

结合影像纹理、光谱与地形特征的森林结构参数反演

谢士琴¹ 赵天忠¹ 王威² 孟京辉³ 史京京²

(1. 北京林业大学信息学院, 北京 100083; 2. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714;

3. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: 以黑龙江省 SPOT5 遥感影像和森林资源清查数据为数据源, 获得对应样地的影像纹理特征、光谱波段值、光谱组合值以及地形信息, 提取样地调查数据的林分信息, 采用多元逐步回归分析, 建立以 SPOT5 遥感影像纹理、光谱和地形特征为自变量, 多个森林结构参数(林分平均直径、断面积、蓄积量和树种多样性指数)为因变量的估测模型, 筛选最优纹理特征生成窗口及最优森林结构参数反演模型。结果表明, SPOT5 影像的纹理光谱特征与森林结构参数具有较强的相关性, 9×9 窗口为最优纹理特征生成窗口; 在引入地形因子后模型精度有了较大提高, 树种多样性指数估测模型 R_{adj}^2 都在 0.72 以上, 蓄积量模型估测精度最优 (R_{adj}^2 为 0.864、RMSE 为 21.260 m³/hm²)。研究表明利用高分辨率遥感影像纹理、光谱和地形特征进行多个森林结构参数估测具有很好的应用效果。

关键词: 森林结构; 纹理特征; 光谱特征; 地形因子; 模型估测

中图分类号: S758.5; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)04-0125-10

Forest Structure Parameters Inversion Based on Image Texture and Spectral and Topographic Features

XIE Shiqin¹ ZHAO Tianzhong¹ WANG Wei² MENG Jinghui³ SHI Jingjing²

(1. College of Information, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. State Forestry Administration Survey Planning and Design Institute, Beijing 100714, China

3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the SPOT5 satellite images of Heilongjiang Province and national forest inventory data as data source, the image texture, spectral features and topographic information of the sample plots were obtained, forest information of sample plots survey data was extracted as the true value. Through multiple linear regression analysis, forest structural parameters (forest stand quadratic mean diameter, basal area, stand volume and species diversity index) estimation models were established by combination of texture, spectral features and topographic information as independent variables, so as to select the optimal texture feature generation window and the optimal forest structure parameter inversion model. The results indicated that the texture, spectral features of SPOT5 images and forest structure parameters had a strong correlation, and the 9×9 window was the optimal texture generation window; the accuracy of the model was greatly improved after introducing the topographic factor. The estimation model of tree species diversity index R_{adj}^2 was more than 0.72, and stand volume estimation model was the optimal model with R_{adj}^2 of 0.864 and root mean square error of 21.260 m³/hm². The study suggested that using high resolution satellite image texture, spectral and topographic features to estimate the forest structural parameters had good application prospect.

Key words: forest structure; texture features; spectral features; topographic factors; model estimation

引言

森林是陆地生态系统中最大的碳库, 为我们提

供生态服务的同时也带来了巨大的经济效益。大尺度森林结构参数的快速、准确估算是制定森林可持续经营措施的重要基础^[1]。森林结构参数, 如林分

平均胸径、蓄积量、断面积、树高、林木数量和树种多样性等,在一定程度上为森林经营,特别是人工林经营提供了决策依据^[2-3],在森林资源管理规划中的应用潜力巨大。上述森林结构参数的获取,存在劳动强度大、人财物力耗费高、调查周期长等缺点,传统的样地调查方法,并不能及时准确地反映大尺度森林结构多样性的状态及动态变化。遥感技术由于具有监测范围广、数据采集快速和节约成本等优点,现已被大量应用于森林组成及结构参数的提取。利用高分辨率遥感数据纹理、光谱信息与林分因子间较强的相关性估算森林结构参数,一直是国内外研究的热点,这些研究主要集中在以下方面:①不同森林结构参数反演,应用较为广泛的包括林分株数、树高、断面积、蓄积量、生物量、树种多样性指数、角尺度和混交度等^[4-10]。②不同遥感因子,主要包括遥感数据的纹理信息、光谱信息和衍生植被指数等^[11-12]。③不同模型方法,目前主要包括多元线性回归模型^[13]和人工神经网络模型^[14]。国际上基于遥感影像纹理、光谱特征因子估测的森林结构参数模型已有很多,但国内大部分模型选择预测的森林结构参数较为单一,主要以蓄积量、生物量为主,利用遥感影像纹理光谱特征对多个森林结构参数同时进行预测的研究较少,且大部分研究未考虑地形起伏、树冠阴影以及林分结构异质性问题的影响,导致模型在大尺度的拓展上适用性不强等。

本文利用研究区的 SPOT5 遥感影像纹理、光谱特征及对森林结构有影响的海拔高度、坡度、坡向、坡位等地形特征,以森林资源清查数据为数据源,采用多元逐步回归分析法,构建以 SPOT5 遥感影像纹理、光谱特征及地形因子为自变量,多个森林结构参

数(林分平均直径、断面积、蓄积量和树种多样性指数)为因变量的估测模型,比较基于影像纹理、纹理光谱、纹理光谱地形特征 3 种不同模型因子反演多个森林结构参数模型的效果,筛选最优森林结构参数反演模型,探讨利用高分辨率遥感影像纹理、光谱特征和地形信息估测多个森林结构参数的方法,为森林资源调查提供新的途径。

1 研究区与实验数据

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省东南部(图 1),影像主要覆盖牡丹江市及其周围的部分县市。牡丹江市位于黑龙江省与吉林省交界地区,总面积 $4.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,属温带大陆季风气候,年平均降水量 579.7 mm,年平均气温 $6.1 \text{ }^\circ\text{C}$,地形以山地、丘陵为主,呈现出中山、低山、丘陵、河谷盆地 4 种地质形态,海拔高度在 86 ~ 1700 m 之间。牡丹江市素有“林海”之称,林业用地 $3.25 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中森林面积 $2.62 \times 10^6 \text{ hm}^2$,活立木蓄积量达 2.3 亿 m^3 ,分别占全省和全国蓄积量的 13.9% 和 2%,森林覆盖率达 62.3%,森林类型及其组成成分多样,树种十分丰富,有 25 科百余种,主要树种有 77 种,包括红松、落叶松、樟子松、云杉、冷杉、水曲柳等。

