

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180446

# 机载与星载高分遥感影像单木树冠分割方法和适宜性对比

孙振峰 张晓丽 李霓雯

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室,省部共建森林培育与保护重点实验室,北京林业大学林学院,北京 100083)

**摘要:**【目的】应用高分辨率遥感影像快速准确提取单木树冠信息,对现代森林管理具有重要意义。面向对象的多尺度分割方法能有效地解决基于像元特征分析的局限,是单木树冠提取的重要技术途径。本文对比分析了不同遥感平台和人工林树种的树冠提取精度,探究实验方法针对不同尺度影像数据和树种的优势及适用性,并结合调查目的为影像数据的选取提供参考。【方法】以广西壮族自治区高峰林场为研究区,选取低空无人机CCD、机载CCD和星载高分二号遥感影像数据,针对树冠区域与背景区域的对比度效果不佳的问题,首先采用小波变换进行图像增强处理,去除影像噪声,增强树冠与背景的对比度;然后应用面向对象的多尺度分割方法,排除背景区域的干扰,针对树冠区域进行单木树冠的快速提取;最后对3种影像下提取的杉木和桉树人工林单木树冠的流程和方法,以及树冠提取精度进行研究分析。【结果】采用小波变换对无人机和机载平台影像增强效果显著,无人机平台下桉树和杉木实验区单木分割精度分别为87%和93.3%,冠幅估测精度为84.2%和85.1%;机载平台下桉树和杉木实验区单木分割精度为89%和91.1%,冠幅估测精度为83.9%和84.4%;而小波变换对星载平台影像增强效果不佳,桉树和杉木实验区的单木分割精度为82%和89%,冠幅估测精度为72.3%和73.3%。【结论】在无人机和机载平台下,应用多尺度分割得到的树冠提取精度相接近;在星载平台下,直接应用多尺度分割进行单木树冠提取,受影像自身空间分辨率的局限,提取精度低于前两种平台,但也能够满足森林调查的基本需求。

关键词: 高分影像; 小波变换; 图像增强; 面向对象分割; 树冠提取

中图分类号: S771.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2019)11-0066-10

引文格式: 孙振峰, 张晓丽, 李霓雯. 机载与星载高分遥感影像单木树冠分割方法与适宜性对比 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11):66-75. Sun Zhenfeng, Zhang Xiaoli, Li Niwen. Comparison of individual tree crown extraction method and suitability of airborne and spaceborne high-resolution remote sensing images[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 66-75.

## Comparison of individual tree crown extraction method and suitability of airborne and spaceborne high-resolution remote sensing images

Sun Zhenfeng Zhang Xiaoli Li Niwen

(School of Forestry, Key Laboratory of Precision Forestry, Provincial Key Laboratory of Forest Cultivation and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] This method applies high resolution remote sensing image to extract individual tree crown information quickly and accurately, which can have important significance for modern forest management. Object-oriented multi-scale image segmentation method can effectively solve the limitations of pixel feature analysis and is an important technical approach to individual tree crown extraction. This paper compares and analyzes the tree crown segmentation accuracy of different remote sensing platforms and artificial forest species, explores the advantages and applicability of the experimental methods for different scale image data and tree species, and provides reference for the assortment of image data combined with the purpose of investigation. [Method] Taking Gaofeng Forest Farm of Guangxi Zhuang Autonomous Region

收稿日期: 2018-12-31 修回日期: 2019-03-01

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFD0600902)。

第一作者: 孙振峰。主要研究方向: 资源监测与信息化管理。Email: sunzhenfeng\_10@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号 北京林业大学林学院。

责任作者: 张晓丽, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 定量遥感。Email: zhang-xl@263.net 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

as the research area, the UAV CCD, airborne CCD and spaceborne GF-2 remote sensing image data were selected. Aiming at the poor contrast effect between the crown area and the background area, the image enhancement processing was firstly performed by wavelet transform to remove the image noise, enhance the contrast between the crown and the background, and then apply the object-oriented multi-scale segmentation method to eliminate the interference of the background area. Rapid extraction of single tree crown for canopy areas was taken. Finally, the process and method of extracting single tree crown of *Eucalyptus robusta* and *Cunninghamia lanceolata* plantation under three kinds of images, and the accuracy of crown extraction were studied and analyzed. [Result] Wavelet transform is effective in enhancing UAV and airborne images. The individual tree crown segmentation accuracy of *Eucalyptus robusta* and *Cunninghamia lanceolata* in UAV platform was 87%, 93.3%, with tree crown estimation accuracy of 84.2%, 85.1%, respectively. The individual tree crown segmentation accuracy of *Eucalyptus robusta* and *Cunninghamia lanceolata* in airborne platform was 89%, 91.1%, with tree crown estimation accuracy of 83.9%, 84.4%, respectively. However, wavelet transform is not appropriate for image enhancement of spaceborne platform. The crown segmentation accuracy of *Eucalyptus robusta* and *Cunninghamia lanceolata* in spaceborne platform was 82%, 89%, with tree crown estimation accuracy of 72.3%, 73.3%, respectively. [Conclusion] In UAV and airborne platform, the precision of tree crown extraction by multi-scale segmentation is close. In spaceborne platform, the extraction accuracy of the individual tree crown is lower than that of the former two platforms because of the limitation of spatial resolution of the image, and the direct application of multi-scale segmentation to single tree crown extraction. But it can also meet the basic needs of forest survey.

