

文章编号:1001-1498(2016)04-0494-06

基于不同立地质量的杉木生物量遥感估测

温小荣^{1,2}, 孟雪^{1,2}, 刘俊^{1,2}, 陈树^{1,2}, 林国忠^{1,2}, 余光辉^{1,2*},
刘雪惠^{1,2}, 郜昌建^{1,2}

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 研究不同立地质量对杉木生物量遥感估测精度的影响, 为进一步提高和完善森林生物量遥感监测体系提供一种新的思路和方法。 [方法] 以 2007 年建德市森林资源二类调查数据和 TM 影像为研究材料, 采用蓄积量—生物量换算因子连续函数法计算杉木林生物量和地位级法评价立地质量等级, 比较杉木立地质量好、中等、差和不分地位等级 4 种生物量遥感估测模型, 并进行精度检验。 [结果] 表明: (1) 以 TM 遥感影像主成分分析中第一主成分为自变量的模型拟合效果最好, 决定系数 R^2 均在 0.69 以上, 最高 0.855。 (2) 利用预留独立样本对模型精度进行验证, 不分地位级总体估测精度为 87.78%, 分立地质量等级好、中、差 3 种类型总体估测精度分别为 97.37%、95.82%、98.23%。分不同立地质量类型可以提高杉木生物量遥感估测精度。 [结论] 研究结果为森林生物量遥感估测提供一种改进的思路, 且为提高森林生物量和碳储量遥感估测精度提供一种参考方法。

关键词: TM 影像; 森林生物量; 立地等级; 一元线性回归

中图分类号: S791.27

文献标识码: A

Site-Based Remote Sensing Estimation of Chinese Fir Biomass

WEN Xiao-rong^{1,2}, MENG Xue^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, CHEN Shu^{1,2}, LIN Guo-zhong^{1,2}, SHE Guang-hui^{1,2},
LIU Xue-hui^{1,2}, GAO Chang-jian^{1,2}

(1. Co-Innovation for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To understand the influence of site quality in the remote sensing Chinese fir biomass estimation. [Method] Based on the forest resource management inventory data and TM image of Jiande city obtained in 2007, the biomass of Chinese fir was calculated by forest volume-biomass conversion factor continuous function method and the site quality was evaluated by site class method. Four biomass estimation models for different site classes (good, moderate, poor and no ranking) were compared and the accuracy of them was tested. [Result] (1) The performance of regression model based on the first principal component analysis of TM remote sensing image is the best, the determination coefficients R^2 is higher than 0.69 and the maximum is 0.855. (2) Verifying the model accuracy by reserved independent samples, the whole model accuracy without site class is 87.78% and the accuracies of good, moderate, poor site quality models are respectively 97.37%, 95.82%, and 98.23%. [Conclusion] Distinguishing different site qualities could improve remote sensing estimation precision of Chinese fir biomass. The research results provide with an improved method for the remote sensing estimation of forest biomass, and a reference for improving the remote sensing estimation accuracy of forest biomass and carbon storage.

Keywords: TM image; forest biomass; site class; simple linear regression

收稿日期: 2015-11-18

基金项目: 国家 948 计划项目(2013-4-63); 南京林业大学科技创新基金项目(CX2011-24); 江苏省林业三新工程(LYSX[2015]19); 江苏高校优势学科建设工程自助项目(PAPD)。

作者简介: 温小荣(1972—), 男, 江西赣州人, 副教授, 主要研究领域: 森林经理及 3S 技术应用。

* 通讯作者: 余光辉, 教授, 主要研究领域: 3S 技术与森林资源动态监测。Email: ghshe@njfu.edu.cn

森林生物量是森林在一定时期内森林群落所积累的干物质的总量,是评价森林生态系统生产力和陆地生态系统功能的重要指标,准确估算森林生态系统生物量对研究陆地生态系统碳循环及全球气候变化具有重要意义^[1-4]。20世纪70年代,遥感技术被引进我国,随着遥感事业的长足发展,森林生物量的遥感定量估测也成为了研究的热点问题^[5-8]。

