响较小, 故而在 <http://glcfapp.glc.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> 网站获取 2010 年 7 月 Landsat-TM 数据。以 1 : 5 万地形图为准采集控制点, 采用多项式法进行几何校正, 得到旺业甸地区的 TM 影像范围 (见图 1)。同时获取旺业甸林场土地二调数据生成样地点 DEM。

2.2 研究方法

2.2.1 蓄积量估测变量设置

蓄积量很大程度上由一系列定性和定量因子综合反映而得到, 在森林利用价值估计等方面有很大贡献。同时, 遥感影像中各像元对应的灰度值是地物在影像上所反映不同深浅色调的灰度, 它是应用遥感技术对地物进行研究的基本数据, 可以合理的估测蓄积量^[3]。同一地理位置的不同波段像元灰度值的比值、差值等也是研究地物的重要因子。前人利用遥感影像的像元灰度值和林分立地条件等因子对林木蓄积量进行了大量研究, 并取得显著成效。

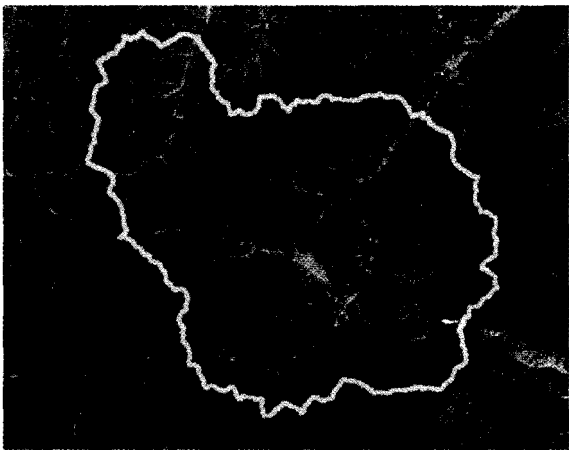


图 1 旺业甸林场覆盖区域 TM 影像
Fig.1 TM image of Wangyedian forest farm

本研究在借鉴前人研究的基础上, 选择用于构建蓄积量估测模型的备选变量, 具体包括通过遥感技术所提取的可选定量变量和林分立地条件变量。设置 RS 可选定变量: TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM7、TM4/TM3 (RVI)、TM1/TM3、TM1/TM4、TM1/TM5 等波段灰度值和比值组合以及 (TM4-TM3) / (TM4+TM3) (NDVI)、TM4-TM3 (DVI) 等波段灰度值差值组合。同时设置林分立地条件: 坡度和坡向^[4]。

表 1 变量因子
Table 1 Variable factors

因子编号	因子变量	因子编号	因子变量	因子编号	因子变量
X_1	TM1	X_6	TM7	X_{11}	坡向
X_2	TM2	X_7	NDVI	X_{12}	TM1/TM3
X_3	TM3	X_8	RVI	X_{13}	TM1/TM5
X_4	TM4	X_9	DVI	...	...
X_5	TM5	X_{10}	坡度		

2.2.2 遥感图像处理

利用 ERDAS 9.2 对覆盖林场的 TM 进行拼接、几何校正及图像增强处理, 利用 Interpreter 模块下的 Spectral Enhancement 功能提取归一化植被指数 (NDVI)、比值植被指数 (RVI)、差值植被指数 (DVI) 以及 Sqrt (RVI), 并利用软件的代数运算功能提取各个波段的影像各波段灰度值 (TM1-TM5、TM7 波段)、差值以及比值组合信息。

将处理好的图像在 ARCGIS 10 中加载, 并将外业实测获取的样地点坐标同时加载到 ARCGIS, 利用 Sample 功能采样样地点的各个 RS 因子数据。其次, 在 ARCGIS 中利用二调数据获取的 DEM 提取样地点相对应的坡度和坡向值。图 2 为部分因子的提取图像。

