

基于 UAV 高分影像的杨树冠幅提取及相关性研究

李 贇^{1,2}, 温小荣^{1,2*}, 佘光辉^{1,2}, 林国忠^{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] 以无人机高清影像为数据源, 结合样地实地调查数据, 研究杨树冠幅提取及其与胸径和林分蓄积量的相关性, 为无人机森林调查技术提供一种思路和方法。 [方法] 基于无人机高分影像及实地调查数据, 采用面向对象法, 对杨树林木冠幅进行分割与提取, 通过实地测量数据建立冠幅-胸径模型, 利用一元材积表计算样地蓄积量, 并进行相关性分析与精度检验。 [结果] 影像分割效果良好, 但提取得到的冠幅比实际值偏小, 研究区最适宜的杨树冠幅分割尺度为 10, 平滑度 0.1, 紧致度 0.5。杨树冠幅与胸径建立相关模型, 其中一元线性方程拟合效果最好, 相关系数为 0.75。通过模型计算的样地蓄积与实测样地蓄积进行双侧 T 检验, 结果 $sig = 0.058 > 0.05$, 两组数据差异不显著。 [结论] 采用面向对象法, 通过无人机高分影像能自动分割并提取了杨树林木冠幅信息, 提取效果良好; 利用影像提取林木平均冠幅, 通过冠幅-胸径相关关系模型得到林木胸径, 进而推算林分蓄积的方法可以满足森林资源调查精度要求。

关键词: 无人机; 高分影像; 杨树冠幅; 森林蓄积量

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)04-0653-06

Study on Poplar Crown Extraction and Correlation Based on UAV High Resolution Image

LI Yun^{1,2}, WEN Xiao-rong^{1,2}, SHE Guang-hui^{1,2}, LIN Guo-zhong^{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 research poplar crown extraction and stand volume correlation based on UAV high resolution image and field investigation data, and to provide ideas and methods for UAV forest survey technology. [Method] Based on the data from the high resolution image acquired from UAV and the field investigation, the crown of poplar were segmented and extracted by object-oriented method, then modified it by field measured crown, and the crown-DBH model was established through field measurement data. Finally, the sample plot volume were calculated through single entry volume table and the correlation analysis and accuracy test were conducted. [Result] The crown image segmentation showed a good result, but the extraction of the crown was smaller than the actual value. The most suitable image segmentation scale, smoothness, and compactness of poplar crown were 10, 0.1, 0.5. Some poplar crown and DBH related models were established. It showed that linear equation had best fitting effect and its correlation coefficient was 0.75. T test of the volume which was calculated by related model and the field investigation volume showed $sig = 0.058 > 0.05$, indicating that no significant difference in the two groups data. [Conclusion] By object-oriented method, the poplar crown is extracted effectively through the UAV high-resolution

收稿日期: 2016-09-17

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502704); 江苏省林业三新工程(LYSX[2015]19); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 李 贇(1991—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要研究领域: 3S 技术与森林资源动态监测。

* 通讯作者: 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。Email: njw9872e@163.com

image. The method is accord with the accuracy demands of forest resources survey, which extracts poplar average crown by image and obtains poplar DBH by crown and DBH relationship model, then calculates stand volume.

Keywords: unmanned aerial vehicle; high resolution image; poplar crown; forest volume

近年来无人机遥感技术发展迅速,轻小型无人机因其获取影像机动灵活、影像分辨率高等优势,成为传统航空摄影测量手段的有效补充^[1],为林分冠幅信息的提取提供了有力的技术支持。冠幅提取的方法主要有面向对象法、分水岭分割法、专家分类法等。吴见^[2]等通过基于边缘的算法对快鸟全色影像中的植被区域进行二级分割,利用光谱、形状和纹理特征组成的空间特征对退耕还林地的树冠信息进行了提取,总体精度达到 84.67%。王茹雯^[3]等利用面向对象技术对延庆县试验地的侧柏树冠信息进行了提取,监测平均精度达到 80.02%,针叶林提取精度高于阔叶林。Wang Le^[4]等采用分水岭分割法,在树冠中心点周围描绘树冠轮廓,以及 Song C^[5]等利用 IKONOS 影像,通过半方差函数计算冠幅,均取得了较好的精度。大部分研究者仅进行了林木冠幅信息提取在方法技术上的探究,而将冠幅提取方法进一步用于森林调查中,探究与林木胸径、林分蓄积量之间的相关关系,研究还较少。