1.2 遥感数据和样地数据

本研究使用的遥感数据为 SPOT5 遥感影像,包括全色和多光谱数据。全色数据分辨率 2.5 m,多光谱数据分辨率 10 m;多光谱数据波段组成分别为近红外波段 ($0.78 \sim 0.89 \text{ }\mu\text{m}$)、红波段 ($0.61 \sim 0.68 \text{ }\mu\text{m}$)、绿波段 ($0.50 \sim 0.59 \text{ }\mu\text{m}$)、短波红外波段 ($1.58 \sim 1.75 \text{ }\mu\text{m}$)。本研究所用覆盖黑龙江省的遥感影像共 5 景,获取时间均为 2010 年 9 月。SPOT5

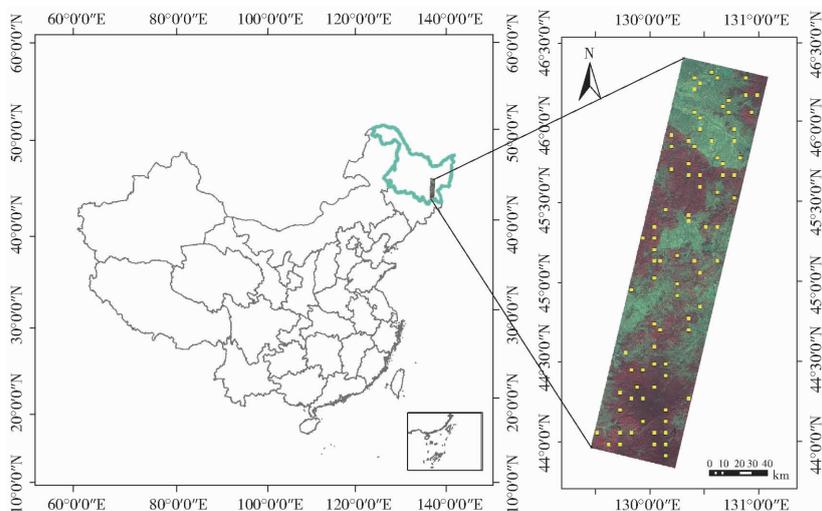


图 1 研究区和样地点位置图

Fig. 1 Overview and zoomed map of study area and sample plots

遥感影像的预处理包括:先经过辐射定标和FLAASH大气校正将SPOT5影像DN值转为地表真实反射率值后,再以1:10 000比例尺的研究区地形图为基准,对影像数据进行几何精校正,校正模型采用三次多项式,重采样采用最邻近插值方法,校正后的影像都统一到高斯-克里格投影,5幅影像校正误差都控制在0.5个像元以内,确保经校正后的像元位置误差均处于亚像元水平。

本研究采用第八次全国森林资源清查的黑龙江省样地数据,选取5景遥感影像覆盖的84个有林地样地点。根据这84个有林地样地的森林资源清查数据获得森林的林分变量信息。此外,根据研究区的数字高程模型(DEM)提取了84个样地点的海拔、坡度、坡向、坡位等地形信息,结合SPOT5遥感影像提取的纹理、光谱信息,进行森林结构参数反演模型估测。研究中考虑到矢量样地的边界无法与SPOT5遥感影像及DEM像元间的边界完全重合,在提取样地点的纹理、光谱以及地形信息时,使所有和样地边界相交的像元都参与运算,虽然会造成样地对应影像范围内像元的增加,但这种增加对每个样

地都是一致的,对模型的拟合试验不会构成大的影响。

2 研究方法

2.1 森林结构参数选择

研究选取了6个森林结构参数,包括3个传统的林分参数(林分平均直径、断面积、蓄积量)和3个树种多样性指数,森林结构参数分类及其描述如表1所示。

(1)林分参数:通过森林资源清查数据的样地信息获得各个样地点的林分变量值(林分平均直径、林分断面积、林分蓄积量),这些林分变量反映了森林结构的基本信息,为森林经营管理决策提供理论基础。

(2)树种多样性指数:和一般的林分变量相比,树种多样性反映了森林结构更多的细节信息,揭示了森林客观存在的树种和结构的多样性^[15-16]。本研究采用Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数和Simpson's指数3种多样性指数^[17-19]来反映研究区林分的树种多样性。

表1 森林结构参数分类及其描述

Tab.1 Forest structural parameters classification and description

类型	森林参数名称	参数描述
林分参数	林分平均直径	反映林木粗度指标,正确确定林分平均直径,可以提高林分调查精度
	林分断面积	全面反映林分生长进程的指标,可以用于预估林分生物量
	林分蓄积量	反映林分数量的指标,可用于确定林分树种组成、划分林层
树种多样性	Shannon-Wiener指数	基于物种数量反映群落种类多样性,还可反映林分的树种、直径和树高的多样性
	Pielou均匀度指数	用于描述物种中个体的相对丰富度或所占比例
	Simpson's指数	反映测量群落的异质性,用于判断群落物种多样性

