

# 树冠提取技术研究进展\*

付尧 王新杰 孙玉军 汪锦

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083)

**摘要:**树冠是预估树木生长量的基本参数之一,树冠的提取在森林资源管理中越来越受到重视,但准确获得树冠的形状和边缘信息比较困难。目前,国内外树冠提取研究主要是利用高分辨率影像、航空像片、数码相机影像以及雷达等介质,以面向对象多尺度分割技术为主,兼有专家分类、三维扫描、BP神经网络等方法。文中介绍了树冠提取技术的主要方法,总结了树冠提取技术中存在的问题及发展前景。

**关键词:**树冠,树冠提取,面向对象,影像分割,遥感技术应用

中图分类号:S758.5,S771.8,TP79

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2013)04-0038-05

## A Study of Tree Crown Information Extraction Method

Fu Yao Wang Xinjie Sun Yujun Wang Jin

(The Key Laboratory for Silviculture and Forest Conservation of Ministry of Education,  
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Tree crown is one of the basic parameters by which we can estimate the increment. More and more attention has been paid to tree crown information extraction and its application to forest resources management, but it is difficult to extract the shape and edge information of tree crown accurately. In the recent researches, high resolution images, aerial photograph, digital camera images, radar, etc. have been used to extract tree crown information with object-oriented segmentation technology, supplemented by expert classification, 3D scanning and the BP network method. The paper introduced the main methods used in tree crown extraction technologies and finally summarized the problems and development prospects of crown extraction technology.

**Key words:** tree crown, tree crown extraction, object-oriented, image segmentation, application of remote sensing technology

树冠反映了树木的光合作用率、树木进行光合作用的面积以及有机物的传输距离,树冠层中的分枝特性、枝条数量、叶面积及其分布以及冠长、冠表面积、冠体积等因子在空间上的分布是树冠结构的主要指标<sup>[1]</sup>。树冠结构会影响主干生长量的垂直分配以及主干、侧枝生长量的分配关系<sup>[2]</sup>。在森林群落中,上层林冠的存在直接导致林下辐射量的降低,而光生态因子是林下植被发育、生态系统作用过程中关键的决

定性因素,树冠遮荫与林下包括太阳辐射在内的小气候特征具有密切关系<sup>[3]</sup>。因此,树冠的提取在森林资源管理中越来越受到重视。但由于森林结构的复杂性,使得树冠形状和边缘信息的获得异常困难。样地实测法虽然能够满足要求,但费时费力<sup>[4]</sup>。遥感技术提供了一个潜在的低成本方法,但是需要简化提取信息的方法,提高提取信息的精确度。近年来,国内外学者对树冠提取领域进行了研究,并取得一定的进展。

\* 收稿日期:2012-11-09

基金项目:林业公益性行业科研专项林改后南方林地可持续经营关键技术与集成示范(201004008);林业公益性行业科研专项基于林改的森林多功能经营技术与示范(200904003-1)

作者简介:付尧(1985-),女,博士,主要研究方向森林资源监测与评价,E-mail:fuyao85@126.com

## 1 基于高分辨率遥感影像

### 1.1 面向对象技术

面向对象技术是以对象为最小单位,不仅依靠地物光谱的信息分类,更是利用地物结构信息几何形态来对影像进行分割,得到若干同质像元组成的大小不同的对象。在此基础上,通过地物多种特征实现目标的提取<sup>[5-6]</sup>。

