西北林学院学报 2020,35(2):160-168
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2020.02.24

基于 DOM 航空影像单木树冠提取

赵 勋[1],岳彩荣[1*],李春干[2],谷 雷[1],张国飞[1]

(1.西南林业大学 林学院,云南 昆明 650224;2.广西大学 林学院,广西 南宁 530004)

摘 要:准确提取单木树冠边界是获取森林数量参数的重要基础,是高分辨率遥感图像林业应用的技术难题。基于 DOM 航空影像数据源,采用面向对象的方法对研究区内的 2 个树种的林分进行了单木树冠边界提取研究。首先利用桉树和杉木的空间分布矢量数据对 DOM 航空影像进行掩膜处理,在掩膜区域内进行多层次多尺度图像分割得到初步树冠分割结果,并剔除非树冠信息;再以树冠信息种子对象为基础,使用区域增长算法对树冠信息种子对象增长得到单木树冠范围;最后使用形态学滤波的方法优化单木树冠边界,完成林区内桉树和杉木两类树种的单木树冠边界提取。结果表明,由于不同树种的树冠存在尺度和形态差异,进行单木树冠分割时需要设置不同的参数才能到达较好的分割效果。本研究中桉树和杉木的单木树冠提取总体精度分别为 86.75% 与 89.21%,可满足林业部门获取森林单木树冠的精度需求。

关键词:DOM 航空影像;小班数据;面向对象;区域增长;形态学滤波;单木树冠

中图分类号:S771.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-7461(2020)02-0160-09

Individual Canopy Boundary Extraction Based on DOM Aerial Images

ZHAO Xun[1], YUE Cai-rong[1*], LI Chun-gan[2], GU Lei[1], ZHANG Guo-fei[1]

(1. *College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *Yunnan, China*;
2. *College of Forestry, Guangxi University, Nanning* 530004, *Guangxi, China*)

Abstract: Accurate extraction of individual canopy boundary is an important basis for obtaining forest quantity parameters and a technical difficulty in forestry application of high-resolution remote sensing images. Based on DOM aerial image as data source, this paper adopted object-oriented method to extract the individual canopy boundary of two tree species in the study area. Firstly, the spatial distribution vector data of *Eucalyptus robusta* and *Cunninghamia lanceolata* were used to mask DOM aerial images, and the multi-layer and multi-scale image segmentation were carried out in the mask region to obtain the preliminary tree canopy segmentation results, and the non-tree canopy information was removed. Then, the tree crown information seed object was taken as the base, the regional growth algorithm was used to grow the crown information seed object to obtain the range of individual tree crown. Finally, morphological filtering method was used to optimize the canopy boundary of individual trees. Extraction of individual canopy boundary of *E. robusta* and *C. lanceolata* was completed in the forest area. The results showed that, due to the differences in the size and morphology of the crowns of different tree species, different parameters needed to be set to achieve a better segmentation effect. In this study, the overall precisions of single tree canopy extraction of *E. robusta* and *C. lanceolata* were 86.75% and 89.21%, respectively, which could meet the requirements of forestry department for the accuracy of obtaining forest single tree canopy.

收稿日期:2019-06-18 **修回日期**:2019-08-28

基金项目:亚太森林网络(APFNET/2018P1-CAF)-大湄公河次区域森林可持续发展遥感监测;云南省教育厅项目(2018JS330);国家自然科学基金(31260156)。

作者简介:赵 勋,男,硕士在读,研究方向:资源环境遥感。E-maill:617277977@qq.com

* **通信作者**:岳彩荣,男,教授,博士生导师,研究方向:林业遥感。E-maill:cryue@163.com

Key words: DOM aerial image; sub-compartment data; object-oriented; region growth; morphological filtering; canopy boundary of individual tree