随着遥感事业的大力发展,利用遥感技术估测森林蓄积量的研究不断深入,大多数研究者利用遥感数据,结合少量样地调查数据,建立回归模型的方法^[6-9]估测森林蓄积量,少部分研究者利用 LiDAR、雷达等仪器,获得林分树高等林分结构参数,直接计算森林蓄积量^[10-12],或者融合主被动遥感获取的影像,以及分别提取主被动遥感中的遥感信息参数进行森林蓄积量估测^[13-16]。现今遥感估测蓄积量方法主要是基于大尺度范围,虽省时省力,但难以做到精细化。

针对以上研究空缺,本研究以无人机高清影像为数据源,在前人研究的基础上,结合样地实地调查数据,对高清影像进行多尺度分割,提取杨树单株林木冠幅,通过模型得到林木胸径,建立冠幅-胸径线性相关模型,进而估测出林分蓄积量,并进行相关性分析与精度评价,旨在为进一步改进和完善森林蓄积量无人机遥感监测体系提供理论参考。

1 研究区概况

东台林场位于江苏省东台市,地理坐标介于 120°47'11"~120°52'0"E,32°53'30"~32°51'17"N,

处于亚热带和北温带过渡区,季风显著,四季分明,年均气温 15.0℃,雨量充沛(年均降水量 1 061.2 mm),地势平坦,近海无山,土壤肥沃湿润,极适合杨树生长。东台林场现有树种达 200 种,木材总蓄积量约 5 万 m³,主要经营树种为杨树(*Populus simonii* Carr.)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides* Hu et Cheng),林场内 95% 林分为人工纯林,林下植被主要有:金银花(*Lonicera japonica* Thunb.)、金钟(*Forsythia viridissima* Lindl.)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui* Carr.)、木香(*Rosa banksiae* Ait.)、枸杞(*Lycium chinense* Mill.)等。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 样地调查数据 通过小班矢量等先验数据,于东台市东台林场内的杨树人工林中随机布设了 79 块样地。每块样地的面积大小为 0.067 hm²,对样地中的林木进行每木检尺,起测径阶为 5 cm,并用罗盘仪、激光测距仪记录每株林木的方位角与水平距,以便在 arcgis 软件中准确复位。根据胸径选取样地中 3~5 株平均木与优势木,借助测高器、皮尺,测量树高(H)、东西冠幅(CW_{EW})和南北冠幅(CW_{SN}),并计算平均冠幅(CW),共得到 235 株杨树样木数据。同时,记录样地的 GPS 坐标、林分年龄(t)、林分密度(株·hm⁻²),剔除异常数据后,将样地数据整理并汇总于表 1。

表 1 样地测量数据汇总

Table 1 Field investigation data summary

变量	量测数量	平均值	最大值	最小值	标准差
年龄/a	79 块样地	14	23	4	6.79
胸径/cm	1 708 株	28.35	5.7	5.5	8.12
树高/m	235 株	274	1.71	1.2	6.44
东西冠幅/m	235 株	7.51	5.7	2.1	2.38
南北冠幅/m	235 株	6.41	4.5	2	2.37
密度/(株·hm ⁻²)	79 块样地	324	645	120	135

2.1.2 遥感数据 样地调查的同时,进行无人机遥感影像采集,采用的无人机是数字绿土八旋翼无人机,无人机搭载了一个 CCD 相机。将采集的高分影像进行拼接、几何校正、正射校正、最终得到的影像分辨率为 0.15 m。

2.2 研究方法

2.2.1 林木冠幅提取 采用面向对象法对林木冠幅进行分割和提取^[17-18]。利用 arcgis 软件,用样地 GPS 信息建立样地边框,通过边框裁剪出样地内的无人机影像,将影像输入 Definiens eCognition 8.0 软件,进行面向对象多尺度分割。影像分割尺度的不同,产生的对象大小也不同,尺度太大会使提取的冠幅中包含空地、阴影等信息,尺度太小则可能使单株林木冠幅过于破碎;同时,平滑度与紧致度的权重也很大程度上影响分割效果^[19]。本研究于 8~20 等多个尺度之间,以及不同紧致度、平滑度间进行多次试验,最终选取的分割尺度为 10,平滑度 0.1,紧致度 0.5。影像分割完成后,对各样地分别提取出冠幅信息。分析面向对象分割单元发现,对象单元中林木枝叶的亮度值较高,将亮度值作为提取冠幅的指标。本研究应用阈值分类法,利用亮度值、相邻性指数进行组合,描述树冠类信息,针对 79 块样地,各设定相对应的阈值组合类型。提取出林木冠幅矢量信息之后,将影像分割提取杨树平均冠幅与对应林木实测平均冠幅进行分析与误差修正。