2.2 SPOT5影像信息提取

研究提取的遥感影像信息包括影像纹理特征、各波段光谱值和光谱组合值以及4个地形因子,因子分类及其描述如表2所示。

(1)影像纹理特征:影像纹理特征反映了地表的粗糙程度,同时揭示了图像中地物的结构信息及其与周围环境的关系,是遥感影像的重要特征^[20]。有关研究表明,遥感影像全色波段的纹理特征在森林组成和结构分析中取得了较好的试验结果^[21-22]。本研究采用灰度共生矩阵法提取了SPOT5影像全色波段8种最为常用的纹理特征(表2),同时在固定纹理步长为1、方向为135°的前提下,分别采用3×3、5×5、7×7、9×9、11×11、13×13等6种窗口进行纹理特征提取,分析不同窗口对森林结构参数反演的影响。

(2)影像光谱波段值及其组合值:利用遥感影

像光谱信息提取的植被指数能较好地反映绿色植物的植被类型、生长情况、空间分布状况^[23]。有关研究表明,森林植被指数在森林参数(蓄积量、生物量等)反演中,取得了较高的精度^[24-25]。本研究提取了光谱波段值和多波段组合值参与森林结构参数模型估测:各波段光谱值为B1、B2、B3和B4,分别对应近红外波段、红波段、绿波段和短波红外波段4个光谱波段值;在借鉴前人研究的基础上,本研究光谱组合值选取了能反映植物生长状态的经纓帽变换产生的亮度指数(Bright)^[26]及6个在林业研究中常用的植被指数:归一化植被指数NDVI^[27]、简单比值植被指数SR^[28]、红绿比值指数GR^[29]、绿红比值指数VI^[30]、土壤调整植被指数SAVI^[31]、全球环境监测指数GEMI^[32],参与模型的构建。

(3)地形特征:地形因子包括海拔高度、坡度、坡向和坡位。

表2 纹理、光谱和地形因子分类及其描述

Tab. 2 Texture, spectral and topographic factors classification and description

类型	因子名称	因子描述
影像纹理特征	均值	反映图像的整体辐射状况
	方差	反映图像的信息量
	同质性	反映图像局部灰度均匀性的度量
	对比度	反映图像局部灰度变化总量
	差异性	反映图像局部对比度变化
	熵	反映图像所具有的信息量的度量
	角二阶矩	反映图像灰度分布均匀性
	相关性	反映图像纹理的一致性
影像光谱特征	近红外波段	对绿色植物类别差异敏感,用于生物量测量和作物长势监测等
	红波段	反映植被健康情况,用于区分植被种类和植被覆盖度
	绿波段	对植物的绿色反射敏感,可用于区分森林类型和树种
	短波红外波段	反映裸土表面的湿度情况,对于监测裸土十分有效
	缨帽变换亮度指数	反映土壤反射变换的信息,用于农作物识别与分类
	归一化植被指数	对绿色植被表现敏感,用于检测植被生长状态、植被覆盖度和消除部分辐射误差
	简单比值植被指数	对植被覆盖度十分敏感,可用于植物生物量的检测
	红绿比值指数	可估算植被冠层发展过程,用于植物生长周期研究和作物估产
	绿红比值指数	反映植被和土壤光谱信息,可用于农作物的识别和生长预测
	土壤调整植被指数	土壤调整植被指数,可解释背景的光学特征变化并修正植被指数对土壤背景的敏感
全球环境监测指数	全球环境监测指数,可消除不良的大气扰动,保持信息有关的植被盖度	
地形特征	海拔高度	利用 DEM 获取高程值
	坡度	利用 DEM 获取坡度值
	坡向	利用 DEM 获取坡向值,将坡向分成 9 个级别
	坡位	利用 DEM 获取坡位值,将坡位分成 6 个级别

2.3 模型构建与验证

为了筛选最优模型构建因子,需统一模型方法。一般的多元线性回归分析中自变量之间存在多重共线性,样本的变化容易导致模型估测结果偏离实测值,模型稳定性较差,而多元逐步回归分析法在一定程度上可解决上述问题,被广泛应用于森林结构参数模型反演试验中^[33]。本研究采用多元逐步回归分析法,以提取的 SPOT5 影像纹理、光谱特征和地形信息作为自变量,以森林结构参数作为因变量建立回归模型。研究用于建立森林结构参数模型的实测样本点数据为 84 个,其中 63 个样本参与模型构建,其数量在统计学上构成大样本,剩余的 21 个样本用于模型精度检验。为了避免估测模型自变量出现多重共线性问题,研究采用容差和方差膨胀因子 2 个统计量作为模型筛选的标准,判定准则为容差大于 0.1、方差膨胀因子小于 $10^{[34-35]}$;采用 R_{adj}^2 、均方根误差 RMSE 统计量作为模型评价标准;最后利用 21 个检验样本生成的预测值与实测值,对模型进行检验,其检验统计量同样采用 R^2 和均方根误差 RMSE。

3 结果与分析

3.1 基于不同窗口纹理特征的森林结构参数回归

本研究基于 6 个不同窗口提取的 8 种纹理特征

分别与各森林结构参数进行多元逐步回归分析,根据不同窗口纹理特征预测的森林结构参数模型 R_{adj}^2 变化(图 2)可知:各森林结构参数模型 R_{adj}^2 随着窗口的增大先增加后减小,总体变化呈微弱的抛物线趋势,且大部分模型 R_{adj}^2 都在 9×9 窗口达到峰值,因此本研究选取 9×9 窗口下提取的纹理特征参与模型预测试验。在 9×9 窗口下,基于影像纹理特征预测的各森林结构参数模型(表 3)表明:SPOT5 影像的纹理特征与森林结构参数相关性较高,预测最大 R_{adj}^2 为树种多样性指数 Simpson's s 指数模型 ($R_{adj}^2 = 0.581$),其次为蓄积量模型 ($R_{adj}^2 = 0.571$),