基于遥感技术进行森林生物量估算研究时,主要是利用遥感影像数据、地形图结合少量样地调查数据,采用一元线性回归和逐步回归、偏最小二乘、多元回归估计等方法建立生物量估测模型。张艳楠^[9]等以各植被指数为自变量通过一元线性回归模型和指数模型,对内蒙古锡林浩特市白音锡勒典型草原生物量遥感估测应用中的问题进行了探讨;刘琼阁等^[10]基于TM遥感影像和国家森林资源清查资料,选取遥感因子、地形因子在内的16个因子为自变量,利用偏最小二乘法对密云县森林生物量进行了遥感估测,精度达90.1%;徐婷等^[11]基于Landsat8 OLI影像和样地调查数据,选取不同波段线性和非线性组合、纹理信息以及主成分分析、最小噪声分离变换等在内的53个特征变量,利用多元逐步回归法建立了森林生物量估测模型,结果表明不同森林类型比不分类型估测精度有明显的提高;庞勇等^[12]用机载激光雷达点云数据和地面实测样地数据,估测了典型森林类型的树叶、树枝、树干、地上、树根和总生物量等组分的生物量;王红岩等^[13],基于SPOT5遥感影像数据和野外调查样地数据,利用多元线性回归模型性、指数模型、一元线性回归模型分别建立丰宁县森林、灌丛、草地地上生物量。以上研究通常只针对遥感影像传感器、光谱和纹理特征组合、不同数学建模方法进行改进研究,很少区分树种类型讨论反演精度。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hooker)^[14-15]是我国南方主要速生用材树种,具有生长快、产量高、材质好的特点,并且分布面积较广,在中国亚热带森林生态系统中占有十分重要的地位,因此对其生产力和生物量进行研究具有重要的意义。我国杉木生物量研究可以追溯到20世纪70年代中后期,张家武^[16]、徐凤翔^[17]等几乎同时发表了杉木生物产量的研究报告。针对杉木林生物量的遥感估测,目前只是总体或者区分龄级建立森林生物量估测模型。如王俊鸿^[18]等人对杉木不同发育阶段不同器官的生物量与主要测树因子进行拟合,筛选不

同发育阶段杉木不同器官生物量估测模型,这些模型为分布区中带不同发育阶段杉木人工林生物量的确定和碳储量评价提供科学依据。这些研究并未考虑到立地质量与林分收获量的关系,并区分杉木不同立地质量进行生物量估测。

针对以上研究空缺,本文以2007年TM遥感影像数据和建德市森林资源二类小班数据为数据源,采用地位级法评定林分的立地质量,对杉木树种分不同立地质量等级和不分地位级两种类型建立杉木树干生物量的一元线性遥感估测模型,并进行相关的精度评价,旨在为进一步提高和完善森林生物量遥感监测体系提供一种新的思路和方法。

1 研究区概况

建德市地处浙江省西部,钱塘江水系中上游,杭州—黄山黄金旅游线中段。地理位置118°54′~119°45′E, 29°13′~29°46′N。属亚热带季风气候区,具温暖湿润,雨量充沛,四季分明的亚热带季风气候特点。年平均气温16.9℃。土壤类型主要有红壤、黄壤、岩性土,潮土和水稻土5类,森林植被类型主要有常绿阔叶林、针叶林、落叶阔叶林、竹林经济林等。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据获取

(1)森林资源二类调查数据:获取建德市2007年森林资源二类规划调查小班矢量数据,属性表中包括小班优势树种、处理年份、地类、林种起源、树种组成、优势树种、年龄、龄组、平均胸径、平均高、郁闭度、单位株数、计株数、单位蓄积、计蓄积、坡度、坡向、海拔等。其中优势树种为杉木且蓄积量大于0的小班6930个、各小班平均林龄5~60a之间、平均高4~16m、平均胸径4~26cm,各小班平均蓄积量4.5~334.5 m³·hm⁻²。

(2)遥感数据:本研究使用Landsat TM遥感影像。影像数据在<http://www.glovis.usgs.gov>网站上获取,综合考虑时相和云量等因素选取成像时间为2007年03月29日,条带号为119-040和119-039,覆盖建德市的2景TM遥感影像。波段1~5和波段7空间分辨率为30m,波段6空间分辨率为120m。由于波段6为热红外波段用于感应发出热辐射的目标,所以本研究不考虑该波段,只研究波段1~5和波段7与生物量的相关性。利用ENVI5.1