2.2.2 胸径冠幅模型选择 众多研究表明^[20-24],林木胸径与冠幅具有显著的正相关性,且胸径生长与冠幅增加的相关规律不受立地条件与林龄差异的影响^[25]。本研究从 235 株样木中随机提取 200 株杨树的胸径、冠幅进行模型构建,剩余 35 株样木作为模型检验样本。根据散点分布图,选择一元线性模型、对数曲线模型、二次曲线模型、三次曲线模型、幂函数曲线模型、指数曲线模型、logistic 模型等 7 种常见模型进行回归分析,并选取出相关系数最大,且 F 值最小的模型。

2.2.3 蓄积量推算 利用一元材积表计算杨树单株材积,查询苏北地区杨树一元材积表,研究区杨树的一元材积经验式为:

$$V = 0.000\ 050\ 479\ 1D^{1.908\ 505\ 4} [(0.923\ 600\ 4 + 0.050\ 210\ 9 \times e^{-0.096\ 864\ 79D})^{-37.807\ 42}]^{0.990\ 765\ 07} \quad (1)$$

将影像提取的修正后的冠幅代入冠幅-胸径模型,算出杨树胸径,进而得到杨树单株材积,根据影像分析出的林木株数,将样地所有杨树单株材积累加,即可得到样地蓄积量。

3 结果与分析

3.1 林木冠幅分割

利用 arcgis10.1 切割样地影像,在 Definiens

eCognition 8.0 中分别设置提取参数,对各样地进行冠幅提取,图 1 所示为第 35 号样地分割效果图,该样地的分割尺度为 10,平滑度 0.1,紧致度 0.5,选取亮度值为 110~127 的尺度进行提取冠幅提取。从图中可以看出,样地内冠幅基本能清晰直观地分割出来,分割效果良好。但研究区林分郁闭度较高,平均郁闭度达 0.7,林木冠幅重叠区域较多,无人机航拍影像难以区分重叠部分冠幅。将 200 株有实测平均冠幅(CW)的样木与影像提取平均冠幅(CW_s)进行比较分析,以 CW_s 为横坐标, CW 为纵坐标,绘制散点图如图 2 所示,由散点图可知,影像分割平均冠幅与实测平均冠幅形成明显的一元线性相关关系。由图 1、图 2 可以看出,影像分割冠幅整体偏小,利用实测平均冠幅数据对程序自动分割平均冠幅进行修正,将 200 份样木数据输入 SPSS 进行拟合,一元线性方程拟合结果如表 2、表 3 所示,相关系数 R² 为 0.956,拟合效果良好。得到的修正模型表达式为:

$$\overline{CW} = 1.072 \times \overline{CW_s} - 0.178 \quad (2)$$

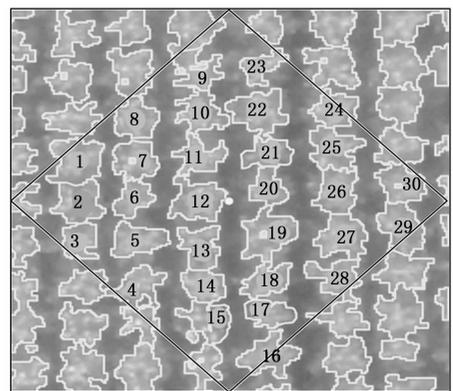


图 1 35 号样地冠幅分割图

Fig. 1 Crown segmentation image of No. 35 plot

表 2 模型拟合结果

Table 2 Model fitting results

R	R ²	调整 R ²	估计值的标准误差
0.978	0.956	0.956	0.444

表 3 模型方差检验

Table 3 Analysis of variance

项目	平方和	df	均方	F	Sig.
回归	906.046	1	906.046	4 292.413	0.000
残差	41.794	198	0.211	-	-
总计	947.840	199	-	-	-