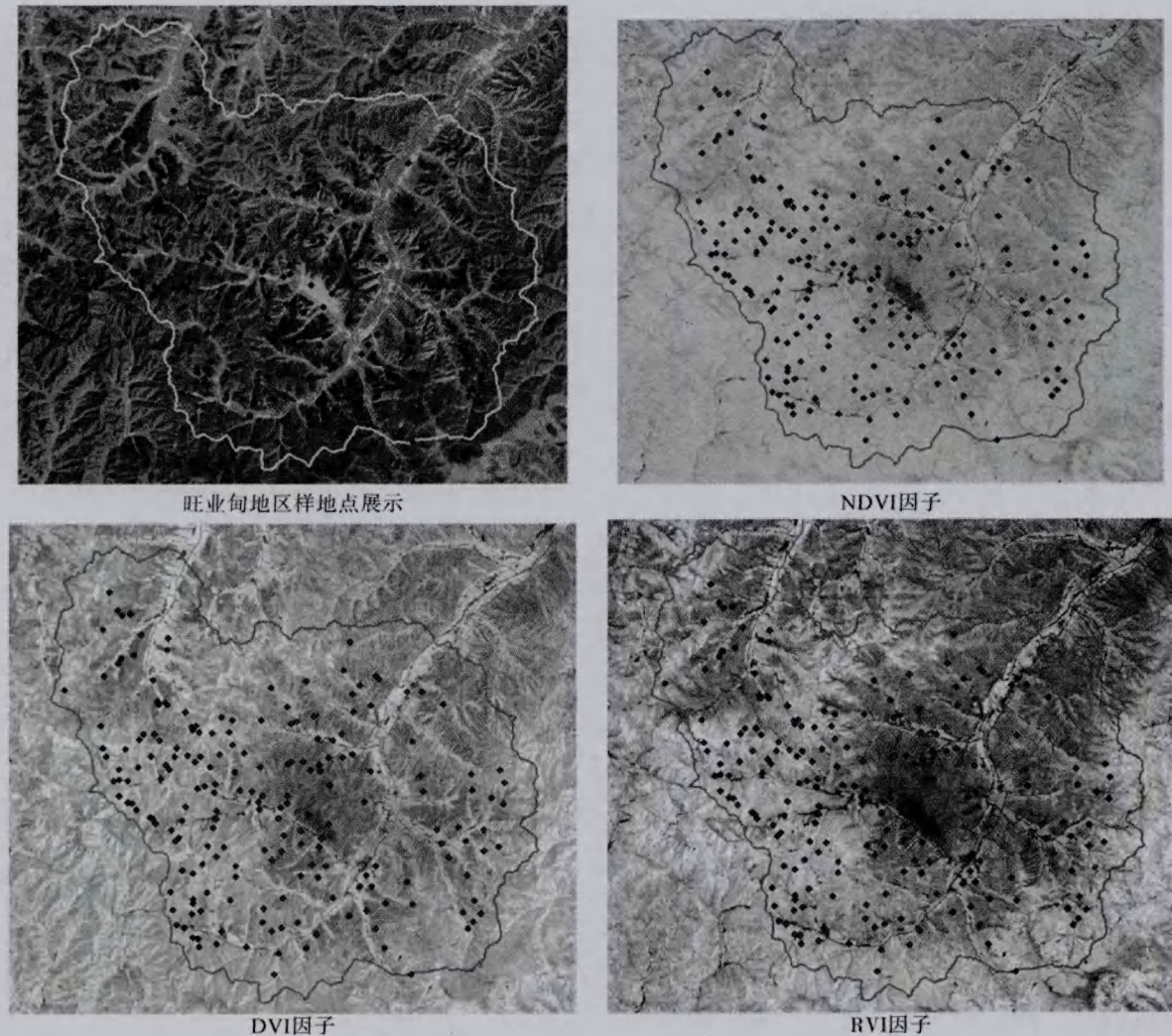


图 2 样地点部分 RS 因子提取图像
Fig. 2 Parts of RS images of sampling locations' RS-factors extracted

2.3 蓄积量模拟方程构建

结合实测以及遥感影像数据提取得到的 RS 和 GIS 因子数据和前人研究，大多数研究建立的森林蓄积量模型都为多元线性模型，本文中拟建立有关蓄积量以及 RS 和 GIS 因子的多元非线性模型，以达到利用较多可用数据实现更为准确的森林蓄积量估测的目的，同时为遥感蓄积量估测提供一种新的计算模型。