Culvenor<sup>[7]</sup>提出一种基于高分辨率影像的树冠识别算法。首先利用原始影像局域辐射最大值和最小值提取树冠边界,然后采用“自上而下”的空间聚类法减少树冠分割的影响。空间聚类是将连续的像元聚合为单一的空间性对象。他研究了算法的假设和基本处理过程,给出一个输出的例子和参数设置,讨论了可能的阈值,认为该法最适合研究有较好冠形的成熟林。覃先林<sup>[8]</sup>等率先利用面向对象技术对树冠信息提取进行了研究,通过基于样本的模糊分类方法可以有效提取树冠大小信息,表明采用多尺度分割方法可以一定程度地提高图像对象的精度。王茹雯<sup>[5]</sup>等利用面向对象技术对京津风沙源工程区内延庆县试验地的树冠信息进行了提取,监测平均精度达到80.02%。他发现针叶林提取精度高于阔叶林,而针阔混交林的树冠面积提取难度较大,需要深入研究。吴见<sup>[6]</sup>等采用光谱阈值对快鸟多光谱影像进行一级分割得到植被区域,通过基于边缘的算法对快鸟全色影像进行二级分割,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%。施敏燕<sup>[9]</sup>基于快鸟影像采用面向对象的多层次图像分割方法对额济纳胡杨林树冠信息进行了提取,结果表明,在稀疏或成片的胡杨林区域,计算机解译可以准确表示出植株的分布情况,而多级图像分割技术对密集样地的精度(用户精度72.05%,生产者精度83.21%)较稀疏样地偏低(用户精度87.63%,生产者精度89.49%)。

地理信息(包括遥感数据)对不同现象的分界线是模糊的。同传统方法相比,模糊集理论更适合于处理现实世界中的问题。模糊分类可以获取混合像元中多种组成种类的信息,作为模糊分类的输入,可以选取那些包含不同地物的异质混合区域作为训练样区,从而生成能更准确代表真实世界的最终分类图<sup>[10]</sup>。

Shackelford 和 Davis<sup>[11]</sup>结合像素和对象利用模糊算法对城市地区高分辨率多光谱数据进行分类,基于对象通过高分辨率多光谱图像数据建立基于像素的模糊分类算法对城市土地覆盖进行分类,研究表明,密集的城市地区的 IKONOS 全色波段影像结合像素/对象的分类方法是可行的。基于像素的模糊分类器利用光谱空间信息来区分光谱相似的道路和城市建筑,接着利用光谱和空间异质性基于对象对影像进行进一步分割。基于对象的模糊逻辑分类器通过识别附加的密集城市地区来提高基于像素特征的分类精度。基于像素分类作为输入,再利用对象分类器的形状、光谱和邻近值确定最后影像的分割分类,基于对象的分类可以确定密集的城市地区的建筑、非渗透表面和道路,可使精度分别达到76%,81%和99%。

### 1.2 射线法

D. A. Pouliot 和 D. J. King<sup>[12]</sup>等利用射线法对树冠进行自动化识别勾绘。随后,熊轶群<sup>[13]</sup>等提出一种基于射线法的半自动树冠面积提取算法,即通过用户指定树冠中心,然后引出若干条光谱射线进行高次曲线拟合,求其拐点作为树冠的边界点,去除各射线拐点连接的多边形尖锐角,对树冠重叠区域进行处理,最后得到多边形树冠轮廓,进而得到树冠面积。利用该方法提取树冠面积的精度接近或高于85%,对于分布均匀、重叠较少的区域更为准确。但射线法不能提取落在阴影中的树冠面积,重叠面积一般小于目视解译的结果。

### 1.3 多尺度分割法

郭建聪<sup>[14]</sup>等提出了多尺度分割方法,该方法首先需要计算多光谱图像的梯度,然后去除上下不相关的局部最小区域,进而计算分水岭的动态范围,通过设置不同的阈值范围得到多尺度的分割结果。该方法能准确分割出大部分地物,反映各类地物的多层次信息。分水岭算法<sup>[15]</sup>是一种数学形态的非线性分割法,它把图像看作地形曲面,以灰度级对应地形中的海拔高度,每一个局部极小值及其影响区域称为集水盆,而集水盆的边界则形成分水岭。

### 1.4 基于颜色纹理特征

颜色是客观地物的物理特性,表示颜色的特征空间很多,最常见的是 RGB 空间,它是根据人眼椎体接收光线的方式构成的,比较接近于人对颜色视觉感知的饱和度、色度及亮度空间。彩色遥感图像使用红(R)、绿(G)、蓝(B)三分量表示,他们之间有着很高