**Key words:** high-resolution image; wavelet transform; image enhancement; object-oriented segmentation; tree crown extraction

20世纪以来,以遥感影像作为主要信息源,可以对林分以及单木层次上的森林结构参数进行精准测量、制图和数字化表达,进而对森林资源状况及其动态变化进行全面、快速、有效监测和评估。高分辨率遥感影像可以更加清晰地表达地物目标的空间结构,纹理特征和地物边缘信息,树冠的大小、形态以及光谱信息,是树冠轮廓自动识别的基本特征,也是建立众多林分模型的重要因子<sup>[1-2]</sup>。传统的图像分析方法是在像元层次上进行的基于影像光谱特征的信息提取,这种方式是建立在统计模式下而不是空间模式下,易出现“椒盐现象”,分辨率越高、这种现象越严重,会造成空间数据的大量冗余和资源浪费。

为充分利用高分辨率遥感影像丰富的空间信息,实现信息的准确提取,面向对象的遥感影像信息提取技术应运而生,这种方法充分利用了对象的光谱、形状、纹理等信息,以最小单元为分割对象,可以在很大程度上减少“椒盐现象”的出现,提高分析精度<sup>[3]</sup>。单木树冠识别和勾绘很重要的一个途径就是图像分割,主要是以树冠的辐射传输模型为理论基础,其核心思想是树冠中心点的亮度值大,而树冠边界点的亮度低。常用的方法主要有局部最大值法、模板匹配法、区域增长法、分水岭算法等<sup>[4-10]</sup>。但是对于高郁闭度林分,树冠之间有粘连重叠的现象,无法简单利用树冠边缘灰度值突变的思想进行树冠分

割,需要从影像所表现的几何形状、尺寸和空间格局等角度进行单木冠幅提取,提高树冠识别的精度<sup>[11-13]</sup>。

高空间分辨率遥感影像具有高空间分辨率和低光谱分辨率的特点,影像中地物在光谱空间中表现出类间差异小、类内差异大和视觉对比度差,因此在图像分割之前先进行增强处理,一方面可以增强图像对比度,将地物目标与背景环境之间的差异拉大,另一方面可以滤除大部分的噪声对分割结果的影响。小波变换具有频域与时域二维分辨率的特点,同时具有多尺度的特征,能够从不同尺度上对图像进行理解和表达,因此在遥感影像处理中得到了广泛应用<sup>[14-17]</sup>。应用高分影像,使用面向对象的多尺度分割方法提取树冠信息,已有很多研究<sup>[18-20]</sup>,但是针对不同平台高分影像特征的相似性和差异性,树冠提取方法的适宜性研究较少。已有研究表明,在不同空间分辨率影像下地物面积提取精度存在差异<sup>[21-23]</sup>,但多数都是采用重采样后影像而不是真实尺度下的遥感影像,这种方式会对影像的空间和光谱信息造成损失或失真,影响研究结论<sup>[24-25]</sup>。

本文以高分影像下单木树冠分割提取为研究目的,进行不同影像的空间尺度响应研究。选用3种不同平台下的高分辨率遥感影像(空间分辨率分别为0.03 m、0.2 m和1 m),对研究区内主要人工林树

种进行树冠提取实验,首先对低空无人机 CCD 和机载 CCD 影像进行小波变换增强处理,然后采用面向对象的多尺度分割方法进行单木树冠提取;在对 GF-2 影像进行影像融合后,直接以多尺度分割方法进行树冠分割,最后结合 3 种平台影像下的单木分割精度,分析不同空间尺度遥感影像对单木树冠识别及其面积提取精度的影响规律,讨论在不同林业调查目标下该方法的应用价值。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

广西国有高峰林场位于南宁市兴宁区,地理坐标为  $22^{\circ}48'48'' \sim 23^{\circ}03'34''N$ 、 $108^{\circ}07'55'' \sim 108^{\circ}32'53''E$ ,所在区域为大明山余脉,属低山丘陵地貌,地势东北高、西南低,呈东北—西南走向,海拔高度  $70 \sim 500$  m,坡度  $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,经营面积近  $800$  km $^2$ ,森林蓄积量超  $430$  万 m $^3$ ,是广西规模最大的国有林场。林场内人工林的主要树种是桉树(*Eucalyptus robusta*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)。为了验证本文算法的普遍性和实用性,桉树和杉木实验区选择在密林区(郁闭度  $> 0.7$ )。研究区示意图见图 1。

### 1.2 数据获取

#### 1.2.1 实地调查数据

在高峰林场内选择杉木纯林和桉树纯林作为实验区,均设立边长  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  大小的样地,在 2018 年 1 月 16 日至 2 月 5 日开展地面样地数据的调查,每种树种随机选取 45 株树木作为验证数据,利用皮

尺测定每棵树的东西及南北两个方向冠幅,并计算两个方向冠幅的平均值作为树冠直径;同时利用全站仪对实验区内的树木进行单木定位,方便之后处理分析时对应查找。同时记录样地的坐标、坡度、坡向,以及样地内树种的胸径、树高、枝下高等数据。桉树实验区树木平均胸径为  $11.7$  cm,平均树高为  $17.8$  m,平均冠幅为  $2.8$  m;杉木实验区树木平均胸径为  $21.2$  cm,平均树高为  $15.4$  m,平均冠幅为  $3.9$  m。

#### 1.2.2 影像数据

低空无人机 CCD 影像是采用 iFly D6 电动多旋翼无人机搭载 iCam Q2 倾斜摄影相机进行拍摄,拍摄时间为 2018 年 2 月,实际飞行航高约为  $180$  m,数据获取当天晴朗无风、阳光充足。影像分辨率为  $0.03$  m,采用 China Geodetic Coordinate System 2000 大地坐标系,高斯克吕格 3 度带投影,通过三维实景建模软件 ContextCapture Center 输出正射影像。

机载 CCD 影像是由中国林业科学研究院 LiCHy (LiDAR、CCD 和 Hyperspectral) 机载遥感系统采集提供,由德国 IGI 公司集成,数据由运-12 飞机搭载传感器飞行获取,拍摄时间为 2018 年 1 月,实际飞行航高约为  $1000$  m,数据获取当天晴朗少云。影像分辨率为  $0.2$  m,数据坐标系统设定为 UTM-North 投影, WGS-84 坐标系。