2.3.1 原始数据处理及数据筛选

基于数据采集、信息提取时数据误差的存在，对 201 块样地数据进行分析，同时对得到的 RS 以及 GIS 因子数据进行调整。

2.3.1.1 坡度数据量化分级

由 DEM 得到的坡度数据较为零散，没有统一进行量化，按旺业甸林场提取的坡度数据范围，将其按 $0^{\circ} \sim 14.190^{\circ}$ 、 $14.191^{\circ} \sim 27.704^{\circ}$ 、 $27.705^{\circ} \sim 44.259^{\circ}$ 、 $44.260^{\circ} \sim 86.152^{\circ}$ 划分为 4 个等级并

分别赋值为 1 ~ 4（见表 2）。

表 2 坡度划分及取值
Table 2 Division of slope gradient and values

坡度范围	取值	坡度范围	取值
$0^{\circ} \sim 14.190^{\circ}$	1	$27.705^{\circ} \sim 44.259^{\circ}$	3
$14.191^{\circ} \sim 27.704^{\circ}$	2	$44.260^{\circ} \sim 86.152^{\circ}$	4

2.3.1.2 坡向数据量化分级

由于植物生长受到光合作用的影响较大，那么对蓄积量的估测时坡向因子必须考虑在内。由于 ArcGIS 中获得的坡向数据不能很好地反映坡向的定性特性，将坡向定性分为：阴坡（包括东坡、北坡、东北坡和西北坡）、阳坡（南坡、西坡、东南坡和西南坡）、全坡 3 类，并对提取数据进行数量化^[5-6]（见表 3）。

2.3.1.3 实测蓄积量数据处理

由于 TM 影像获取的波段灰度值均以像元为单位，为避免单位差异造成的系数超限现象，对

表 3 坡向分类及取值
Table 3 Classification and slope aspect and theirs values

坡向	方位角	蓄积估测坡向	取值
北坡	338° ~ 22°	阴坡	1
东坡	23° ~ 67°	阴坡	1
东北坡	68° ~ 112°	阴坡	1
西北坡	293° ~ 337°	阴坡	1
南坡	158° ~ 202°	阳坡	2
西南坡	113° ~ 157°	阳坡	2
东南坡	203° ~ 247°	阳坡	2
西坡	248° ~ 292°	阳坡	2
全坡	无坡向 (提取值为 -1)	全坡	3

实测样地点的蓄积量进行处理, 得到对应样地点的像元蓄积量 (即单位转换)。

2.3.1.4 数据筛选

利用 3 倍标准差法对样本的差异数据进行筛选。即凡满足 $|X_i - \bar{X}| > 3\delta$ (δ 为样本的标准偏差, X_i 为样本数据值, $\bar{X}$ 为样本平均值) 的数据给予剔除, 筛选出的数据基本无异常, 用于林场森林分蓄积量模型的构建^[7]。

在 201 块样地中, 提取出 129 块针叶林样地点, 经过 3 倍标准差法的筛选, 得到 125 块有效数据用于模型构建, 同时对极度异常数据进行剔除, 最后选取能够覆盖林场的 90 块样地数据进行模型的拟合, 并用剩余的 30 块样地进行精度检验。

2.3.2 自变量因子的确定

由于提取的 RS 因子较多, 首先采用相关分析对所有提取的 RS 变量进行其与像元蓄积量的相关性分析 (偏相关分析), 剔除相关性小的 RS 变量, 得到参与模型构建的 RS 变量因子: NDVI、DVI、RVI、TM2、TM3、TM4、TM5、TM7。

为有效提高拟合模型的精度, 同时减少后续处理的误差, 对分析得到的 8 个 RS 变量因子分别与像元蓄积量在 SPSS 中进行曲线拟合, 以确定其参与最终模型建立的具体形式。