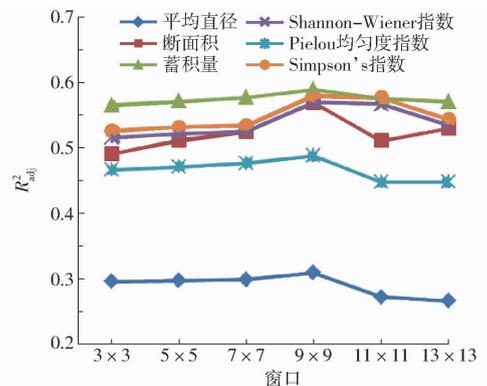
图2 不同窗口纹理特征预测模型 R_{adj}^2 变化曲线

Fig. 2 Changing curves of texture feature prediction model

R_{adj}^2 in different windows

表3 基于9×9窗口纹理特征的森林结构参数回归模型结果

Tab. 3 Regression model results of forest structure parameters using texture features based on 9×9 window

林分变量	模型参数		变量共线性诊断		模型拟合统计量			
	自变量	回归系数	容差	方差膨胀因子	R	R ² _{adj}	RMSE	P
断面积	截距	23.211						
	方差	-28.910	0.186	5.379				
	熵	20.327	0.188	5.314	0.773	0.569	5.020 m ² /hm ²	<0.001
	均值	-6.986	0.342	2.920				
	角二阶矩	42.915	0.390	2.563				
平均直径	截距	162.709						
	均值	-23.230	0.530	1.888	0.538	0.266	29.370 cm	<0.001
	同质性	111.805	0.530	1.888				
蓄积量	截距	147.560						
	均值	-62.439	0.357	2.802				
	同质性	325.291	0.500	1.999	0.769	0.571	37.720 m ³ /hm ²	<0.001
	差异性	110.649	0.630	1.588				
Shannon - Wiener 指数	截距	1.484						
	均值	-0.286	0.465	2.152				
	同质性	1.502	0.355	2.815	0.771	0.570	0.356	<0.001
	方差	-0.327	0.672	1.488				
Pielou 均匀度指数	截距	0.676						
	均值	-0.087	1.000	1.000	0.705	0.488	0.080	<0.001
Simpson's 指数	截距	0.697						
	均值	-0.128	0.465	2.152				
	同质性	0.690	0.355	2.815	0.777	0.581	0.155	<0.001
	方差	-0.151	0.672	1.488				

这2个预测模型包含2个相同的纹理变量均值和同质性。在引入的所有纹理特征变量中,均值是最常用的独立变量,参与了所有森林结构参数模型的预测。

3.2 基于纹理和光谱特征的森林结构参数回归

基于纹理和光谱特征对所有森林结构参数进行多元逐步回归分析,试验结果(表4)表明:

(1)相比基于纹理特征的模型(表3),结合纹理和光谱特征的森林结构参数回归模型在拟合优度上大部分都有了明显提高,其中预测效果最优的为断面积模型($R_{adj}^2 = 0.803$),其次为蓄积量模型($R_{adj}^2 = 0.763$)。断面积模型 R_{adj}^2 由0.569提升至0.803,成为提升幅度最大的模型,参与拟合的光谱因子与断面积具有较好的相关性,模型拟合效果明显改善($R_{adj}^2 = 0.803$, RMSE为3.399 m²/hm²)。树种多样性指数模型 R_{adj}^2 提升幅度最大的为Shannon - Wiener指数模型, R_{adj}^2 由0.581提高到0.670,其余2个指数模型 R_{adj}^2 提升幅度相对较小。

(2)在引入的所有光谱因子变量中,红波段、绿波段和缨帽变换亮度指数是林分因子模型预测使用最多的光谱变量,同时参与了林分因子断面积、平均直径和蓄积量3个模型预测;绿波段也是树种多样性指数模型预测使用最多的光谱因子,参与了Shannon - Wiener指数和Simpson's指数模型的

预测。

3.3 基于纹理、光谱和地形特征的森林结构参数回归

基于纹理、光谱和地形特征的森林结构参数进行多元逐步回归分析,得到试验结果如表5所示。综合比较表3~5,3种方法得到的森林结构参数回归模型显著性P值均小于0.001,模型在引入不同特征因子时拟合优度都有了明显提高(图3,图中BA、QMD、SV、SHI、SII、PI分别为:断面积、平均直径、蓄积量、Shannon - Wiener指数、Pielou均匀度指数、Simpson's指数),而同时基于3个特征因子预测的森林结构参数模型拟合效果最优。

(1)相比基于纹理光谱特征的模型,引入地形特征的森林结构参数回归模型在拟合优度上都有一定提高,其中预测效果最优的为蓄积量模型,其次为断面积模型和树种多样性指数Shannon - Wiener指数模型。蓄积量模型 R_{adj}^2 由0.763提升至0.864,模型拟合效果大幅提高,成为预测最优模型($R_{adj}^2 = 0.864$, RMSE为21.26 m³/hm²)。树种多样性指数Pielou均匀度指数模型 R_{adj}^2 由0.566提高到0.741,成为提升幅度最大的模型($R_{adj}^2 = 0.741$, RMSE为0.059)。在所有模型中林分断面积模型在引入地形因子后拟合精度 R_{adj}^2 由0.803提高到0.815,提升幅度最小。

表4 基于纹理和光谱特征的森林结构参数回归模型结果

Tab.4 Regression model results of forest structure parameters based on texture and spectral features