树冠是树木进行光合作用并进行能量转换的主要场所,它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。同时,树冠结构也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[1-3]。对树冠进行准确的判断和研究,可以很好地用来监测树木的长势,预测树木的林分密度、估计林木竞争关系等[4]。树冠还是构建林分模型的重要输入参数,例如生物量、蓄积量的估测模型[5-7],还有那些模拟通过林冠传递能量或质量的模型[8-9]。因此,如何准确的提取树冠信息,实时监测森林生长状况,动态变化在森林资源管理中越来越受重视。遥感技术的出现,给树冠信息的提取带来了便利,区别于传统的森林因子调查方式,遥感技术可大区域、低成本,省时省力的完成相关森林因子的调查。随着高空间分辨率影像数据的可用性和处理能力提高,越来越多的林业遥感研究将重点放在单株树木的检测和测量上,而不仅仅只是获取林分水平的统计数据[10]。

对于遥感影像而言,传感器自上而下拍摄树木信息,通常最先获取到是树木的顶部信息。因此树冠在遥感影像中代表了树木表面的主要信息,利用遥感影像很容易对树冠进行识别和提取。现今,国内外研究中基于遥感影像的识别单木树冠主要以高分影像为数据源,结合相应的方法对树冠进行提取。例如,目视手动法[4],此方法是目前林业调查生产中较传统的方法,可直接在遥感影像上通过目视解译勾绘出树冠边界,虽然此类方法可满足林业生产应用,但在目视解译过程中完全依赖于影像判读者的经验,且费时费力,很难完成大区域下的单木树冠信息获取;基于像元的方法,此方法容易产生“同物异谱,异物同谱”现象,同时“椒盐现象”产生的噪声也会使得提取的树冠信息不完整[11]。这类方法主要借助局部最大值法[12]、分水岭分割法[13]、模板匹配法[14]、多尺度法[15]等算法完成对单木树冠直接或间接的提取;基于面向对象的方法,此方法充分利用高分影像的光谱、形状、纹理、上下文等信息,结合分割算法,得到若干同质性最大、异质性最小的斑块,以此为基础提取单木树冠信息。基于面向对象的方法有利于消除“椒盐现象”,在找到最优尺度的情况下,可得到相对完整的树冠信息。多位研究者[1,16-17]使用面向对象方法基于高分影像提取单木树冠都取得了较好的效果。

随着遥感技术的发展,高分卫星影像、无人机遥感、航空遥感发展迅速。高分卫星影像以美国的 QuickBird 和 WorldView 为代表,其空间分辨率分别到达到了 0.61 m 和 0.50 m。中国的高分 2 号卫星和资源 3 号卫星空间分辨率也达到了 1 m 和 2.5 m。覃先林等[18]利用 QuickBird 卫星利用面向对象的方法对杨树和橡胶树树冠信息进行了有效的提取,同时研究也指出了高分卫星的局限性,仅能对大于 60 cm 的树冠进行提取。因此在森林覆盖区域特别是中幼林进行单木树冠提取仍具有较大困难。航空影像特别是无人机影像具有成本低、方便灵活、云下成像、影像空间分辨率高(可达 0.1 m 或更高)等特点[19],给森林单木提取提供了条件。但无人机续航时间短,一般飞行时长为 10～30 min[20],难以进行大范围影像获取,航空影像具有大范围获取数据的优势,且具有搭载重量大,数据质量高的特点。为实时、动态获取大区域数据提供了基础保障。赵峰等[21]使用航空数码影像检测出单木树冠信息并协同机载 LiDAR 数据完成了林区内单木树高提取,张凝等[22]结合航空影像的光谱和纹理特征对林区内单木树冠进行了提取,研究取得了较好的结果。

综合分析前人研究发现,鲜有研究利用航空影像对目的树种桉树和杉木人工林进行有针对性的单木树冠信息提取。因此本研究选取广西壮族自治区高峰林场试验区内的子区域为研究区,基于 DOM 航空影像数据源,使用面向对象的方法多层次分树种、多尺度对林区内桉树和杉木的单木树冠进行提取。为航空影像在桉树和杉木人工林中提取单木信息提供一个案例参考。同时也为实现自动、批量、准确提取单木树冠,使相关林业资源管理部门高效、低成本获取单木树冠信息,结合单木树冠,获取其他森林特征参数提供依据,对森林可持续经营管理、进一步动态监测的深入发展具有重要的现实意义。