GF-2 影像分为全色影像和多光谱影像,全色影像分辨率为  $1$  m,多光谱影像分辨率为  $4$  m,包括红、绿、蓝、近红外 4 个波段,获取时间为 2018 年 8 月。在对 GF-2 影像进行面向对象分割之前,为了消除遥

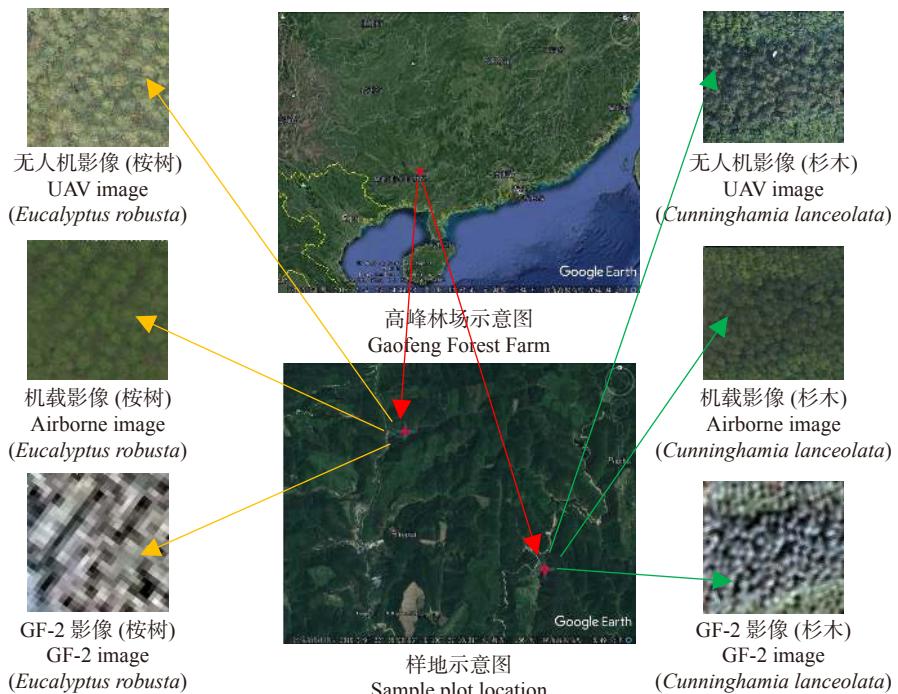


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

感数据误差, 提高解译精度, 需对影像数据进行预处理。预处理过程主要包括几何正射校正、图像融合、几何精校正、影像裁剪。本研究结合 DEM 数据, 利用 RPC 物理模型对全色影像及多光谱影像进行正射校正, 并采用 NNDiffuse Pan Sharpening 方法对全色波段和多光谱波段进行融合, 融合后影像空间分辨率为 1 m。

## 2 原理与方法

首先对 3 种平台下的影像预处理得到正射影像, 采用小波变换对图像进行增强处理, 通过定量分析评价图像增强效果, 然后应用面向对象的多尺度分割方法进行单木树冠提取, 最后结合外业实测数据计算提取精度。方法流程如图 2 所示。

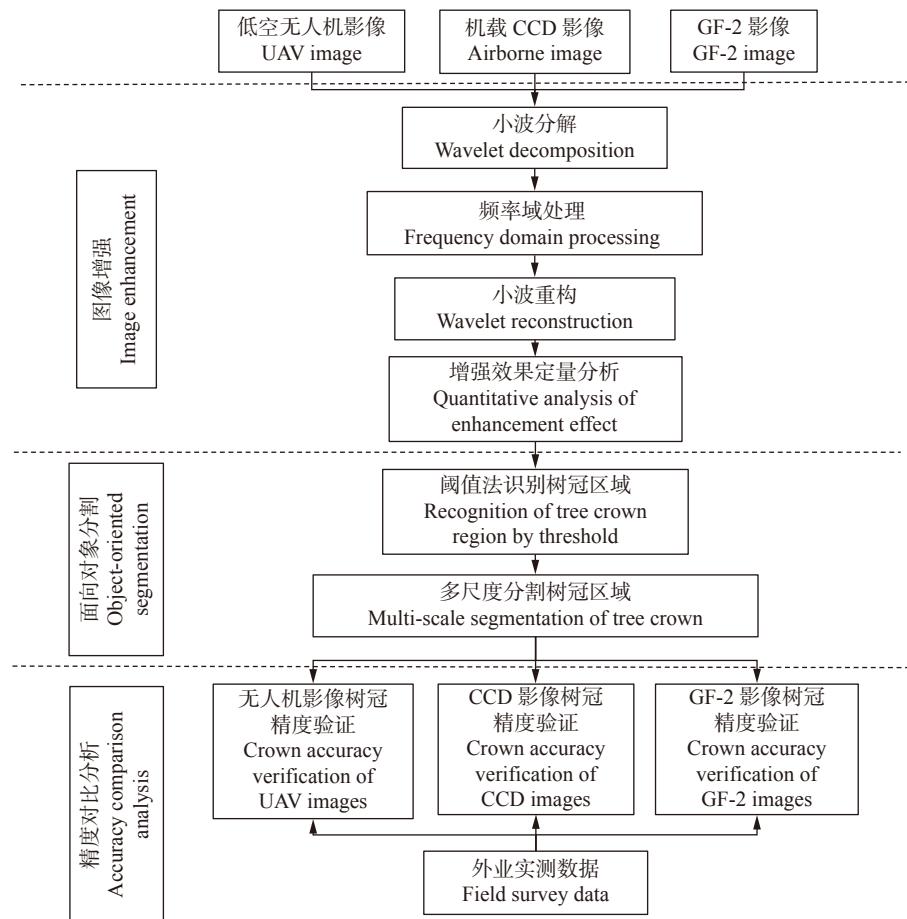
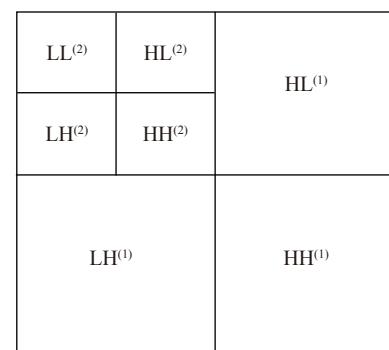