3.2 胸径冠幅模型构建与验证

利用 SPSS 统计软件,选取 7 种回归模型,以杨树实测冠幅为自变量,胸径为因变量,建立估测模型,结果如图 3、表 4 所示。

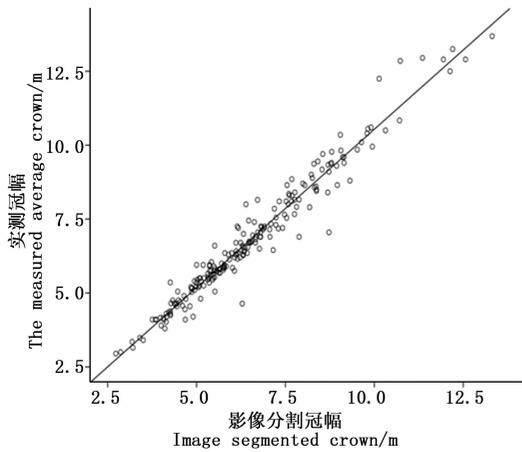


图2 影像分割平均冠幅与实测平均冠幅相关性

Fig. 2 The correlation of image segmented average crown and measured average crown

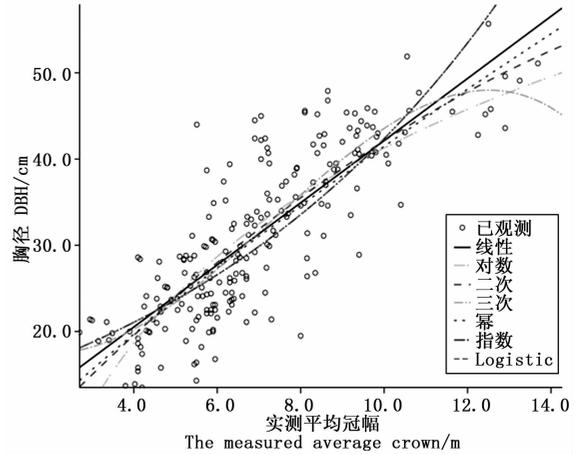


图3 冠幅 - 胸径相关性曲线图

Fig. 3 The curves of crown and DBH correlation

表4 曲线估计模型参数汇总

Table 4 Parameter summary of curve estimation model

方程	模型汇总					参数估计值			
	R^2	F	$df1$	$df2$	$Sig.$	常数	$b1$	$b2$	$b3$
线性函数	0.753	449.360	1	198	0.000	1.102	3.604	-	-
对数函数	0.658	420.278	1	198	0.000	-15.483	24.652	-	-
二次函数	0.729	229.852	2	197	0.000	-0.075	5.366	-0.115	-
三次函数	0.711	160.860	3	196	0.000	21.595	-4.156	1.170	-0.054
幂函数	0.642	391.662	1	198	0.000	6.382	0.813	-	-
指数函数	0.631	372.299	1	198	0.000	13.221	0.116	-	-
Logistic	0.631	372.299	1	198	0.000	0.076	0.890	-	-

由表4可知,一元线性函数相关系数 R^2 最大,且其剩余标准差最小,选取该模型构建胸径、冠幅模型,表达式为:

$$D = 1.102 + 3.604 \overline{CW} \quad (3)$$

式中, D 表示胸径, \overline{CW} 表示平均冠幅。

将剩余的35株样木测量数据用于最优模型适用性检验,利用均方根误差 $RMSE$ 、系统误差 TRE 、平均相对误差 MPE (公式4~6)三个评价指标进行模型检验,以 $RMSE \leq 5$, $TRE \leq \pm 5\%$, $MPE \leq \pm 10\%$,作为检验标准^[26]。

经计算得: $TRE = -0.1903\%$, $MPE = 0.8833\%$, $RMSE = 1.577$ cm,预测值减去实测值即可得到残差,残差分布图如图4所示。

由检验结果可以看出,预测值残差在 $-3.0 \sim 4.1$ cm之间,且误差指标 TRE 、 MPE 、 $RMSE$ (分别为 -0.1903% , 0.8833% , 1.577 cm)均小于检验标准,说明模型拟合效果良好,可利用(3)式,通过杨树冠幅,计算研究区杨树胸径。