林分变量	模型参数		变量共线性诊断		模型拟合统计量			
	自变量	回归系数	容差	方差膨胀因子	R	R ² _{adj}	RMSE	P
断面积	截距	24.270			0.905	0.803	3.399 m ² /hm ²	<0.001
	红波段	-0.500	0.153	6.548				
	绿波段	0.405	0.121	8.232				
	缨帽变换亮度指数	-2.195	0.373	2.682				
	土壤调整植被指数	1.197	0.401	2.496				
	全球环境监测指数	5.247	0.517	1.932				
平均直径	截距	158.806			0.698	0.452	25.381 cm	<0.001
	红波段	-1.453	0.182	5.488				
	绿波段	1.046	0.191	5.232				
	缨帽变换亮度指数	-6.090	0.690	1.449				
	红绿比值指数	475.722	0.747	1.339				
蓄积量	截距	177.786			0.884	0.763	28.042 m ³ /hm ²	<0.001
	红波段	-3.444	0.158	6.342				
	绿波段	2.483	0.125	8.022				
	红绿比值指数	784.447	0.747	1.340				
	缨帽变换亮度指数	-11.169	0.685	1.459				
	全球环境监测指数	40.908	0.518	1.930				
Shannon - Wiener 指数	截距	1.430			0.815	0.652	0.320	<0.001
	同质性	2.515	0.232	4.307				
	绿波段	-0.027	0.232	4.307				
Pielou 均匀度指数	截距	0.723			0.763	0.566	0.077	<0.001
	均值	-0.076	0.920	1.087				
	近红外波段	-0.001	0.920	1.087				
Simpson's 指数	截距	0.593			0.830	0.670	0.138	<0.001
	同质性	1.294	0.185	5.396				
	绿波段	-0.015	0.116	8.588				
	熵	0.124	0.387	2.586				

(2)在引入的所有地形因子变量中,海拔是模型预测使用最多的地形变量,参与了所有森林结构参数模型的预测,坡度和坡位分别参与了3个树种多样性指数模型预测;在光谱特征变量中,近红外波段、红波段和全球环境监测指数是使用最多的光谱特征变量,参与了大部分森林结构参数模型预测;在纹理特征变量中,均值是模型预测的主要纹理变量,参与了3个树种多样性指数模型预测。

3.4 模型精度验证

本文对基于纹理、光谱和地形特征的森林结构参数模型估测结果进行精度验证,图4是利用21个检验样本生成的模拟值与实测值之间的散点图。研究表明:各模型的模拟值和实测值的拟合直线斜率接近1,构建的森林结构参数模型用于实际值预测效果较好。树种多样性指数估测中,Shannon - Wiener 指数模型估测的均方根误差最高(RMSE为0.126),Pielou 均匀度指数模型估测的均方根误差最低(RMSE为0.002);林分变量估测中,林分蓄积量模型估测的均方根误差最高(RMSE为

11.339 m³/hm²),林分平均直径模型估测的均方根误差最低(RMSE为0.769 cm)。

4 讨论

通过研究黑龙江省 SPOT5 遥感影像纹理、光谱和地形特征对森林结构参数林分平均直径、断面积、蓄积量和树种多样性指数估测的能力,得出以下结论:

(1)利用 SPOT5 遥感影像纹理、光谱特征建立的研究区域多个森林结构参数回归模型,参与拟合的因子与森林结构参数具有较好的线性关系,如林分因子蓄积量多元逐步回归模型的相关系数为0.884,决定系数为0.763;树种多样性指数Shannon - Wiener 指数、Simpson's 指数和 Pielou 均匀度指数的相关系数都大于0.75,决定系数在0.55以上。同时各个回归模型均通过了显著性检验,回归方程具有较高的显著性。说明利用高分辨率遥感影像特征估测森林结构参数具有很好的应用前景,可以为森林资源调查提供参考。

表5 基于纹理、光谱和地形特征的森林结构参数回归模型结果

Tab.5 Regression model results of forest structure parameters based on texture, spectral and topographic features

林分变量	模型参数		变量共线性诊断		模型拟合统计量			
	自变量	回归系数	容差	方差膨胀因子	R	R_{adj}^2	RMSE	P
断面积	截距	20.924						
	海拔高度	0.011	0.624	1.604				
	方差	-10.542	0.588	1.701				
	全球环境监测指数	9.441	0.724	1.381	0.914	0.815	3.295 m ² /hm ²	<0.001
	亮度指数	-2.068	0.327	3.057				
	土壤调整植被指数	1.340	0.413	2.424				
	近红外波段	0.067	0.452	2.212				
	红波段	-0.205	0.300	3.337				
平均直径	截距	85.138						
	海拔高度	0.117	0.771	1.296				
	红波段	-0.342	0.748	1.337	0.733	0.504	24.138 cm	<0.001
	简单比值植被指数	334.659	0.802	1.247				
	绿红比值指数	-499.750	0.750	1.334				
蓄积量	截距	73.075						
	海拔高度	0.190	0.727	1.376				
	方差	-74.316	0.653	1.532				
	缨帽变换亮度指数	-16.384	0.328	3.049	0.937	0.864	21.260 m ³ /hm ²	<0.001
	全球环境监测指数	60.847	0.737	1.357				
	红波段	-0.786	0.524	1.908				
	土壤调整植被指数	10.497	0.415	2.409				
Shannon - Wiener 指数	截距	0.482						
	均值	-0.159	0.325	3.076				
	坡度	-0.016	0.762	1.313				
	同质性	0.863	0.233	4.295	0.903	0.788	0.249	<0.001
	海拔高度	0.002	0.800	1.251				
	近红外波段	-0.003	0.262	3.822				
	坡位	0.119	0.679	1.474				
	全球环境监测指数	0.251	0.659	1.518				
Pielou 均匀度指数	截距	0.357						
	均值	-0.054	0.771	1.296				
	海拔高度	0.000	0.831	1.204	0.875	0.741	0.059	<0.001
	坡位	0.027	0.779	1.283				
	坡度	-0.003	0.866	1.155				
	近红外波段	-0.001	0.840	1.190				
Simpson's 指数	截距	0.479						
	均值	-0.068	0.788	1.270				
	坡度	-0.012	0.934	1.071	0.865	0.723	0.126	<0.001
	全球环境监测指数	0.238	0.865	1.156				
	海拔高度	0.001	0.800	1.249				
	坡位	0.058	0.852	1.174				