图 2 单木树冠提取技术路线

Fig. 2 Technical diagram for extracting tree crown

### 2.1 图像增强

小波变换的基本原理: 若傅里叶变换  $\hat{\Psi}(\omega)$  能够满足容许条件,  $\Psi(t) = \int_R \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$ , 则称  $\Psi(t)$  为一基本小波母函数。小波母函数  $\Psi(t)$  经伸缩和平移后得到连续小波函数  $\Psi_{a,b}(t)$ ,  $a$  为伸缩因子,  $b$  为平移因子<sup>[14]</sup>。小波变换的实质就是用一族小波函数去表示信号或函数。图像经过小波变换之后, 每层分解尺度中分别得到 4 个子图像(图 3)。LL 为低频部分, 代表图像的近似信息, 也就是主要内容信息; HL、LH 和 HH 是高频部分, 分别代表图像水平方向、垂直方向和对角线方向的细节信息。图像的低频部分保存的是图像的轮廓信息, 而高频保存的是图像的细节信息, 图像中大部分的噪声和一些边缘细节都



LL. 近似信息; HL. 水平细节信息; LH. 垂直细节信息; HH. 对角线细节信息。LL represents approximate information; HL represents horizontal detail information; LH represents vertical detail information; HH represents diagonal detail information.

图 3 小波分解示意图

Fig. 3 Wavelet decomposition diagram

属于高频率带，而低频率带主要表征图像的近似信号。为了能够在增强图像的同时减少噪声的影响，可以对低频率带进行图像增强，用以增强目标的对比度，抑制背景；对高频部分进行小波去噪处理，减少噪声对图像的影响。

## 2.2 多尺度分割

为了提高单木树冠提取精度，实验首先排除背景区域干扰，然后针对树冠区域进行面向对象的分割。经过小波增强变换后，图像内部的树冠区域与非树冠区域的灰度值差异明显增大，因此可以采用阈值法进行树冠区域与非树冠区域的区分。阈值法的基本思想是寻找一个合适的阈值将前景和背景按照像素灰度值的大小进行分类，灰度值大于阈值归为前景（树冠），小于阈值归为背景（非树冠区域）。

多尺度分割的思想是自下而上，逐级合并。它是以图像中任一像元作为中心点，将这个像元周围异质性最小的像元集合合并成一个对象单元，然后再把这些小单元逐渐聚合成一个较大对象的过程。在这个过程中，尺度参数、形状参数、紧致度参数是需要多次试验进行确定的参数。

## 2.3 冠幅面积计算

影像和实地调查的树冠面积( $S$ )计算公式<sup>[26]</sup>为：

$$S = \frac{\pi(R_{SN} + R_{EW})^2}{16} \quad (1)$$

式中： $R_{SN}$  和  $R_{EW}$  分别表示树木的树冠南北冠幅和东西冠幅。

## 2.4 精度分析

精度验证分为单木分割精度和冠幅估测精度两个部分。若某个野外实测树木在分割结果中不存在或者在该区域出现了多个分割树冠，则判定为错误分割，正确分割的树木的百分占比即为单木分割精度；根据3种影像下的单木分割结果以及外业实测冠幅大小，结合公式(2)、(3)，计算冠幅估测精度。

$$\delta = \frac{|L_M - L_T|}{L_T} \times 100\% \quad (2)$$

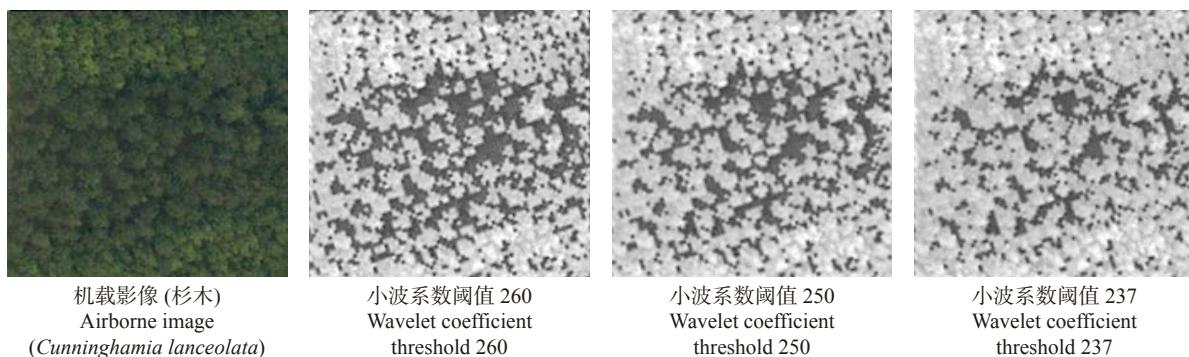


图4 原始影像及不同小波阈值处理后影像

Fig. 4 Original image and different wavelet threshold processed images

式中： $L_T$  为真实值，即外业观测值； $L_M$  为面向对象分割结果值； $\delta$  为冠幅估测相对误差。

冠幅估测精度( $R$ )计算公式：

$$R = \sum_{i=1}^n (1 - \delta_i) / n \quad (3)$$

式中： $n$  为树木个数， $\delta_i$  为第  $i$  个树木的相对误差。

## 3 结果与分析

### 3.1 小波增强效果

小波变换不同于傅里叶变换，根据小波母函数的不同，小波变换的结果也不尽相同。由于正交小波函数 sym4 进行分解时具有正交性和数据冗余最小的优点，因此本文选用 sym4 对图像进行处理。首先对研究区的影像进行小波二层分解，得到低频系数（近似）和高频系数（细节）；然后对低频系数进行增大，对高频系数进行缩小；最后对高频系数和低频系数进行小波系数重构，得到的图像结果突出了轮廓，弱化了细节，从而达到图像增强的效果。以图4为例，将原影像进行小波分解以后，设置系数阈值，如果低频系数大于系数阈值，则将该值增大2倍，以增强轮廓信息；若高频系数小于系数阈值，则缩小为原影像的一半幅度，来弱化图像内部噪声。通过多次对比实验，为不同影像设定不同的小波系数阈值，结果详见表1。图5是桉树和杉木在3种影像下进行小波增强变换得到的结果。本文对图像增强效果进行定量分析，主要采用图像均值、标准差和边缘强度3个参量，结果如表1所示。