3.3 蓄积量推算及精度分析

通过无人机影像得到样地林木平均冠幅长度,

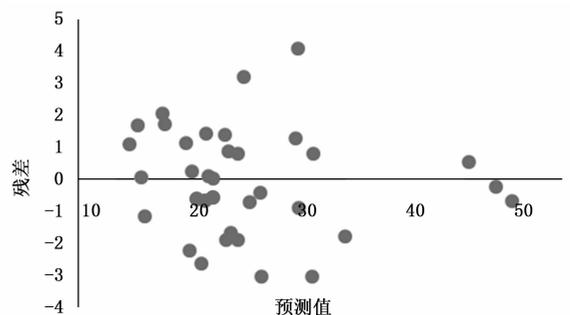


图4 冠幅 - 胸径模型残差分布图

Fig. 4 Residual distribution of crown and DBH correlation model

由方程(2)、(3)得到林木胸径,代入杨树一元材积经验表达式即可得到杨树材积,累加后得到样地蓄积量。将79块样地实测胸径得到的蓄积量(V_1)与通过冠幅 - 胸径模型得到的蓄积量(V_2)进行对比,相减后得到残差值,残差分析图如图5所示。对两种方法得到的蓄积量通过SPSS软件进行双侧T检验,检验结果列于表5,从表中可以看出, sig 值 > 0.05 ,说明两组数据差异不显著,表明两种方法得到的蓄积量之间相关关系强。

表 5 T 检验结果表
Table 5 Result of Student's t test

项目	均值	标准差	均值的标准误	差分的 95% 置信区间		t	df	Sig. (双侧)
				下限	上限			
实测蓄积 - 预测蓄积	0.196	0.906 1	0.101 94	-0.006 6	0.399 3	1.92 6	78	0.058

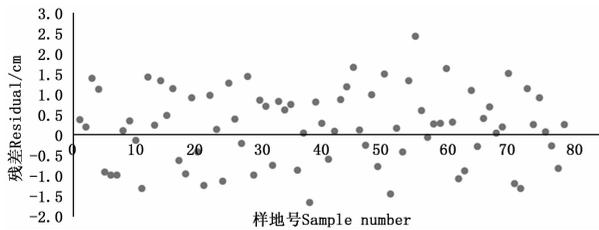


图 5 蓄积量残差分布图

Fig.5 Residual distribution of volume

4 结论

本研究采用面向对象法,自动分割并提取了杨树林木冠幅信息,提取效果良好,对比 200 株杨树影像提取平均冠幅与实测平均冠幅,发现影像提取平均冠幅总体偏小,这是由于无人机垂直获取影像,难以分辨重叠部分冠幅。通过实测冠幅建立修正模型,对影像自动提取平均冠幅进行修正,模型公式为: $\overline{CW} = 1.072 \times \overline{CW}_s - 0.178$ 。影像分割过程中经过多次试验,发现该地区最适宜的冠幅分割尺度为 10,平滑度 0.1,紧致度 0.5。由于研究区域较广,且林分龄级不一,郁闭度差异较大,林分间林相存在较多差异,难以找到一组通用的提取参数,所以对各样地分别提取林分冠幅。选取亮度平均值作为提取指标,提取结果表明,研究区内杨树冠幅亮度值在 105 ~ 145 之间,而如何得到大尺度范围内统一的提取参数,还需进一步研究。

通过实地测量杨树胸径、平均冠幅,并绘制成散点图,通过曲线模型拟合,发现该地区杨树胸径与平均冠幅成线性相关,通过 SPSS 软件进行模型构建,得到的胸径 - 冠幅一元线性模型相关系数为 0.75,公式为: $D = 1.102 + 3.604 \overline{CW}$ 。利用无人机高分影像,得到修正后的平均冠幅,代入相关关系模型,即可得到林木胸径。

利用影像提取平均冠幅通过相关关系推算得到的蓄积量与样地实测胸径估算的蓄积量两组数据进行双侧 T 检验,检验结果 $sig = 0.058 > 0.05$,表明两组数据差异不显著,相关性较强。利用影像提取林木平均冠幅,通过冠幅 - 胸径相关关系模型得到林木胸径,进而推算林分蓄积的方法可以满足森林资

源调查精度要求。

本研究充分利用了无人机高分影像分辨率高、椒盐噪声少、形状纹理信息丰富,且时效性强等特点,自动分割提取了杨树林木冠幅,并通过相关性分析建立冠幅 - 胸径模型,进而推算样地林分蓄积量,为无人机森林蓄积量调查技术提供了方法参考。