和 ArcGIS10.1 对影像进行辐射定标、大气校正,裁剪与镶嵌,并利用已经校正过的地形图,选取地面控制点 50 个,采用二次多项式模型,平均误差控制在 1 个像元对影像数据进行几何精校正以满足森林生物量遥感定量估测分析需要。

2.2 蓄积量与生物量转换方法

根据建德市 2007 年森林资源二类调查数据、林相图以小班为单位算出优势树种为杉木的面积和蓄积,采用基于生物量与蓄积量之间关系的生物量换算因子连续函数法,对建德市优势树种为杉木的小班森林生物量和生产力进行估算,其中树种类型为杉木的转换模型参数计算方法见公式(1)^[19]。

$$B = 0.3999 * V + 22.541 \quad (1)$$

式中: B 为生物量($t \cdot \text{hm}^{-2}$), V 为蓄积量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

把优势树种为杉木的各小班平均蓄积量,代入上述公式(1),算出对应各小班的平均生物量,再根据各小班的面积得出各小班的总生物量。

2.3 立地质量评价方法

采用地位级法进行立地质量的评价,按相同年龄时林分条件高的变动幅度划分为若干个级数,通常为 5~7 级,以罗马数字 I、II、III... 符号依次表示立地质量的高低,将每一地位级所对应的各个年龄时的平均高列成表即为地位级表^[20]。导向曲线的选定是编制地位级表的关键。本文基于建德市森林资源二类小班调查数据,对优势树种为杉木且郁闭度 0.5 以上的小班,依据平均高和平均年龄建立一条代表中等立地等级条件下的地位级导向曲线^[21]。通过不同数学模型比较选出对数曲线 $H = a + b \ln(A)$ 作为杉木地位级导向曲线的最优模型,方程如下:

$$\text{杉木: } H = -4.008 + 3.710 \ln(A) \quad (2)$$

以导线曲线为基础,采用比例法确定地位等级的上下界线,以导向曲线的 1.8 倍高处为上界线,0.3 倍为下界线^[22]。用 $f(A)$ 表示导向曲线方程,则上下界模型分别为 $1.8 f(A)$ 和 $0.3 f(A)$ 。把杉木分为 5 个地位级数,各等分高度间隔为 $(1.8 - 0.3) f(A) / 5 = 0.3 f(A)$,各等级下界限曲线表达式为: $H = f(A) (1.80 - 0.3K)$, $K = 1, 2 \dots 5$, K 值等于地位级值,即 I 地位级的 $K = 1$, II 地位级 $K = 2$,... V 地位级的 $K = 5$,相邻两地位级下界限就是各地位级不同年龄时的 H 上下限值,按不同年龄列成表就是地位级(表 1)。

表 1 杉木地位级表

小班平均年龄/a	各地位级的小班平均高的范围/m				
	V	IV	III	II	I
5	≤1.2	1.3~1.8	1.9~2.4	2.5~2.9	≥3.0
10	≤2.7	2.8~4.1	4.2~5.4	5.5~6.8	≥6.9
15	≤3.6	3.7~5.4	5.5~7.2	7.3~9.1	≥9.2
20	≤4.3	4.4~6.4	6.5~8.5	8.6~10.7	≥10.8
25	≤4.8	4.9~7.1	7.2~9.5	9.6~11.9	≥12.0
30	≤5.2	5.3~7.7	7.8~10.3	10.4~12.9	≥13.0
35	≤5.5	5.6~8.3	8.4~11.0	11.1~13.8	≥13.9
40	≤5.8	5.9~8.7	8.8~11.6	11.7~14.5	≥14.6
45	≤6.1	6.2~9.1	9.2~12.1	12.2~15.2	≥15.3
50	≤6.3	6.4~9.5	9.6~12.6	12.7~15.8	≥15.9

2.4 特征变量选取

根据已有的研究,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。综合考虑各变量的生物学意义,选取包括原始单波段、植被指数、波段运算、第一主成分等在内的 11 个遥感因子作为备选自变量^[23],其中原始单波段充分体现了影像的原始特性,植被指数本质上是在综合考虑相关光谱信号的基础上,把多波段反射率做一定的数学变换,使其在增强植被信息的同时,并使非植被信号最小化^[24],不同的波段运算组合会突显不同的影像特征从而丰富影像信息。主成分分析可以去除遥感原始波段数据与植被指数之间的多重相关性,既可以保留多个遥感因子的主要信息,又可避免因子共线性的问题^[25]。利用 ENVI5.1 和 ArcGIS10.1 提取对应小班的各遥感因子,其中第一主成分为 TM 影像各波段(TM1-TM5、TM7)做主成分分析中得到的第一主成分,包含了原数据 99.81% 的信息,继而筛选出与森林生物量密切相关的特征参数,进而完成对森林生物量的遥感估测。