从表1可以看出，机载影像和低空无人机影像经过小波增强后的图像的均值相较于原图明显增加，有良好的视觉效果；标准差的增大说明图像对比度增强；边缘强度，实质上是边缘点梯度的幅值，边缘强度越大表明图像轮廓信息越明显，经过小波增强后的图像的边缘强度显著增大，说明图像轮廓信息得到明显增强；GF-2 增强后影像边缘强度和标准

表1 统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics

树种 Species	影像 Image	小波阈值系数 Wavelet threshold coefficient	边缘强度 Edge strength	均值 Mean	标准差 Standard deviation
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	机载原始影像 Airborne original image	237	34.19	42.17	34.44
	增强后影像 Enhancement image		70.83	78.85	68.19
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	机载原始影像 Airborne original image	306	23.88	39.69	38.91
	增强后影像 Enhancement image		85.20	65.42	70.47
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	无人机原始影像 UAV original image	280	47.66	53.76	49.02
	增强后影像 Enhancement image		90.91	95.94	99.49
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	无人机原始影像 UAV original image	500	36.38	64.19	64.89
	增强后影像 Enhancement image		102.78	102.77	118.79
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	GF-2原始影像 GF-2 original image	1 050	150.35	131.40	103.17
	增强后影像 Enhancement image		118.15	133.01	98.74
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	GF-2原始影像 GF-2 original image	1 070	169.32	120.19	116.64
	增强后影像 Enhancement image		151.76	122.49	106.67

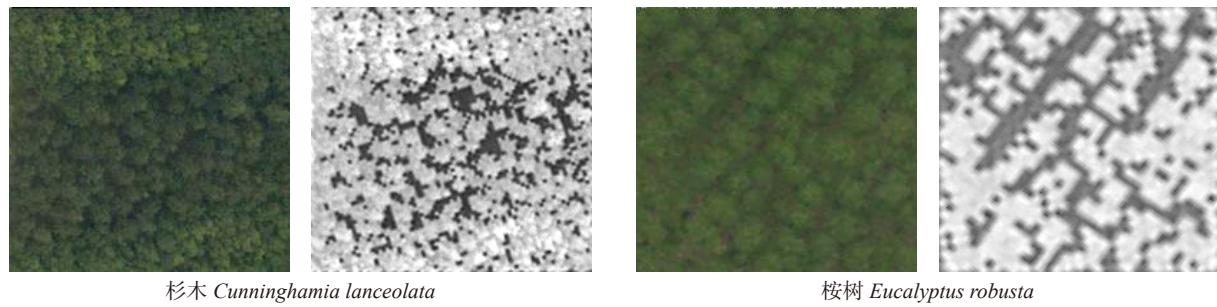
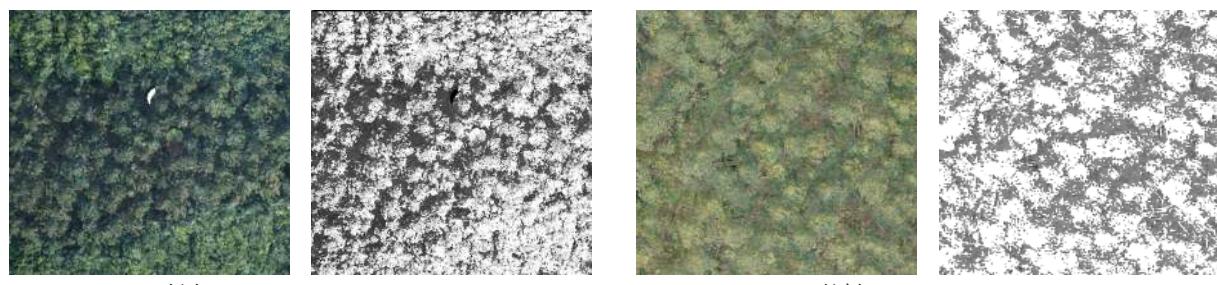
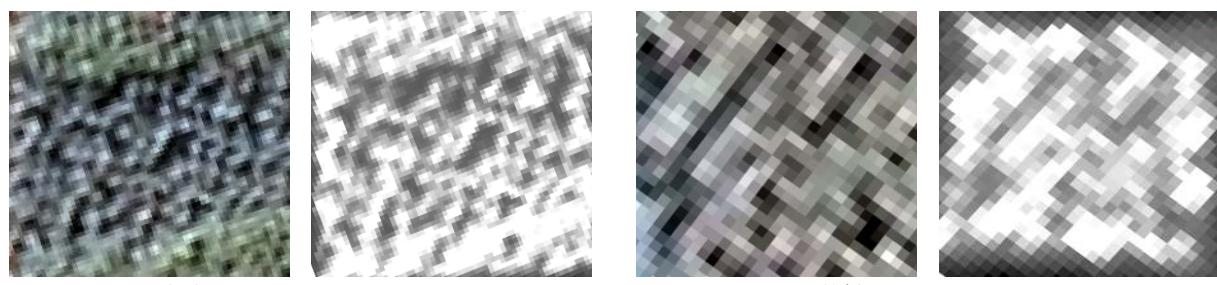
杉木 *Cunninghamia lanceolata*桉树 *Eucalyptus robusta*机载原始影像及增强效果  
Airborne original image and enhancement effect杉木 *Cunninghamia lanceolata*桉树 *Eucalyptus robusta*无人机原始影像及增强效果  
UAV original image and enhancement effect杉木 *Cunninghamia lanceolata*桉树 *Eucalyptus robusta*GF-2 原始影像及增强效果  
GF-2 original image and enhancement effect