的相关性。为了降低颜色特征空间各个通道的相关性,利于分割,往往在目标提取中将图像从 RGB 空间变换到其他颜色特征空间。对遥感图像纹理分析可以分为从颜色向量空间提取和从颜色空间的每个通道提取。Komura 和 Muramoto<sup>[4]</sup>将具有相似颜色的树冠用圆圈勾绘,可以获得林分密度、大小和树种信息,利用多光谱颜色信息辅以高空间分辨率全色波段的空间信息可以增加森林分类的类型。张慧<sup>[16]</sup>等结合树冠在图像上明显的颜色信息和纹理特征对分布在城市居民区内的树冠进行了提取,颜色信息可以将背景中道路和建筑物分离出去,进而通过树冠的纹理特征将草坪分离出去,再在提取结果的基础上利用圆模型对单个树冠进行描绘标注,准确率可以达到 90% 以上。

### 1.5 基于统计和驱动扩散

林殷<sup>[17]</sup>等对 INRIA 使用标记点过程提取图像中精细结构的方法进行了优化,INRIA 是将当前模型的数量及每个模型的参数作为一个配置,提取的任务就是优化参数配置。林殷等利用树冠特征使用标记点过程对树冠建模,采用马尔科夫链蒙特卡罗算法配合模拟退火算法提取树冠参数,最后通过遥感图像的实验验证证明该方法具有有效性。

## 2 基于航空像片

### 2.1 多尺度树冠分割

李朝阳<sup>[18]</sup>等提出了基于数字表面高程模型(DSM)和多尺度权聚类图像分割算法,这种算法基于 DSM,通过选取阈值来确定候选树冠区域,进而通过姿态定位系统(POS)将树冠顶点投影到不同摄影角度的图像上,确定待分割树冠的种子点,最后采用多尺度选权分割算法得到多尺度分割图像。该方法可以有效分割复杂背景下的树冠形状。T. Brandtberg 和 F. Walter<sup>[19]</sup>基于高空间分辨率红外彩色航拍影像提出一种多尺度自动提取单木树冠的方法。他们通过计算每个影像尺度下的灰度曲率,将带有灰度曲率的过零点识别为树冠轮廓<sup>[20]</sup>,修正过的曲率中心由每段的边缘像素估测得来,这些中心点形成椭圆和一些平均曲率圆的原始轮廓,模型描述了该区域在当前尺度下基于边缘的派生树冠。Wang 和 Gong<sup>[21]</sup>等将单木树冠轮廓和树冠顶点定义在同一框架下,所用影像为机载光谱成像仪影像,利用分水岭分割法识别边界,在最小有效尺度上用高斯边缘检测的拉普拉

斯算子来屏蔽背景,然后根据辐射值和几何学建模,假设树冠顶点的局部辐射值最大且位于树冠的中心位置,创建掩膜图像确定分水岭,进而分割图像获得树冠边界。

### 2.2 专家分类法

由于同物异谱现象及混合像元的存在,自动分类的精度往往达不到生产要求。人们总结了自然界规律性的事物,建立了知识库和推理机,知识库中存储专家判断这些事物的规则,推理机根据所制定的规则进行推理计算,进而分类并计算其精度,当精度不够时,分析原因,修改某些规则,以使其精度达到要求<sup>[22]</sup>。

李超<sup>[23]</sup>等将 DEM 信息、纹理信息、立地条件特征及红松生境信息作为专家知识构建红松树冠识别模型来对大比例尺航片进行分类,通过专家分类器设置变参与分类,运用混淆矩阵分析法对结果进行精度检验,结果表明,该方法能有效降低“同物异谱”和“同谱异物”现象,总体精度可以达到 96%。王二丽等<sup>[24]</sup>基于航空像片结合同期二类调查数据,采用子像元分类方法分别提取出红松等 3 种针叶林的专题影像图,并进一步将其转化为矢量图形,采用目视解译方法提取上层树冠信息,其提取精度均可达到 82.26% 以上。