以森林资源二类调查数据中各小班的生物量总量为因变量,以各小班单遥感因子的信息总量为自变量,把杉木分为不分地位级和分不同立地质量等级两类,其中把地位级为 II、I 的立地质量评价为好,地位级为 III 的立地质量评为中等,地位级为 V、IV 的立地质量评为差,剔除郁闭度、计蓄积量为 0 的小班数据,并依据生物量与各遥感因子的散点图剔除明显的异常数据以及运用标准差分析法进行筛选,剔除各遥感因子中 $|x_{ij} - \bar{x}_j| > 2S_j$ 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, S_j 为第 j 个变量的样本标准差。剔除异常样本数据后杉木全体和分不同质量类

型的建模和验证样本如表2。

表2 杉木不同立地质量等级的建模及验证样本数

立地质量类型	建模样本数/个	检验样本数/个
不分地位级	1 586	412
好(地位级 I~II)	202	115
中等(地位级 III)	949	294
差(地位级 IV~V)	444	139

表3 不同立地质量等级下入选变量相关信息

编号	立地质量 各小班单变 量信息总和	好(地位级 I~II)		中等(地位级 III)		差(地位级 IV~V)		不分地位级(地位级 I~V)	
		决定系数 (R^2)	方差扩大 因子 VIF	决定系数 (R^2)	方差扩大 因子 VIF	决定系数 (R^2)	方差扩大 因子 VIF	决定系数 (R^2)	方差扩大 因子 VIF
X1	SUM(PC1 主成分)	0.854	25.2	0.765	423.9	0.746	85.07	0.692	111.9
X2	SUM(NDVI)	0.821	500.6	0.776	531.4	0.731	567.8	0.685	337.1
X3	SUM(RVI)	0.707	25.619	0.381	2.461	0.561	20.36	0.393	2.93
X4	SUM(DVI)	0.724	431.5	0.678	299.8	0.648	476.2	0.589	301.3
X5	SUM(TM1)	0.254	111.12	0.162	61.51	0.292	82.24	0.162	64.62
X6	SUM(TM2)	0.564	746.6	0.487	342.7	0.551	703.8	0.432	391.64
X7	SUM(TM3)	0.514	37.411	0.445	43.13	0.517	33.16	0.393	27.31
X8	SUM(TM4)	0.712	410.23	0.661	868.5	0.644	450.2	0.573	376.3
X9	SUM(TM5)	0.659	558.15	0.578	738.7	0.599	700.01	0.497	450.1
X10	SUM(TM7)	0.599	1462.9	0.506	857.4	0.556	987.61	0.436	876.62
X11	SUM(TM5/TM4)	0.764	448.38	0.672	506.02	0.687	540.93	0.587	357.2

注:1)PC1 代表 TM 影像主成分分析中的第一主成分,SUM(X_j)代表各小班单个遥感因子的信息总量;TM1~5、TM7 代表各单波段的反射率值;TM5/TM4 为 TM 第 5 和第 4 波段反射率的比值;NDVI 为 TM 第 4 波段减第 3 波段与第 4 波段和第 3 波段和的比值;RVI 为 TM 第 4 波段与第 3 波段的比值;DVI 为 TM 第 4 波段与第 3 波段的差值。2)方差扩大因子 VIF 大于 10 说明存在较强的相关性,方差扩大因子大于 100 说明存在严重的相关性。

从表 3 可以看出生物量与 TM 影像第一主成分、NDVI、DVI、TM4、TM5/TM4 决定系数 R^2 均较高,其中立地质量好、差和不分地位级 3 个类型的第一主成分决定系数 R^2 最高,立地质量中等类型决定系数 R^2 最高的为 NDVI 植被指数,其次为第一主成分,二者很接近均在 0.75 左右,其他因子决定系数较低。可见遥感因子中与植被有关的红外、近红外、植被指数、和第一主成分对生物量的解释能力较强。除 SUM(RVI)外其他因子的方差扩大因子均大于 10,可知因子之间共线性很强存在严重的多重相关性,多项式模型容易过度拟合,且生物学意义不明确^[26]。因此本文将采用以 TM 影像主成分分析中的小班的第一主成分因子信息量总和为自变量,各小班的总生物量为因变量采用一元线性