1　研究区概况与数据介绍

1.1　研究区概况

研究区位于广西壮族自治区南宁市北部高峰林场试验区内,试验区中心地理位置为 108°25′45″E,22°58′33″N。此区域是一个呈东北-西南走向的近矩形区域,宽度 4.2 km,长度 11.2 km,面积 477 hm^2。试验区涉及高峰林场的界牌、东升、延河 3 个分场,还有武鸣区,兴宁区、西乡塘区的少量林地。试验区内海拔 90～460 m,地形封闭,坡度范围为 24～34°,森林覆盖率≥90%,约 95% 为人工林,除

去桉树外，年龄大多在 15 a 以上，主要树种为尾叶桉（*Eucalyptus urophylla*）、巨尾桉（*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*）、马尾松（*Pinus massoniana*）、湿地松（*Pinus elliottii*）、杉木（*Cunninghamia lanceolata*）、八角（*lllicium verum*）、红椎（*Castanopsis hystrix*）、火力楠（*Mytilaria macclurei*）、米老排（*Mytilaria laosensis*）、厚荚相思（*Acacia crassicarpa*）等。选取试验区内一块子区域作为研究区（图 1 红色框），研究区内主要以桉树林和杉木林为主。桉树和杉木在广西壮族自治区属于最大的人工种植林，具有较大的生态和经济价值。从研究区 2 种典型的树种入手，对比研究基于面向对象的方法提取不同树种类型单木树冠的技术方法和适应性（图 1）。

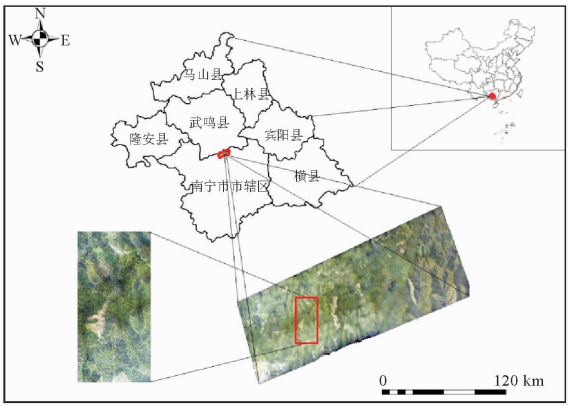


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 The location map of research area

1.2 数据介绍

航空影像数据获取时间为 2016 年 9 月，使用 R44 直升机作为飞行平台，搭载 3 600 万像素的 CCD 相机获取该区域航空影像数据，空间分辨率为 0.2 m。飞行范围 108°20′9″—108°27′33″E，23°0′28″—22°56′3″N。获取数据时天气以晴空为主，在此期间共飞行 3 驾次，约 5 h。同时对获取的数据进行几何精校正，最终得到 DOM 航空影像数据。

小班数据以 2013 年森林资源设计的小班为基础，利用地理信息系统软件对小班坐标转换，使小班数据与 DOM 航空影像数据一致。同时基于小班数据树种字段融合桉树和杉木，得到整理后的小班数据，为单木树冠提取奠定基础。

2 研究方法

以 DOM 航空影像为数据源，基于 eCognition 软件平台，采用面向对象的解译流程，分树种多层次多尺度分割方法得到树冠信息和非树冠信息；以区域增长算法和形态学滤波的方法提取单木树冠范围并对单木树冠边界进行分类后处理；最终完成林区内桉树和杉木的单木树冠的提取。具体试验步骤见技术流程图 2。该方法主要分为以下 4 个步骤：1）分类体系的构建，逐层次剔除非树冠信息，保留树冠信息；2）在构建的分类体系基础上，逐层次选取不同分割方法，形成分类解译初始影像对象；3）结合逐层初始影像对象，基于分类函数，选取最优的分类特征分类解译树冠信息和非树冠信息；4）根据分类解译获得的树冠信息和非树冠信息，使用区域增长算法对树冠信息执行增长，形成单木树冠。最后使用形态学滤波方法对单木树冠边界进一步优化，得到最终感兴趣的单木树冠结果。