图5 不同平台影像小波增强变换效果

Fig. 5 Wavelet enhancement transform effects for different platform images

差的结果反而有所降低，均值变化不明显。实验结果表明：本文方法在机载和低空无人机影像上增强效果明显，为后续图像分割奠定了基础；针对 GF-2 影像增强统计结果，并结合影像自身特点进行分析，该影像空间分辨率为 1 m，相比于其他两种平台下的影像分辨率，每棵树在影像上所包含的像元数量较少，且单木树冠有着明显的灰度最大值，周围像素依次递减，树冠与背景对比度明显，因此不需要对其进行小波增强变换处理来进行树冠内部噪声去除和增强轮廓。此外，为了更好地描绘树冠大小及边界，在小波系数阈值设定结果上可以发现，阈值的大小在不同树种和平台影像上有一定的变化规律，即在同一平台下桉树影像小波系数阈值高于杉木影像，同一区域在不同平台下阈值设定大小顺序依次为 GF-2 影像、低空无人机影像、机载影像。

### 3.2 多尺度分割提取树冠

本实验树冠分割的具体方法如下：

(1) 首先，通过树冠和背景区域多个分割对象的

选取，查看其阈值分布范围，然后设定影像中树冠与背景区域之间灰度阈值界限，对分割结果进行阈值分类，结果如图 6 所示，绿色为树冠区域。

(2) 在分类后的树冠区域进行多尺度分割，设置尺度参数、形状参数和紧致度参数，对单木树冠进行精细分割，最终分割结果与原图像叠加显示如图 6 所示，外业实测的单木位置在图中以黄色标记显示。

相关分割参数及规则设置详见表 2。

### 3.3 结果验证与分析

树冠提取的单木分割精度及冠幅估测精度详见表 3。由表 3 可知，GF-2 影像无论是单木分割精度还是冠幅估测精度都明显低于其他两种影像。这与影像自身分辨率密切相关，实验区树木平均冠幅不超过 4 m，GF-2 影像空间分辨率为 1 m，每棵树木在影像中包含的像元数量少，无法对较小树木进行有效地探测，得到树冠的形状和边界的准确描绘难度较大，从而影响了提取精度。在机载和无人机影像下，单木分割精度和冠幅估测精度结果相接近，但是