根据曲线拟合结果中 R^2 以及显著性分析, 最终确定: NDVI 以二次方程参与最终方程拟合 ($R=0.669$, $R^2=0.448$, $\text{sig}=.000 < 0.05$), DVI 以二次方程形式参与模型建立 ($R=0.473$, $R^2=0.223$, $\text{sig}=.000 < 0.05$), RVI 以三次方程形式参与拟合 ($R=0.671$, $R^2=0.451$, $\text{sig}=.000 < 0.05$), TM3、TM7 分别以对数和二次方形式参与拟合, 其余变量由于曲线拟合中显著性不满足要求, 均采用线性形式参与最终模型的建立。

2.3.3 蓄积量模型的构建

对偏相关分析得到的 16 个 RS 变量用逐步回归的方法与像元蓄积量进行拟合, 同时 2 个量化的 GIS 因子采用强行进入参与方程构建^[7], 本研究最终拟合方程为:

$$Y=6.111+186.856X_7-251.080X_7^2-0.004X_9^2+0.953X_8^2+0.109X_1-28.284\text{Ln}X_3+0.851X_4-0.320X_5+0.600X_6-0.493X_{10}-0.087X_{11}。$$

式中: Y 为林场样地点像元蓄积量; NDVI、NDVI², ..., 坡度、坡向为各个变量值。对以上拟合方程进行初步精度检验, 得到模型的相关系数为 $R^2=0.526$ 。其各项参数如表 4 及 5 所示。

表 4 模型精度
Table 4 Accuracy of model

模型	R	R^2	调整 R 方	Sig
1	0.726a	0.526	0.461	0.000

表 5 模型方差分析
Table 5 Variance analysis

模型	平方和	df	均方	F	Sig
回归	893.234	11	81.203	7.572	0.000
残差	804.239	79	10.724		
总计	1697.527	90			

3 精度检验

研究选用构建模型使用样地以外的 30 块样地数据进行模型的精度以及适用性检验, 即将由 TM 影像以及 DEM 获取的相关 RS 以及 GIS 因子代入所拟合的蓄积量估测模型中, 得到估测蓄积量, 与实测样地的蓄积量进行比较分析, 检验模型的精度及模型适用性^[8]。

3.1 模型精度检验

对拟合方程进行精度检验, 公式为:

$$S=\frac{|\hat{Y}-Y|}{Y}\times 100\%;$$
$$\eta=1-\frac{|\hat{Y}-Y|}{Y}。$$

式中: S 为相对误差; η 为方程精度; $\hat{Y}$ 为拟合的蓄积方程估算的蓄积量; Y 为实测数据获取的蓄积量。

利用精度检验公式, 对 30 块样地进行检验, 结果如表 6 所示。

表 6 估测模型精度检验
Table 6 Accuracy test of estimating model

编号	像元蓄积量	预测蓄积量	误差	相对误差 /%	精度
1	12.75	13.77	-1.02	8.01	0.92
2	13.88	15.36	-1.48	10.65	0.89
3	10.00	12.75	-2.76	27.57	0.72
4	11.88	11.62	0.26	2.16	0.98
5	12.85	16.64	-3.79	29.53	0.70
6	7.89	8.97	-1.08	13.76	0.86
7	8.88	13.88	-5.01	56.39	0.44
8	13.49	13.78	-0.30	2.20	0.98
9	19.62	22.15	-2.53	12.89	0.87
10	7.18	8.69	-1.51	21.03	0.79
11	15.47	17.90	-2.43	15.68	0.84
12	9.43	9.09	0.34	3.59	0.96
13	4.36	4.34	0.01	0.28	1.00
14	4.81	3.93	0.88	18.32	0.82
15	9.91	13.07	-3.16	31.90	0.68
16	16.06	14.42	1.64	10.23	0.90
17	9.15	8.67	0.48	5.22	0.95
18	11.28	12.90	-1.61	14.31	0.86
19	6.23	8.41	-2.19	35.11	0.65
20	5.54	6.11	-0.57	10.00	0.90
21	2.69	3.61	-0.92	34.26	0.66
22	6.36	8.98	-2.63	41.37	0.59
23	4.25	6.22	-1.97	46.28	0.54
24	6.64	9.20	-2.56	38.48	0.62
25	7.57	16.05	-8.48	112.08	0.12
26	3.81	4.68	-0.86	22.63	0.77
27	5.68	6.18	-0.50	8.74	0.91
28	9.74	10.98	-1.24	12.70	0.87
29	15.07	12.26	2.82	18.68	0.81
30	5.62	8.48	-2.85	50.75	0.49