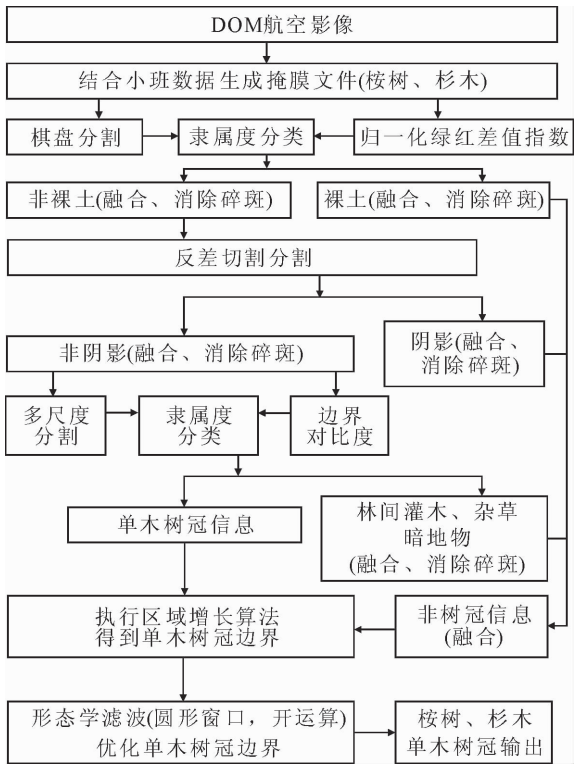


图 2 技术流程

Fig. 2 Technology flowchart

2.1 单木树冠提取

为了准确的提取单木树冠边界，如何从影像中剔除一些干扰信息是关键。研究中需根据研究区存在的地物类别情况选择合适的方法分类解译地物，以达到提取感兴趣区域的目的。本研究区域属于林区，由目视解译得出地物类型主要以树冠信息、裸地、林下及林间的杂草地和灌木为主，还存在少量的水体、建筑物和林区道路。同时影像中一些阴影和暗地物也会给树冠信息提取带来干扰，需要对其分类剔除，其中属林间的杂草与灌木信息对树冠信息的提取干扰最大。因此针对树冠信息提取构建相应的分类体系是面向对象解译流程的关键所在，一个好的分类体系的构建能快速、高效、准确的提取出感

兴趣地物类别,为下一步信息提取打下坚实的基础。同时在使用面向对象方法对影像进行分类解译时,需要选择分割方法、分割尺度、分类特征(或特征组合)、分类规则等关键性问题[23],它们都会直接或间接地影响到后期单木树冠的提取精度。

2.1.1　*分类体系构建*　在林区,不同地物的存在给单木树冠提取带来干扰,例如水体、建筑物、林区道路、裸土。尤其在郁闭度较大的林分中,林下灌木和草地、阴影、暗地物等地物类别的分布会给单木树冠提取带来较大的干扰。本研究使用非树冠信息一词来描绘在单木树冠提取中一些带来干扰地物的总称。为了有效地去除这些干扰信息,快速的提取林区的单木树冠,需预先构建一个高效的分类体系。有大量的研究表明,使用面向对象的方法对影像进行分类解译时采用多层次结合语义信息分类的方法效果更佳[21,24-26]。多层次结合语义信息构建分类体系符合人类认识事物的方式,从整体到局部,从大类到小类,更利于加深对面向对象分类解译流程的理解和自然规律的认知,演绎归纳出事物之间的联系。针对本研究以 DOM 航空影像为数据源,利用面向对象的方法提取单木树冠,由影像目视解译,结合语义信息分类方法确立多层次构建分类体系。具体为第 1 层使用小班数据生成桉树和杉木掩膜区域,排除了研究区内水体、建筑物和林区道路,提高了解译的精度和效率;第 2 层由于本研究区处于林区,很容易由影像的光谱信息特征区分出植被和裸土,因此在桉树和杉木掩膜区域内解译为裸土和植被区域,分类时结合语义信息将植被区域指定为非裸土区域,与裸土区域对应,更加符合语义信息的对称性;第 3 层在非裸土区域,将一些由地形因素和采集数据过程中造成的阴影剔除,基于非裸土掩膜区域内解译为阴影和非阴影(植被区);第 4 层在非阴影区域内由于光谱差异值的影响,除了树冠信息的存在,还存在林下灌木、草地和一部分暗地物,需要对这一部分非树冠信息做进一步剔除,基于非阴影掩膜区域解译为树冠信息和非树冠信息(图 3)。