(2) 结合 SPOT5 影像纹理、光谱和地形特征建立的森林结构参数回归模型,较仅用影像纹理光谱特征建立的模型拟合精度要高,如林分参数蓄积量模型 R_{adj}^2 由 0.763 提升至 0.864,树种多样性指数相关系数都大于 0.86、决定系数在 0.72 以上,说明在构建森林结构参数回归模型时引入地形因子对模型具有一定的改进作用。原因可能为:由于地形起伏的影响,导致相邻像元间的太阳辐射、天空散射以及

邻近地形的交叉辐射差异明显,易产生“同谱异物”和“同物异谱”的现象^[36],对影像光谱信息的准确提取产生了较大影响。研究区森林结构复杂,海拔高度为 86 ~ 1 700 m,地形起伏大,由于立木灌层阴影、植被立地结构的异质性以及影像光谱数据饱和性的影响,仅利用 SPOT5 遥感影像纹理光谱特征进行森林结构参数反演整体精度不高、适用性不强,引入地形因子信息后估测模型精度大幅提高。

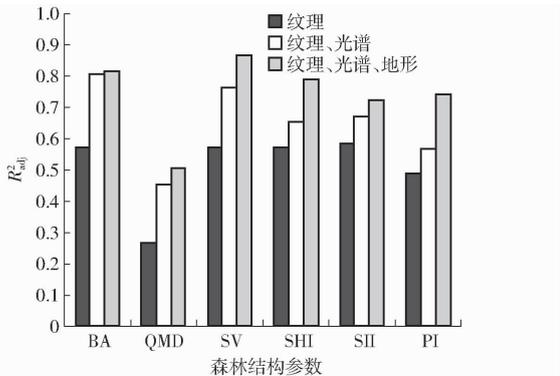


图3 基于不同特征因子的森林结构参数模型 R^2_{adj} 对比

Fig.3 Comparison of forest structure parameter models R^2_{adj} based on different characteristic factors

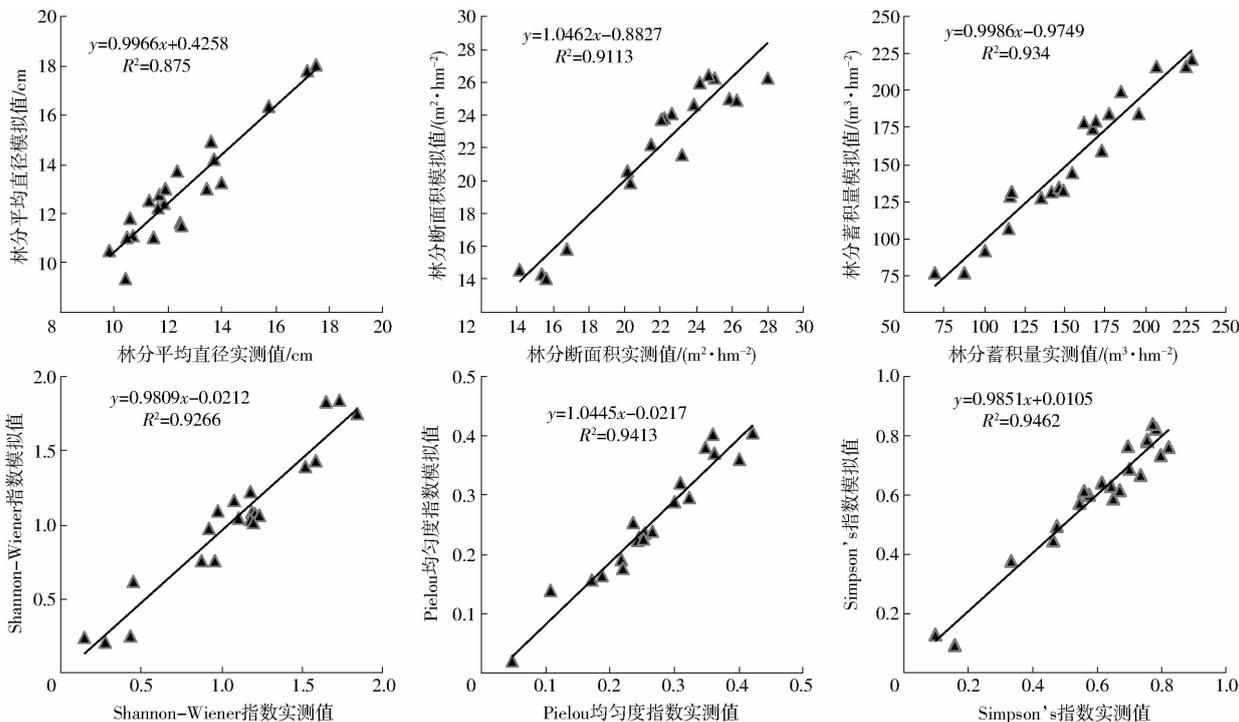


图4 模型估测值与样本实测值比较

Fig.4 Comparison of model estimated value and measured value of the sample

测影响显著,说明可见光红波段包含了丰富的森林植被信息。纹理因子中均值对森林结构参数模型的估测也非常重要,参与了3个树种多样性指数模型的预测,其原因可能为:纹理均值反映了影像纹理的规则程度,而不同树种的影像纹理规则差异较大,因此影像纹理均值能较好地反映研究区的树种多样性,说明纹理均值包含了丰富的树种信息,可用于森林树种多样性预测。

(4)不同的森林结构参数与SPOT5影像纹理、光谱和地形特征的相关性不同,各个模型的拟合精度也不同。比较模型 R^2_{adj} 可知,森林结构参数模型按估测精度从高到低排序为:林分蓄积量、林分断面积、Shannon - Wiener指数、Pielou均匀度指数、Simpson's指数、林分平均直径。