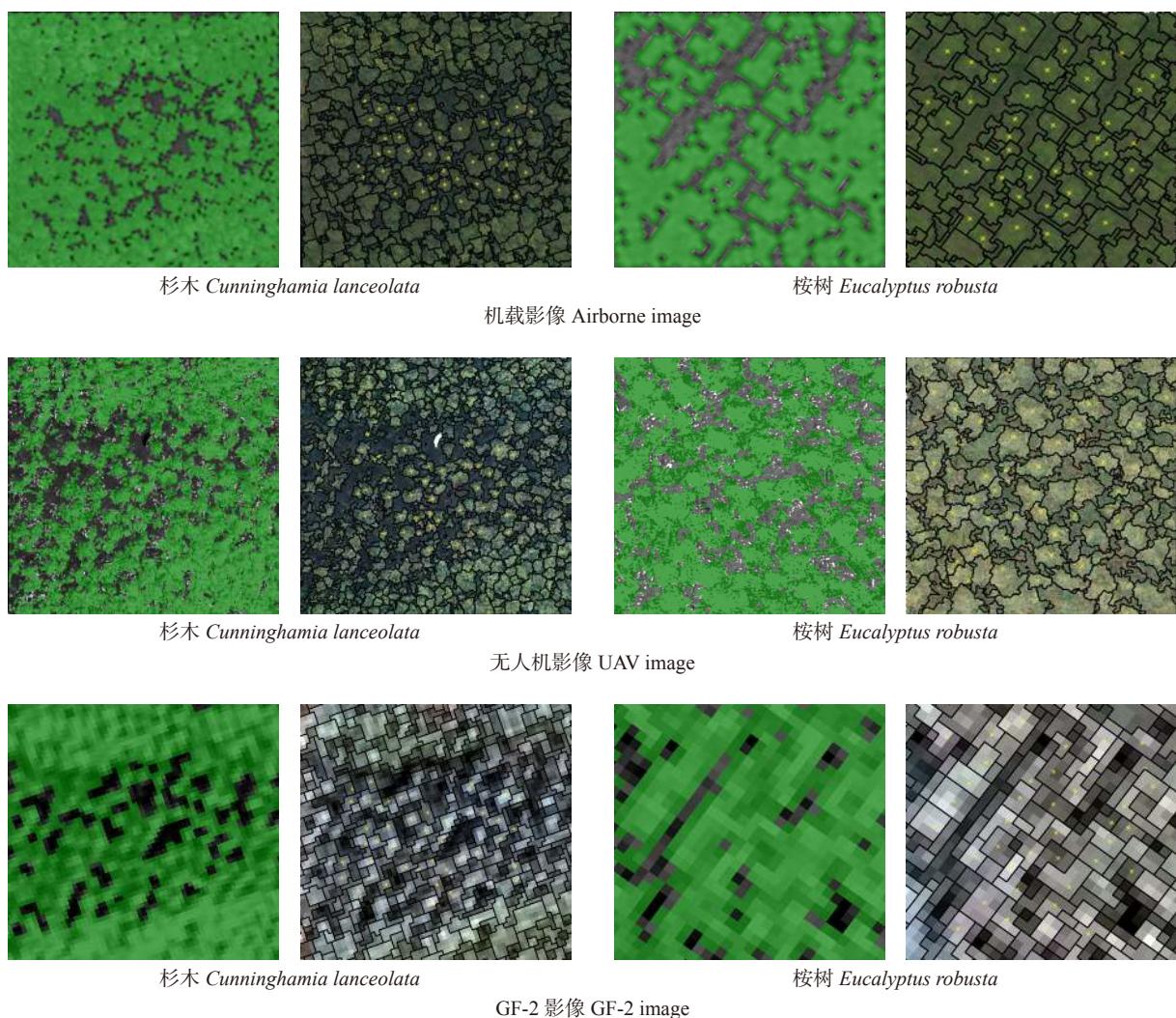


图 6 影像树冠区域及分割结果  
Fig. 6 Forest area and segmentation results

表2 面向对象树冠分割参数

Tab. 2 Object-oriented tree crown segmentation parameters

项目 Item	分割参数 Segmentation parameter	机载影像 Airborne image		无人机影像 UAV image		GF-2影像 GF-2 image	
		杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>
阈值分类 Threshold classification	灰度阈值 Gray threshold	> 70	> 82	> 105	> 125	> 35	> 85
单木树冠分割 Individual tree crown segmentation	分割尺度 Segmentation scale	18	12	120	130	4	4
	形状 Shape	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	紧致度 Compactness	0.5	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8

表3 单木树冠提取精度分析

Tab. 3 Accuracy analysis on extracted individual tree crown

项目 Item	树种 Species	树木总株数 Total number of trees	正确分割株数 Correct segmentation number of trees	单木分割精度 Tree crown segmentation accuracy/%	相对误差均值 Relative error mean/%	冠幅估测总精度 Tree crown estimation accuracy/%
机载影像 Airborne image	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	45	41	91.1	15.6	84.4
	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	45	40	89.0	16.1	83.9
无人机影像 UAV image	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	45	42	93.3	14.9	85.1
	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	45	39	87.0	15.8	84.2
GF-2影像 GF-2 image	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	45	40	89.0	26.7	73.3
	桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	45	37	82.0	27.7	72.3

在处理过程中发现,在空间分辨率为厘米级的无人机影像下,仍然对林下灌草或者其他植被进行了清楚的拍摄,通过灰度阈值对树冠和背景区域进行分类的效果不佳,而机载影像适宜的空间分辨率避免了这一问题;此外,机载影像获取范围更广,数据量更小,处理速度更快。从表3中还可以发现,杉木树冠提取精度优于桉树,这是因为杉木的树冠轮廓在影像上显示更加清晰,无论是在图像增强还是单木分割上都能提高对树冠边界和大小描绘的准确性。

#### 4 结论与讨论

本文针对米级、亚米级和厘米级的遥感影像,首先采用小波变换对图像进行增强处理,然后结合多尺度分割下树冠的提取精度,进行影像适宜性分析和评价。主要结论:(1)高分辨率影像在增强地物信息的获取能力的同时,地物信息呈现高度细节化,树冠与背景区域对比度不明显,处理结果中存在“椒盐现象”,因此引入小波变换对影像进行增强处理,针对不同影像提出了适合的小波增强变换参数,同时对增强效果进行定量分析,亚米级和厘米级影像的均值、标准差和边缘强度显著提升,说明在这两种尺度的影像下该方法能够有效增强树冠轮廓,弱化树

冠内部细节;同样对米级影像进行增强处理,所得结果显示该方法并不适用于这种尺度的影像;(2)对亚米级和厘米级影像小波增强变换后,排除背景区域的干扰,针对树冠区域进行单木树冠分割,得到杉木冠幅估测精度可达 84.4%,桉树因其相对不清晰的树冠轮廓使得在估测精度上略低于杉木;(3)对 3 种尺度的影像进行单木树冠分割,提出了适合的分割参数,得到的精度均能满足应用需求;米级影像的空间分辨率在单木识别和描绘树冠形态上有很大的局限性,因此杉木和桉树应用厘米级和亚米级影像可以达到更好的精度,相比于米级影像冠幅估测精度均可以提高 10% 以上,且获取这两种影像无论是从天气还是时间上都更加灵活,适合专业的科研学者精细调查使用,从另一个角度来看,米级影像下的提取精度也能够满足森林调查的基本需求;近几年来,随着更高空间分辨率的商用卫星陆续发射成功,如果需要一次性对大范围的森林信息进行获取,卫星影像具有很大的应用价值。

本文的研究仍存在以下不足:(1)亚米级和厘米级影像下冠幅估测精度可达 84.4% 以上,证明这两种影像的空间分辨率具备准确描绘树冠大小及轮廓的能力,但树冠提取与实测数据相比仍存在偏差,一是可能外业测量冠幅大小的过程中,在树冠存在连

续或者遮挡的情况下存在一定视觉误差,二是树冠区域涵盖灌草植被,影响最终精度;(2)即使对影像进行正射校正处理,仍不能解决由摄影角度误差、地物纹理贴合不准确导致的树冠几何形变问题,从而影响最终的提取精度,在今后的研究中需要在影像几何纠正方法上进一步探讨;(3)在本研究实验处理过程中,小波系数阈值、图像分割等参数是进行多次试验后手动设定,在后续的研究中应探究阈值系数大小选取依据以及参数自适应调节算法提高实验效率;(4)本次研究的3种影像的空间分辨率相差10倍左右,在接下来的工作中,结合本文研究结果,寻找出最佳尺度的遥感影像,并将合适的影像应用在不同地理位置、生长状况以及生态环境的人工林中,以树冠参数为基础建立胸径、森林郁闭度、材积等林分模型,降低林业调查成本,提高研究效率。