3 结果与分析

3.1 特征变量与生物量的相关分析及优选结果

回归自变量的筛选是建立回归模型的关键之处。对杉木树种分不同立地质量等级和不分地位级两种类型计算各因子与生物量之间的相关性及方差扩大因子,选取与生物量相关性强的因子,分析结果如表 3 所示。

回归建立森林生物量估测模型,降低变量之间的相关性。

3.2 生物量估测模型的建立

利用 SPSS 统计软件,采用一元线性回归方法,以小班的生物量为因变量、小班提取的第一主成分遥感因子为自变量,对杉木分不同立地质量等级和不分地位级两种类别分别建立生物量估测模型结果如表 4。

从表 4 可知各类模型拟合决定系数 R^2 均在 0.69 以上,最高为 0.855,对不同立地质量类型建模方程进行 F 检验,通过查 F 分布表可知在显著水平 0.01 的水平上,林分生物量估测模型的 F 值均 $> F_{0.01}$ 且 $P=0.000$, F 检验均达到极显著水平,表明一元线性方程拟合度好,线性相关性显著。

表4 杉木不同立地质量等级建模结果

编号	立地质量	建模样本数/个	回归方程	决定系数 R^2	F 值	显著水平
1	不分地位级	1 586	$Y=0.0012 \times X_{PC1} + 15.584$	0.692	3 552.32	0.000
2	好(地位级 I~II)	202	$Y=0.0017 \times X_{PC1} + 0.976$	0.855	1 122.41	0.000
3	中等(地位级 III)	949	$Y=0.0012 \times X_{PC1} + 21.15$	0.766	3 094.30	0.000
4	差(地位级 IV~V)	444	$Y=0.0008 \times X_{PC1} + 18.48$	0.747	1 290.57	0.000

3.3 生物量估测模型验证及精度分析

为了验证模型的精度,将预留样本中的自变量值代入表4所示的公式中,得到杉木不分地位级和分3种不同立地质量等级的样地生物量估测值,并与真实值进行精度检验,由表5可知,其总体估计精度分别如下:杉木不分地位级 87.78%、立地质量好 97.37%、立地质量中等 95.82%、立地质量差 98.23%,估测精度均较高,且分不同立地质量等级

表5 杉木不同立地质量类型生物量估测及精度结果

编号	立地质量类型	检验小班数/个	样本总面积/ hm ²	实测值总 生物量/t	估测值总 生物量/t	决定系数 (R^2)	总体估测 精度/%	F 值	显著水平
1	不分地位等级	412	2 195.1	97 891.1	111 515.1	0.760	87.78	1 300	0.000
2	好(地位级 I~II)	115	568.5	33 503.4	34 405.6	0.821	97.37	519	0.000
3	中等(地位级 III)	294	1 496.3	74 319.1	77 562.9	0.817	95.82	1 304	0.000
4	差(地位级 IV~V)	139	679.3	24 539.8	24 982.9	0.764	98.23	443	0.000