(3)在参与森林结构参数模型估测的所有因子中,地形因子海拔对森林结构参数模型估测影响最大,参与了所有模型的预测,其原因可能为:随着海拔高度的增加,温度逐渐下降,森林植被类型也发生了连续变化,从而导致不同海拔高度下的森林结构参数差异明显,说明海拔因子反映了丰富的森林结构信息,对于预测林分变量十分重要。光谱因子中可见光红波段对林分参数模型估测影响最为显著,参与了林分断面积、平均直径、蓄积量模型的预测,其原因可能为:红波段为叶绿素的主要吸收波段,信息量较大,是可见光的最佳波段,可以反映不同植物的健康状况,在本研究中表现为对不同林分参数估

本研究探讨了基于遥感影像光谱、纹理和地形3种不同特征因子预测森林结构参数最优模型的问题,对使用高分辨率遥感数据反演森林结构参数纹理窗口的选择、模型特征因子的筛选具有一定的参考价值和指导意义。为了控制模型变量,本次试验选取了应用较为广泛的多元逐步回归模型法,其他模型方法是否可以提高森林结构参数反演精度尚不可知,筛选预测森林结构参数的最佳模型方法将成为下一阶段的研究方向。此外森林结构十分复杂,除了传统林分参数和树种多样性以外,林木多样性以及林木空间分布多样性也是反映森林结构多样性的重要指标。基于已获得的代表森林结构复杂度的定量指标,进一步对林分结构及其生长状况进行定量分析也将成为后续研究的重点方向。

5 结论

(1) 利用 SPOT5 影像纹理、光谱和地形特征能够对多个森林结构参数进行较为精确的估测。

(2) SPOT5 影像估测森林结构参数模型的最优纹理窗口为 9×9 窗口, 森林结构参数模型 R_{adj}^2 随着窗口的总体变化呈微弱的抛物线趋势, 在最优纹理窗口处反演模型精度最高。

(3) 联合 SPOT5 影像纹理和光谱 2 个特征建立的森林结构参数回归模型, 比仅用影像纹理特征建

立的模型拟合精度要高; 联合 SPOT5 影像纹理、光谱和地形 3 个特征建立森林结构参数回归模型, 模型拟合精度再次得到提升, 成为最优估测模型。

(4) 利用 SPOT5 影像纹理、光谱和地形 3 个特征建立的最优森林结构参数估测模型中, 模型拟合精度最高的森林结构参数为林分蓄积量 ($R_{adj}^2 = 0.864$, RMSE 为 $21.260 \text{ m}^3/\text{hm}^2$), 其次为林分断面积 ($R_{adj}^2 = 0.815$, RMSE 为 $3.295 \text{ m}^2/\text{hm}^2$), 模型预估精度都达到了 80% 以上, 可用于大尺度的森林结构参数估算。

参 考 文 献

- 赵明瑶, 刘会云, 张晓丽, 等. 基于林分结构响应的 PALSAR 森林结构参数估测[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(6): 62-69.
ZHAO Mingyao, LIU Huiyun, ZHANG Xiaoli, et al. Estimation of forest structural parameters based on stand structure response and PALSAR data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(6): 62-69. (in Chinese)
- 彭舜磊, 王得祥, 赵辉, 等. 我国人工林现状与近自然经营途径探讨[J]. 西北林学报, 2008, 23(2): 184-188.
PENG Shunlei, WANG Dexiang, ZHAO Hui, et al. Discussion the status quality of plantation and near nature forestry management in China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2): 184-188. (in Chinese)
- 林思祖, 黄世国. 论中国南方近自然混交林营造[J]. 世界林业研究, 2001, 14(2): 73-78.
LIN Sizu, HUANG Shiguo. An establishment and management of nature-approximating mixed forests in south China [J]. World Forestry Research, 2001, 14(2): 73-78. (in Chinese)
- MORA B, WULDER M A, WHITE J C, et al. Modeling stand height, volume, and biomass from very high spatial resolution satellite imagery and samples of airborne LiDAR [J]. Remote Sensing, 2013, 5(5): 2308-2326.
- COUTERON P, PELISSIER R, NICOLINI E A, et al. Predicting tropical forest stand structure parameters from fourier transform of very high-resolution remotely sensed canopy images [J]. Journal of Applied Ecology, 2005, 42(6): 1121-1128.
- WALLNER A, ELATAWNEH A, SCHNEIDER T, et al. Estimation of forest structural information using rapid eye satellite data [J]. Forestry, 2015, 88(1): 96-107.
- ANDERSON J E, PLOURDE L C, MARTIN M E, et al. Integrating waveform LiDAR with hyperspectral imagery for inventory of a northern temperate forest [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1856-1870.
- CHO M A, SKIDMORE A K, SOBHAN I. Mapping beech (*Fagus sylvatica* L.) forest structure with airborne hyperspectral imagery [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, 11(3): 201-211.
- OZDEMIR I, KARNIELI A. Predicting forest structural parameters using the image texture derived from worldview-2 multispectral imagery in a dryland forest [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(5): 701-710.
- 刘峰, 谭畅, 张贵, 等. 长白落叶松单木参数与生物量机载 LiDAR 估测 [J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 219-242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130939&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.039.
LIU Feng, TAN Chang, ZHANG Gui, et al. Estimation of forest parameter and biomass for individual pine trees using airborne LiDAR [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 219-242. (in Chinese)
- 刘俊, 毕华兴, 朱沛林, 等. 基于 ALOS 遥感数据纹理及纹理指数的柞树蓄积量估测 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 245-254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140738&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.038.
LIU Jun, BI Huaxing, ZHU Peilin, et al. Estimating stand volume of *Xylosma racemosum* forest based on texture parameters and derivative texture indices of ALOS imagery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 245-254. (in Chinese)
- 曹庆先, 徐大平, 鞠洪波. 基于 TM 影像纹理与光谱特征的红树林生物量估算 [J]. 林业资源管理, 2010(6): 102-108.
CAO Qingxian, XU Daping, JU Hongbo. The biomass estimation of mangrove community based on the textural features and spectral information of TM images [J]. Forest Resources Management, 2010(6): 102-108. (in Chinese)
- 王佳, 宋珊芸, 刘霞, 等. 结合影像光谱与地形因子的森林蓄积量估测模型 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 216-220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140533&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.033.
WANG Jia, SONG Shanyun, LIU Xia, et al. Forest volume estimation model using spectra and topographic factors of ZY-3 image [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 216-220. (in Chinese)
- 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 [J]. 生态环境学报, 2007, 16(1): 108-111.
WANG Shujun, GUAN Dongsheng. Remote sensing method of forest biomass estimation by artificial neural network models [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 108-111. (in Chinese)