通过对表 6 进行分析, 编号为 7、25 和 30 的样地点信息误差较大, 其余检测样地点数据均达到 50% 以上, 为更好更直观地体现模型精度, 总结表 6 得到蓄积量估测精度结果 (见表 7)。

表 7 模型检验结果
Table 7 Model test results

精度	>90%	80%~90%	70%~80%	60%~70%	50%~60%	<50%
样地数	9	8	4	4	2	3
比重 /%	30	26.67	13.33	13.33	6.67	10

由表 7 分析可知, 精度达到 70% 的样地数为 25 块, 占检测样地总数的 83.33%, 平均精度达到 76.16%。那么说明文章拟合的蓄积量非线性模型精度达到要求, 能够较为准确地估测旺业甸林场针叶林的像元蓄积量。

3.2 模型适用性检验

结合拟合出的蓄积量方程和检验数据, 对

拟合方程进行适用性检验, 文章选用 F 检验, 公式^[9-10]为:

$$F = \frac{(n-2) \times (a \sum Y_i + b \sum X_i Y_i - 2 \sum X_i Y_i + \sum X_i^2)}{2 \sum Y_i^2 - a \sum Y_i + b \sum X_i Y_i}$$

F 检验是用实测值与预测值组成成对值, 建立线性回归方程。那么, 如果模型拟合得较好, 则常数项 a 和回归系数 b 就分别趋近于 0 和 1。利用本研究建立的模型所计算出来的林分蓄积量 (估测蓄积量) 作为自变量 X , 用实测数据的蓄积量作为因变量 Y , 拟合线性方程, 得到: $Y=0.352+0.828X$, 其相关系数 $R=0.886$ 。通过 F 检验, $F=0.605 < F_{0.01}(1,28)=7.64$, 结果表明, 在 0.01 显著性水平下, 模型拟合结果与实测结果无明显差异, 模型适用性较高。

4 结 论

文章采用林分立地条件因子 (GIS 因子)、波段灰度值、波段比值以及植被指数等 RS 因子对旺业甸林场针叶林相对应样地点的像元蓄积量进行遥感估测, 拟合基于 RS 和 GIS 因子的旺业甸林场针叶林像元蓄积量估测模型并进行了精度分析以及适应性检验, 最终得到以下结论:

(1) 由估测模型的方差分析表明, 所建立的估测模型估测精度为 76.16%, 能满足旺业甸林场针叶林蓄积量预测预报以及价值评估的生活需求, 可靠性较高。

(2) 模型适用性检验表明, 所建估测模型测算的林分蓄积量估测值与实测数据基本相符, 无显著差异, 能够适用于旺业甸林场针叶林蓄积量的基本估测, 满足生产实践的需求。

(3) 以像元为单位进行蓄积估测, 可绕过分类预报蓄积, 避免了分类精度限制对蓄积估测造成的不利影响。同时对 RS 及 GIS 提取因子而言, 不用进行相关数据的范围转换, 能够更精确地进行分析拟合, 提高了蓄积量的估测精度。

(4) 利用遥感和 GIS 因子建立像元蓄积量的非线性模型, 避免数据出现无线性关系时无法进行估测的现象, 同时为蓄积量模型估测提供了又一种思路, 并能够更好地将遥感信息结合到林业中来。

(5) 通过遥感技术建立林分蓄积量估测模型, 更好地利用遥感技术的实时、动态等特点, 同时避免了外业调查数据的误差以及环境限制, 实现蓄积量变化的实时监测, 为生产世间提高及时、高效、准确的蓄积量变化信息。