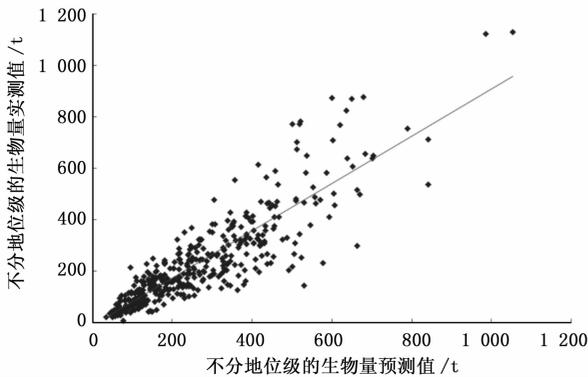


图1 不分地位级小班生物量预测值与实测值的拟合曲线

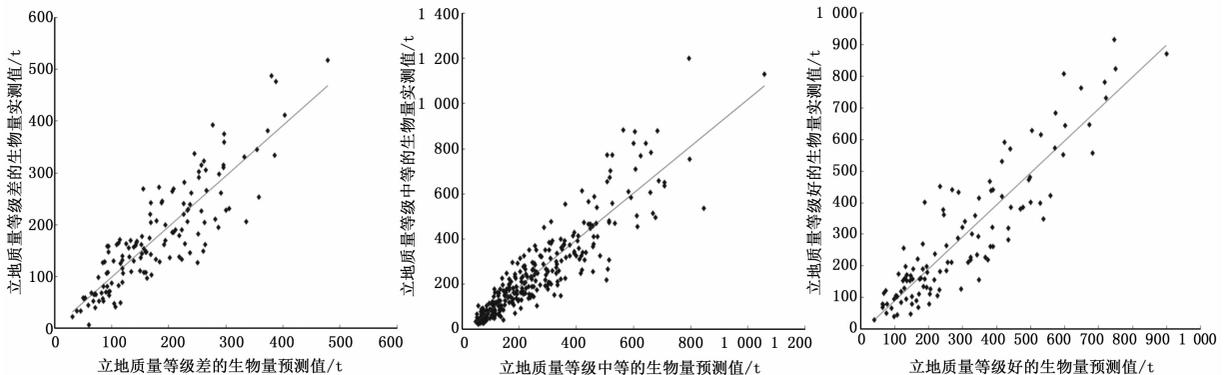


图2 不同立地质量等级小班生物量预测值与实测值的拟合曲线

4 结论

本研究以森林资源二类调查数据和 TM 影像为基础,基于生物量与蓄积量之间关系的生物量换算因子连续函数法算出每个小班对应的生物量,以各

的估测精度要比不分地位级的估测精度有明显提高。并对估测值和实测值进行线性拟合结果如图1、图2所示。二者决定系数 R^2 均在 0.7 以上,通过查 F 分布表可知在显著水平 0.01 的水平上,林分生物量估测模型的 F 值均 $> F_{0.01}$ 且 $P = 0.000$, F 检验均达到极显著水平,表明生物量样本估测值与实测值拟合较好,线性相关性显著。

3.4 讨论

基于 2007 年 TM 影像和森林资源二类调查数据,区分杉木不同立地质量等级分别建立了森林生物量估测模型。生物量与特征变量之间的相关性分析表明,生物量与 TM 影像第一主成分、NDVI、DVI、TM4、TM5/TM4 决定系数 R^2 均较高,其中第一主成分与立地质量好、中等、差和不分地位级 4 种类型的决定系数 R^2 均较高,说明第一主成分对生物量的解释能力较强。杉木生物量遥感估测模型表明,分不同立地质量建模精度明显优于统一建模的精度,该研究结果为森林生物量遥感估测提供一种改进的思路。

小班总生物量为因变量,各遥感因子小班面积提取信息总量为自变量,研究了杉木分不同立地质量等级和不分地位级的两种类型分别建立一元线性回归的森林生物量估测模型。得到的主要结论如下:

1. 通过对遥感因子与生物量的相关性比较分

析,得出 TM 影像主成分分析得到的第一主成分波段相关性最好,并以此做为自变量。

2. 立地质量类型建立一元线性回归模型,模型分别为:

杉木(不分地位级) $Y = 0.001 2X_{PCI} + 15.584$;
 $R^2 = 0.692$;

杉木(立地质量好) $Y = 0.001 7X_{PCI} + 0.976$;
 $R^2 = 0.855$;

杉木(立地质量中等) $Y = 0.001 2X_{PCI} + 21.15$;
 $R^2 = 0.766$;

杉木(立地质量差) $Y = 0.000 8X_{PCI} + 18.48$;
 $R^2 = 0.747$ 。

模型决定系数 R^2 均在 0.69 以上,最高 0.855,且 F 显著性检验概率 P 值均小于 0.001,线性拟合度好,线性相关性显著。

3. 经过验证样本的检验,杉木分不同立地质量等级比不分地位级估测精度有明显提高。各类别一元线性回归样本总体估测精度分别如下:杉木(不分地位级)87.78%、立地质量好 97.37%、立地质量中等 95.82%、立地质量差 98.23%。并对实测生物量与模型反演生物量进行线性拟合,得到的决定系数 R^2 均在 0.75 以上,两者 F 检验线性相关性显著($P < 0.001$)。研究结果基于树种类型和不同立地质量类型的小班组合为森林生物量遥感估测提供一种改进的思路,且为提高森林生物量和碳储量遥感估测精度提供一种参考方法。