- 15 赵中华, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 树种多样性计算方法的比较[J]. 林业科学, 2012, 48(11): 1-8.
ZHAO Zhonghua, HUI Gangying, HU Yanbo, et al. Comparison of tree species diversity calculated[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(11): 1-8. (in Chinese)
- 16 姜萍, 叶吉, 王绍先, 等. 长白山南坡森林群落组成、结构以及树种多样性的垂直分布[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 258-262.
JIANG Ping, YE Ji, WANG Shaoxian, et al. Vertical distribution of floristic composition, structure and biodiversity of forest communities along an altitudinal gradients on south slope of the Changbai Mountain, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(1): 258-262. (in Chinese)
- 17 郭忠玲, 马元丹, 郑金萍, 等. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2013-2018.
GUO Zhongling, MA Yuandan, ZHENG Jinping, et al. Biodiversity of tree species, their populations' spatial distribution pattern and interspecific association in mixed deciduous broadleaved forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2013-2018. (in Chinese)
- 18 李宗善, 唐建维, 郑征, 等. 西双版纳热带山地雨林群落乔木树种多样性研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1183-1188.
LI Zongshan, TANG Jianwei, ZHENG Zheng, et al. Tree species diversity of tropical montane rain forest in Xishuangbanna, Yunnan[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(7): 1183-1188. (in Chinese)
- 19 JINGHUI M, SHIMING L, WEI W, et al. Estimation of forest structural diversity using the spectral and textural information derived from SPOT-5 satellite images[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 125-149.
- 20 李明诗, 谭莹, 潘洁, 等. 结合光谱、纹理及地形特征的森林生物量建模研究[J]. 遥感信息, 2006(6): 6-9.
LI Mingshi, TAN Ying, PAN Jie, et al. Modeling forest aboveground biomass by combining the spectrum, textures with topographic features [J]. Remote Sensing, 2006(6): 6-9. (in Chinese)
- 21 OTA T, MIZOUE N, YOSHIDA S. Influence of using texture information in remote sensed data on the accuracy of forest type classification at different levels of spatial resolution[J]. Journal of Forest Research, 2011, 16(6): 432-437.
- 22 FRANKLIN S, HALL R, MOSKAL L, et al. Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(1): 61-79.
- 23 陈明华, 柴鹏, 陈文祥, 等. 不同植被指数估算植被覆盖度的比较研究[J]. 亚热带水土保持, 2016, 28(1): 1-4.
CHEN Minghua, CHAI Peng, CHEN Wenxiang, et al. Comparative study on the estimation of the vegetation coverage by different vegetation indexes [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2016, 28(1): 1-4. (in Chinese)
- 24 王靖, 吴见. 干旱半干旱区森林蓄积量高光谱遥感估测技术[J]. 东北林业大学学报, 2014(1): 65-70.
WANG Jing, WU Jian. Forest stock volume estimation by hyper spectral remote sensing in arid and semi-arid area [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014(1): 65-70. (in Chinese)
- 25 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏, 等. 草地生物量的高光谱遥感估算模型[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 111-115.
LIU Zhanyu, HUANG Jingfeng, WU Xinhong, et al. Hyperspectral remote sensing estimation models for the grassland biomass [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 111-115. (in Chinese)
- 26 蒋云姣, 胡曼, 李明阳, 等. 县域尺度森林地上生物量遥感估测方法研究[J]. 西南林业大学学报, 2015(6): 53-59.
JIANG Yunjiao, HU Man, LI Mingyang, et al. Remote sensing based estimation of forest aboveground biomass at county level [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2015(6): 53-59. (in Chinese)
- 27 ROUSE J W, HAAS R, SCHELL J, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts[J]. NASA Special Publication, 1974, 351: 309.
- 28 JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.
- 29 LYON J G, YUAN D, LUNETTA R S, et al. A change detection experiment using vegetation indices[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1998, 64(2): 143-150.
- 30 KANEMASU E. Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean[J]. Remote Sensing of Environment, 1974, 3(1): 43-47.
- 31 HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.
- 32 VERSTRAETE M M, PINTY B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1254-1265.
- 33 赵红平. EViews6 软件的逐步回归分析模块在多重共线性教学中的应用[J]. 贵州教育学院学报, 2009, 20(12): 31-34.
ZHAO H P. The application of the stepwise regression program of EViews6 in the teaching of multi-collinearity[J]. Journal of Guizhou Education Institute, 2009, 20(12): 31-34. (in Chinese)
- 34 DOUGLAS C M, PECK E A, VINING G G. Introduction to linear regression analysis[M]. 4th ed. New Jersey: Wiley & Sons Publication, 2006: 323-368.
- 35 向东进. 实用多元统计分析[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2005.
- 36 黄博, 徐丽华. 基于改进型 Minnaert 地形校正模型的应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 183-188.
HUANG Bo, XU Lihua. Applied research of topographic correction based on the improved Minnaert model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 183-188. (in Chinese)