### 2.3 谷地跟踪法

M. Katoh<sup>[25]</sup>等在日本针叶树人工林中结合单木树冠数据应用高分辨率机载数据对林分进行区划,生成林分类型图和密度图等。林地面积在 GIS 数据库由森林边界提取并区分于非林地区,他们利用谷地跟踪法来识别 UltraCamD 数字航摄仪的彩色影像单木树冠。该方法是用计算影像的光谱值阴暗地区代表谷地、明亮的像素代表树冠、波段的光谱信息来区分树种。结果表明,森林资源可以在单木水平上进行测量。他们绘制了扁柏、日本赤松、日本落叶松、日本柳杉以及其他针叶树和阔叶树的树冠分布图,精度达到 78%;进而根据树冠覆盖情况产生森林类型图、森林密度图和有林地分布图。自动提取的森林立地信息与森林清查数据相比,单木树冠估计误差因大小、形状及其他因素从 0.3% 到 30.2% 不等。在林分密度较大的混交林中,冠幅小于 5 m 森林的误差最大,而冠幅大于 6.2 m 森林的估计误差只有 11.6% 甚至更小。该方法适合于针叶纯林,不适合于混交林和密度较大的林分。

### 3 基于三维激光扫描系统

三维激光扫描系统主要由三维激光扫描仪和系统软件组成,具有扫描范围大、速度快、精度高及易于建模等优点。扫描仪向物体发射近红外波长激光束,经过漫反射部分信号被接收器接收,通过激光束的往返时间计算仪器中心和目标点间的距离<sup>[26]</sup>。

冯仲科、熊妮娜<sup>[26-27]</sup>等利用三维扫描成像系统建立了树冠模型并对树生物量进行了研究。他们把单木的整个树冠看作单个小圆台组成的立体,对树冠部分点数据进行测量,对每个小圆台的表面积体积求和,算出整个树冠在空间所占有的体积和表面积。利用三维激光扫描系统获取树冠信息的方法在一定程度上能够减少人为影响,提高测量精度。但是,由于三维激光扫描系统属于高精密度仪器,造价昂贵,在林业调查中并未普及。

### 4 基于数码相机影像

#### 4.1 多层次分割法

赵峰<sup>[14]</sup>采用 25 cm 空间分辨率的数码相机影像进行多级分割,第 1 个层次尽量完整地提取植被信息;第 2 个层次将第 1 个层次提取的植被多边形合并成一个对象,分割只针对已提取的植被对象进行;第 3 个层次经过边缘提取后重新进行基于类的融合,以对树冠进行再分割,获取较为准确的单株树冠信息。研究得出,不同树种的最适宜分割尺度不同,对于树冠较分散树种的树冠提取效果不佳。D. A. Pouliot 和 D. J. King<sup>[28]</sup>利用全局最优过滤器、局部最优过滤器自动检测出树冠,利用固定窗口算法检测树冠轮廓,进而用分水岭分割算法对分割后的树冠进行合并。

#### 4.2 半球图像法

半球图像法基于高分辨率数码相机配备超广角鱼镜头拍摄半球面数码图像,鱼镜头能够产生接近或等于 180° 的视角,既可以清楚地采集冠层顶部图像,也可以采集到冠层侧方一定范围内的形态结构特征<sup>[29]</sup>。其优势在于:图像为数码格式;数据获得和图像处理可以直接在野外进行;能够预览图像,对设置天空条件和曝光环境有帮助<sup>[30]</sup>。赵传燕等利用半球图像对祁连山区青海云杉的盖度进行了反演。彭焕华<sup>[29]</sup>等利用半球法提取的树冠冠幅值与野外实测值非常接近,但地面实测法受样地植株分布及观测者经验的影响较大,而半球图像法则比较客观,还可以提取冠层