## 参 考 文 献

- [1] Ni W, Li X, Woodcock C E, et al. Transmission of solar radiation in boreal conifer forests: measurements and models[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(24): 29555–29566.
- [2] Song C, Band L E. MVP: a model to simulate the spatial patterns of photosynthetically active radiation under discrete forest canopies[J]. *Revue Canadienne De Recherche Forestière*, 2004, 34(34): 1192–1203.
- [3] 梁文海, 刘吉凯, 张伟, 等. 基于面向对象方法的GF-2影像桉树林信息提取[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(4): 721–729.  
Liang W H, Liu J K, Zhang W, et al. Extracting eucalyptus information using GF-2 images based on an object-oriented method[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, 34(4): 721–729.
- [4] Pouliot D A, King D J, Bell F W, et al. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2): 322–334.
- [5] Wang L, Gong P, Biging G S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(3): 351–358.
- [6] Francis A G. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1995, 21(3): 274–284.
- [7] Pollock R J. The automatic recognition of individual trees in aerial images of forests based on a synthetic tree crown image model[C]. Vancouver: The University of British Columbia, 1996: 172.
- [8] Leckie D G, Gougeon F A, Tinis S, et al. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(3): 311–326.
- [9] Wang L. A multi-scale approach for delineating individual tree crowns with very high resolution imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010, 76(4): 371–378.
- [10] 王宗梅, 徐天蜀, 岳彩荣. 基于高分辨率遥感影像的森林信息提取方法综述[J]. *林业调查规划*, 2016, 41(4): 1–6.  
Wang Z M, Xu T S, Yue C R. Extraction methods of forest information based on high resolution remote sensing images[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2016, 41(4): 1–6.
- [11] Skurikhin A N, Garrity S R, McDowell N G, et al. Automated tree crown detection and size estimation using multi-scale analysis of high-resolution satellite imagery[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(5): 465–474.
- [12] 冯静静, 张晓丽, 刘会玲. 基于灰度梯度图像分割的单木树冠提取研究[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(3): 16–23.  
Feng J J, Zhang X L, Liu H L. Single tree crown extraction based on gray gradient image segmentation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(3): 16–23.
- [13] 崔少伟. 基于高分辨率遥感数据单木树冠提取研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.  
Cui S W. Study on individual tree crown extraction based on high resolution remote sensing[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [14] 刘晓莉, 任丽秋, 李伟, 等. 阈值优化的遥感影像小波去噪[J]. *遥感信息*, 2016, 31(2): 109–113.
- [15] Liu X L, Ren L Q, Li W, et al. Threshold optimized wavelet for remotely sensed image denoising[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(2): 109–113.
- [16] 张霞, 汤森林. 一种去除遥感图像条带噪声的小波矩匹配方法[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(2): 305–312.  
Zhang X, Tang S L. Destriping remote sensing imagery by wavelet moment matching algorithm[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(2): 305–312.
- [17] 李超炜, 邓新蒲, 赵昊宸. 基于小波分析的遥感影像薄云去除算法研究[J]. *数字技术与应用*, 2017(6): 137–139, 143.  
Li C W, Deng X P, Zhao H C. Thin cloud removal algorithm based on wavelet analysis for remote sensing images[J]. *Digital Technology and Application*, 2017(6): 137–139, 143.
- [18] 陈杰, 邓敏, 肖鹏峰, 等. 利用小波变换的高分辨率多光谱遥感图像多尺度分水岭分割[J]. *遥感学报*, 2011, 15(5): 908–926.  
Chen J, Deng M, Xiao P F, et al. Multi-scale watershed segmentation of high-resolution multi-spectral remote sensing image using wavelet transform[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(5): 908–926.
- [19] 王学成, 杨飞. 基于面向对象分类方法的Rapideye桉树提取[J]. *桉树科技*, 2014(3): 10–16.  
Wang X C, Yang F. Extraction of eucalyptus plantations metrics using rapid-eye imagery with object-oriented classification method[J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2014(3): 10–16.
- [20] 郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于标记控制分水岭分割方法的高分辨率遥感影像单木树冠提取[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(9): 1259–1266.  
Guo Y S, Liu Q S, Liu G H, et al. Individual tree crown extraction

- of high resolution image based on marker-controlled watershed segmentation method[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(9): 1259–1266.
- [20] 沈利强, 姜仁荣, 王培法. 一种高分辨率遥感图像单木树冠信息提取方法[J]. *遥感信息*, 2017, 32(3): 142–148.  
Shen L Q, Jiang R R, Wang P F. A method for individual tree-crown extraction from high spatial resolution imagery[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(3): 142–148.
- [21] Ballanti L, Blesius L, Hines E, et al. Tree species classification using hyperspectral imagery: a comparison of two classifiers[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 445–462.
- [22] Roth K L, Roberts D A, Dennison P E, et al. The impact of spatial resolution on the classification of plant species and functional types within imaging spectrometer data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 45–57.
- [23] 韩鹏, 龚健雅, 李志林, 等. 遥感影像分类中的空间尺度选择方法研究[J]. *遥感学报*, 2010, 14(3): 507–518.  
Han P, Gong J Y, Li Z L, et al. Selection of optimal scale in remotely sensed image classification[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(3): 507–518.
- [24] Wang G, Gertner G, Anderson A B. Up-scaling methods based on variability-weighting and simulation for inferring spatial information across scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(22): 4961–4979.
- [25] 胡云峰, 徐芝英, 刘越, 等. 空间尺度上推方法的精度评价: 以内蒙古锡林郭勒盟土地利用数据为例[J]. *地理研究*, 2012, 31(11): 1961–1972.  
Hu Y F, Xu Z Y, Liu Y, et al. Accuracy analysis of up-scaling data: a case study with land use data in Xilin Gol of Inner Mongolia, China[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(11): 1961–1972.
- [26] 张凝, 冯跃文, 张晓丽, 等. 结合航空影像纹理和光谱特征的单木冠幅提取[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(3): 13–19.  
Zhang N, Feng Y W, Zhang X L, et al. Extracting individual tree crown by combining spectral and texture features from aerial images[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(3): 13–19.

(责任编辑 冯秀兰  
责任编委 张会儒)