- forestry[J]. Journal of Environment Management, 1981,3(1):41-54.
- [14] Pearson G A. Multiple use in forestry [J]. Journal of Forestry, 1944, 42 (4):243-249.
- [15] 顾 丽. 金沟岭林场森林多功能效益评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [16] 张德成, 李智勇, 王登举, 等. 论多功能森林经营的两个体系 [J]. 世界林业研究, 2011,24(4):1-6.
- [17] 刘 莉, 刘国良, 陈绍志, 等. 以多功能为目标的森林模拟优化系统 (FSOS) 的算法与应用前景 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3067-3072.
- [18] 陈衍泰, 陈国宏, 李美娟. 综合评价方法分类及研究进展 [J]. 管理科学学报, 2004, 7(2):69-79.
- [19] 刘宪钊, 陆元昌, 刘 刚, 等. 基于层次分析法的多指标树种优势度的比较分析 [J]. 东北林业大学学报, 2009,37(7):39-41.
- [20] 许树柏. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [21] 何小群. 现代统计分析方法 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998:215-344.
- [22] Jacques Savoy. Statistical inference in retrieval effectiveness evaluation [J]. Information Processing and Management, 1997, 33(4):495-512.
- [23] 肖荣波, 周志翔, 王鹏程, 等. 武钢工业区绿地景观格局分析及综合评价 [J]. 生态学报, 2004,24(9):1924-1930.
- [24] 王思远, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感与 GIS 技术支持下的湖北省生态环境综合分析 [J]. 地球科学进展, 2002,17(3):426-431.
- [25] 蒋尚华, 徐南荣. 基于目标达成度和目标综合度的交互式多目标决策方法 [J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(1): 9-14.
- [26] 刘臣辉, 吕信红, 范海燕. 主成分分析法用于环境质量评价的探讨 [J]. 环境科学与理, 2011,36(3):183-186.
- [27] 王 原, 吴泽民, 张 浩, 等. 基于 RS 和 GIS 的马鞍山市分市区城市森林景观格局综合评价 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 3(4): 46-52.
- [28] 吴际友, 刘云国, 程 勇, 等. 岳阳市城市森林建设评价指标体系 [J]. 中南林业科技大学学报, 2007,27(6):159-162.
- [29] 刘君昂, 刘红娟. 森林健康评价方法与应用 [J]. 中南林业科技大学学报, 2009,29(6):197-200.
- [30] 谷晓萍, 殷 有, 于丽芬, 等. 棋盘山风景区森林风景资源质量评价研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010,30(3):46-52.
- [31] 孟宪宇. 测树学 [M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006: 49.

[本文编校: 谢荣秀]

(上接第 87 页)

参考文献:

- [1] 李崇贵, 斯 林, 赵宪文. 以“3S”为基础的森林蓄积动态监测系统研究 [J]. 林业科学研究, 2011,14(2):223-226.
- [2] 赵宪文, 李崇贵. 基于“3S”的森林资源定量估测 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [3] 袁凯先, 陈玉山, 包盈智, 等. 森林蓄积量的遥感估测 [J]. 林业资源管理, 1996,(13):13-17.
- [4] 郭雅丽, 陈 勇, 关 锐. 用“3S”技术估测森林蓄积量变量选择与优选 [J]. 科技资讯, 2007,(9):6.
- [5] 黄伟平, 谭三清, 张 贵, 等. 估测森林蓄积量的遥感因子选择研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010,30(04):112-115.
- [6] 蔡学成, 杨永彰. 基于中巴资源卫星数据的森林蓄积量估测研究 [J]. 安徽农业科学, 2007,35(34):10961-10962.
- [7] 董 斌, 冯仲科, 杜林芳, 等. 山东省黄河流域森林蓄积量遥感定量估测模型研究 [J]. 遥感技术与应用, 2010,(4):520-524.
- [8] 余坤勇, 林 芳, 刘 健, 等. 基于“3S”的闽江流域马尾松林分蓄积量估测模型研究 [J]. 福建林业科技, 2006,(1):18.
- [9] 何晓群. 多元统计分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- [10] James M, Lattin J, Douglas Carroll, *et al.* Analyzing Multivariate Data[M]. First published by Brooks/Cole, an imprint of Thomson Learning. United States of America: Brooks/Cole. 2007:45-46.

[本文编校: 谢荣秀]