周长、冠层孔隙度<sup>[31]</sup>等参数,对植被冠层的细小变化也能够进行准确反映,是对地面法的一种很好补充。

#### 4.3 基于序列影像匹配的独立树冠可视化

王志和<sup>[32]</sup>等通过非量测相机拍摄树木的多幅序列影像,进而完成树木三维模型重建。该方法基于物体真三维重建的摄影原理,首先从影像中提取局部区域灰度明显变化的特征点,从而获得同名点对,进而使用多基线影像与金字塔分层相关技术进行序列影像匹配;然后利用同名点对计算出的模型坐标构建不规则三角网;最后在得到的树冠数字表面模型上进行纹理映射,得到树冠三维景观图。研究表明,该方法能够真实地反映树木的形状特征,在可视性上有一定程度提高。

#### 4.4 射线法

D. A. Pouliot 和 D. J. King<sup>[12]</sup>等基于高分辨率数码相机图像对树冠自动化识别勾绘,先是对图像进行预处理,以增强树冠顶点和抑制明亮土壤的光谱特性,接着利用针叶林树冠顶部具有局部最大亮度值这一特性,用局部最大值过滤器自动检测出树冠顶点信息,引出若干条射线,得到树冠分布信息。

#### 4.5 BP 神经网络

人工神经网络具有分布式信息存储、大规模并行处理、自适应性、自组织性等优点,在图像处理上得到广泛应用。BP 神经网络是以误差逆传播算法训练的多层前馈网络,无需事前用数学方程进行描述,能够学习和存储多个输入—输出模式映射关系,通过不断反向传播来调整神经网络的权值和阈值,减小误差<sup>[33]</sup>。赵茂程<sup>[34]</sup>等基于 BP 神经网络结合分形理论,利用神经网络自组织能力完成树形的识别,研究表明,系统对树形的识别率较高,且不受修剪与否的影响。

### 5 基于机载激光雷达数据

机载激光雷达是一种主动遥感技术,采样密度高的数据在单株木上一般有几十个至几十个以上的激光回波模型,可以提取树冠特征参数。刘清旺<sup>[35]</sup>等采用双正切角树冠识别法,通过计算树冠顶点与树冠上点之间的正切角来判断树冠边缘,结果发现,机载激光雷达数据提取的单株木冠幅平均大于外业测量的单株木冠幅,样地冠幅平均值的相关性显著( $R^2$  为 0.71),但是单株木冠幅的相关性特别差( $R^2$  为 0.03)。