参考文献:

- [1] 毕 凯,李英成,丁晓波,等. 轻小型无人机航摄影像技术现状及发展趋势[J]. 测绘通报,2015(3):27-31.
- [2] 吴 见,彭道黎. 基于面向对象的 Quick Bird 影像退耕地树冠信息提取[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(9):2533-2536.
- [3] 王茹雯,彭道黎,吴 涛,等. 利用面向对象的技术进行树冠信息提取研究[J]. 中国农学通报,2010,26(15):128-134.
- [4] WANG Le, GONG Peng, BIGING G S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery [J]. Photogramm Eng Remote Sens, 2004, 70(3):351-357.
- [5] Song C, Woodcock C E. Estimating tree size from multiresolution remotely sensed imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2003(69):1263-1270.
- [6] 潘 帅,李 娟,徐 新,等. 利用遥感数据估测森林蓄积量 [J]. 吉林林业科技,2013,42(4):30-32.
- [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,2010,25(4):520-524.
- [8] 陈 楚,关泽群,张鹏林,等. 利用 RS 和 GIS 的森林蓄积量最小二乘估测研究 [J]. 湖北林业科技,2004,(4):25-28.
- [9] Killki P, Päivinen R. Reference Sample Plots to Combine Field Measurements and Satellite Data in Forest Inventory [C] // Proceedings from Seminars Organised by SNS. (Research Notes,19). Helsinki; University of Helsinki, 1986:209-215.
- [10] Fatoyinbo T. Remote sensing of biomass-principles and applications [M]. Rijeka; Intech 2012:27-55.
- [11] 梁志锋,凌飞龙,汪小钦. L 波段 SAR 与中国东北森林蓄积量的相关性分析 [J]. 遥感技术与应用,2013,28(5):871-878.
- [12] Gatzolis D, Popescu S, Sheridan R, et al. Evaluation of terrestrial Lidar technology for the development of local tree volume equations [C] // Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010:35-42.
- [13] Alprone L, Baronti S, Garzelli A, et al. LANDSAT ETM+ and SAR image fusion based on generalized intensity modulation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(12):2832-2839.

- [14] Pierce L, Walker W, Dobson M, *et al.* Fusion of optical and SAR data for forestry applications in the Sierra Nevada of California [J]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, 3 (3):1771-1773.
- [15] Popescu S, Wynne R, Scrivani J. Fusion of small-footprint Lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA [J]. Forest Science, 2004, 50(4):551-565.
- [16] 杨永恬. 基于多源遥感数据的森林蓄积量估测方法研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2010:12-13.
- [17] Kim J B, Kim H J. Multiresolution-based Watersheds for Efficient Image Segmentation [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24 (1):473-488.
- [18] Trias-Sanz R, Stamon G, Louchet J. Using colour, texture, and hierarchical segmentation for high-resolution remote sensing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63 (2):156-168
- [19] 李春干,代华兵,谭必增,等. 基于 SPOT5 图像分割的森林小班边界自动提取[J]. 林业科学研究,2010,23(1):53-58.
- [20] 邓宝忠,王素玲,李庆君. 红松阔叶人工天然混交林主要树种胸径与冠幅的相关分析[J]. 防护林科技,2003,(4):19-20.
- [21] 时明芝,张凡东. 107 杨树阳性冠幅与胸径关系的研究[J]. 福建林业科技,2005,32(4):97-98.
- [22] 王 勇,蒋 燧,黄荣林,等. 广西江南油杉人工林冠幅与胸径相关性研究及应用[J]. 广东农业科学,2014,(6):62-65.
- [23] 卢妮妮,王新杰,张 鹏,等. 不同林龄杉木胸径树高与冠幅的通径分析[J]. 东北林业大学学报,2015,43(4):12-16.
- [24] 何开伦,魏安世,余松柏. 广东省主要用材林树种胸径与冠幅相关性研究及应用[J]. 广东林业科技,2006,22(1):32-35.
- [25] 庄晨辉,潘润荣,郑广源. 杉木、马尾松中幼林抚育间伐的研究[J]. 福建林业科技,1994,(S1):36-41.
- [26] 蒋丽秀. 利用固定样地研制马尾松单木和林分生长率模型[D]. 南京林业大学,2014:23-25.

(责任编辑:彭南轩)