参考文献:

- [1] 段祝庚,赵旦,曾源,等. 基于遥感的区域尺度森林地上生物量估算研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2015,10:1400-1408.
- [2] 穆喜云. 森林地上生物量遥感估测方法研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [3] Brown S, Sathaye J, Canell M, et al. Mitigation of carbon emission to the atmosphere by forest management [J]. Common For Review, 1996, 75(1):80-91,109,111-112.
- [4] 尹惠妍,李海奎. 基于蓄积的森林生物量估算方法的对比分析[J]. 林业科学研究,2014,27(6):848-853.
- [5] 赵宪文,李崇贵,斯林,等. 森林资源遥感估测的重要进展[J]. 中国工程科学,2001,3(8):15-24.
- [6] Andre T C D, Eduardo A D M. Simone A V, et al. Aboveground biomass stock of native woodland on a Brazilian sandy coastal plain: Estimates based on a Brazilian sandy coastal plain: Estimates based on the dominant tree species [J]. Forest Ecology and Management,

2006,226:364-367

- [7] Wijay 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.
- [8] 许昊,孙玉军,王新杰,等. 利用线性混合效应模型模拟杉木人工林枝条生物量[J]. 应用生态学报,2015,10:2969-2977.
- [9] 张艳楠,张庆,杨艳,等. 植被指数在典型草原生物量遥感估测应用中的问题探讨[J]. 草业学报,2012,21(1):229-238.
- [10] 刘琼阁,彭道黎,涂云燕,等. 基于偏最小二乘的森林生物量遥感估测[J]. 东北林业大学学报,2014,42(7):44-47.
- [11] 徐婷,曹林,余光辉. 基于 Landsat8OL 的特征变量优化提取及森林生物量反演[J]. 遥感技术与应用,2015,30(2):226-234.
- [12] 庞勇,李增元. 基于机载激光雷达的小兴安岭温带森林组分生物量反演[J]. 植物生态学报,2012,36(10):1095-1105.
- [13] 王红岩,高志海,王瑜琦,等. 基于 SPOT5 遥感影像丰宁县植被地上生物量估测研究[J]. 遥感技术与应用,2010,25(5):639-646.
- [14] 相聪伟,张建国,段爱国,等. 杉木林分蓄积生长的密度及立地效应[J]. 林业科学研究,2014,27(6):801-808.
- [15] 孙洪刚,张建国,段爱国. 杉木人工林自然整枝进程研究[J]. 林业科学研究,2014,27(5):626-630.
- [16] 张家武,冯宗炜. 桃源县丘陵地区杉木造林密度与生物产量的关系[J]. 湖南林业科技,1979,(5):1-7.
- [17] 徐凤翔. 杉木地上部分产量结构变化规律的研究[J]. 南林科技,1978,(10):8-15.
- [18] 王俊鸿,郭福涛,吴鹏飞,等. 杉木分布区中带不同发育阶段人工林生物量估测模型[J]. 安徽农业科学,2014,42(16):5104-5108.
- [19] 刘磊. 基于多源数据的森林生物量与生产力估算研究[D]. 南京:南京林业大学,2010.
- [20] 孟宪宇,等. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006. 99-111.
- [21] 周春国,徐雁南. 地位级表编制的新方法[J]. 华东森林经理,1997,(11):11-13.
- [22] 林昌庚,周春国,林俊钦,等. 关于地位级表[J]. 林业资源管理,1997,(5):30-33.
- [23] 张超,彭道黎,涂云燕,等. 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[J]. 北京林业大学学报,2013,35(3):11-17.
- [24] 罗亚,徐建华,岳文泽. 基于遥感影像的植被指数研究方法述评[J]. 生态科学,2005,24(01):75-79.
- [25] 徐天蜀,张王菲,岳彩荣. 基于 PCA 的森林生物量遥感信息模型研究[J]. 生态环境,2007,16(06):1759-1762.
- [26] Gao J. Quantification of grassland properties: how it can benefit from geoinformatic technologies [J]. International Journal of Remote Sensing,2006,27(7):1351-1365.

(责任编辑:彭南轩)