### 6 结语

目前,树冠提取技术已经较以前有了很大的进

步,但是复杂的自然背景使得树冠形状和边缘信息的获得比较困难。如何利用森林多层次信息进行图像分类和目标识别仍是将来的研究方向。如何解决单株木的偏冠造成的多个树冠聚集、相邻树冠交叉导致单个树冠间的界限不明显的问题也将是今后的研究重点。大量研究都以提取树冠表面特征为主,今后要对树冠的内部结构特征,如树冠体积、树冠叶面积密度等进行进一步研究。另外,验证单株木识别精度样地的野外测量方案也很关键,应针对不同林分条件制定相应的外业方案<sup>[35]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 廖彩霞. 树冠表面积及体积的预估[J]. 科技信息, 2010(16): 100-101.
- [2] 刘奉觉, 郑世锴, 卢永农. 树冠结构对主干生长量垂直分配的影响[J]. 林业科学, 1991, 27(1): 14-20.
- [3] 张蕾, 于海业, 杨昊谕, 等. 坡面单木圆锥形树冠投影边界的模型理论[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3317-3323.
- [4] Komura R, Muramoto K. Classification of forest stand considering shapes and sizes of tree crown calculated from high spatial resolution satellite image[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007, IEEE, 2007; 4356-4359.
- [5] 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.
- [6] 吴见, 彭道黎. 基于面向对象的 QuickBird 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.
- [7] Culvenor D S. TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(1): 33-44.
- [8] 覃先林, 李增元, 易浩若. 高空间分辨率卫星遥感影像树冠信息提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 228-232.
- [9] 施敏燕, 郭春蕾, 杨小婷, 等. 基于 Quickbird 影像的额济纳胡杨林树冠提取[J]. 科技创新导报, 2011(5): 13-15.
- [10] John R J, 陈晓玲. 遥感数字影像处理导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 374-378.
- [11] Shackelford A K, Davis C H. A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multispectral data over urban areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10): 2354-2363.
- [12] 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.
- [13] 熊轶群, 吴健平. 基于高分辨率遥感图像的树冠面积提取方法[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 30-33.
- [14] 郭建聪, 李培军, 肖晓柏. 一种高分辨率多光谱图像的多尺度分割方法[J]. 北京大学学报: 自然科学版网络版(预印本), 2008(3): 123-127.
- [15] 罗玲, 解梅, 陈杉. 基于多尺度形态滤波的分水岭图像分割方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(2): 168-173.
- [16] 张慧, 王宏琦, 孙显. 结合颜色和纹理特征的树冠提取方法[J]. 光学技术, 2008, 34(4): 613-616.
- [17] 林殷, 李恒超, 洪文. 基于数据驱动和统计扩散的树冠提取方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2103-2106.
- [18] 李朝阳, 阎广建, 肖志强, 等. 航空图像中基于 DSM 的多尺度树冠分割[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(6): 40-43.
- [19] Brandtberg T, Walter F. Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis[J]. Machine Vision and Applications, 1998, 11(2): 64-73.
- [20] 刘晓双, 黄建文, 鞠洪波. 高空间分辨率遥感森林参数提取探讨[J]. 林业资源管理, 2009(2): 111-117.
- [21] Wang L, Gong P, Biging S G. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high spatial-resolution aerial imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(3): 351-357.
- [22] 游先祥, 马建维, 缪印华, 等. 遥感原理及在资源环境中的应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 448.
- [23] 李超, 岳树峰, 王胜蕾, 等. 大比例尺航片正射影像中的树冠提取[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(9): 71-73, 77.
- [24] 王二丽, 李凤日, 王敏, 等. 基于大比例尺航片的针叶树种冠幅的提取[J]. 森林工程, 2011, 27(6): 16-22.
- [25] Katoh M, Gougeon F A, Leckie D G. Application of high-resolution airborne data using individual tree crowns in Japanese conifer plantations[J]. Journal of Forest Research, 2009, 14(1): 10-19.
- [26] 熊妮娜, 王佳, 罗旭, 等. 一种基于三维激光扫描系统测量树冠体积方法的研究: 以油松为例[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊2): 61-65.
- [27] 冯仲科, 罗旭, 马钦彦, 等. 基于三维激光扫描成像系统的树冠生物量研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊2): 52-56.
- [28] Pouliot D, King D. Approaches for optimal automated individual tree crown detection in regenerating coniferous forests[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2005, 31(3): 255-267.
- [29] 彭焕华, 赵传燕, 冯兆东, 等. 利用半球图像法提取植被冠层结构特征参数[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3376-3383.
- [30] 赵传燕, 齐家国, 沈卫华, 等. 利用半球图像反演祁连山区青海云杉(*Picea crassifolia*)林盖度[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4196-4205.
- [31] Lang M, Kuusk A, M O Ttus M, et al. Canopy gap fraction estimation from digital hemispherical images using sky radiance models and a linear conversion method[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 20-29.
- [32] 王志和, 张剑清, 江万寿. 一种基于序列影像匹配的独立树冠可视化方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(1): 39-44.
- [33] 王冬, 赵同林, 端蕊. 浅谈人工神经网络在林业中的应用[J]. China's Foreign Trade, 2010(22): 437.
- [34] 赵茂程, 郑加强, 林小静, 等. 基于 BP 神经网络的树形识别系统研究[J]. 林业科学, 2004, 40(1): 154-157.
- [35] 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83-89.