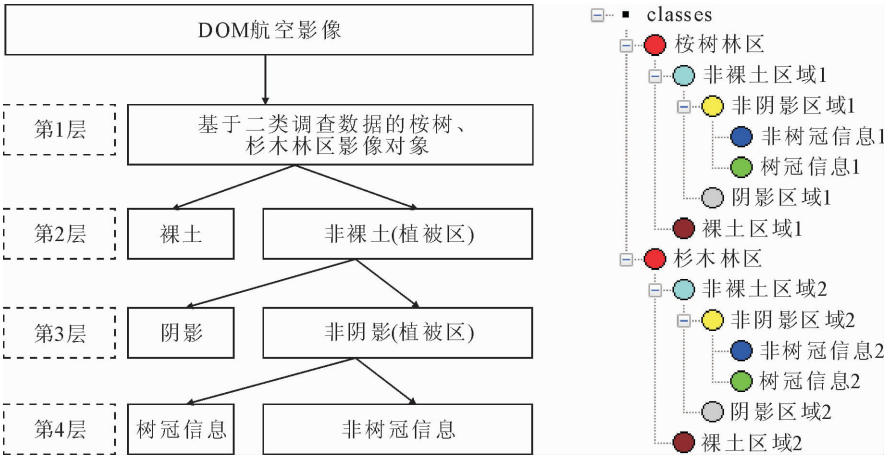


图 3　分类体系构建

Fig. 3　Diagram of classification system construction

2.1.2　*面向对象分割方法*　影像分割形成的具有同质性的斑块是面向对象分类解译的基础。在分割过程中充分利用了影像光谱、形状、纹理、尺度、空间等相关特征,使得分割出的对象具有相同类特征,且对象内具有同质性最大,异质性最小的特点。利用这一特点也正是高分影像提取单木树冠的基础。因此如何科学的选择分割算法关系到地物解译的精度和便捷程度,eCognition 软件平台提供了丰富的分割算法,其中主要的分割算法有 4 个:棋盘分割算法、多尺度分割算法、光谱差异分割算法、四叉树分割算法。光谱差异分割算法不能单独进行使用,必须与其他的分割算法组合使用,这个算法主要是基于前期分割好的影像对象,分析其邻近对象的光谱差异距离值,并将差异不大的对象根据设定的阈值范围合并,实为对现有对象分割结果的一种优化方法[1]。除上述常见的 4 个分割方法,平台还提供了多阈值分割,反差切割分割、反差过滤分割等辅助的分割算法。反差切割分割算法可基于给定影像的像素值的阈值将影像作用域划分为亮对象和暗对象。

本研究使用棋盘分割、多尺度分割和反差切割分割 3 个算法来完成整个分类解译流程的基础分割,形成初始的影像对象层,为后期分类解译提供基础。其中在第 1 层中基于小班数据使用棋盘分割算法继承小班边界,形成桉树、杉木林区掩膜对象。第 2 层考虑到裸土区域的提取,林区情况复杂,无法使用多尺度分割在一个尺度上尽可能的将裸土区域解译出来,需要对裸土区域用一个尽可能小的尺度分块提取,以减少后期对单木树冠提取的干扰。因此

使用棋盘分割算法对桉树、杉木区域执行分割，为后期裸土区域的解译提供准备。第 3 层使用反差切割分割根据阈值范围将非裸土区域分为亮对象和暗对象，暗对象指定为阴影，亮对象指定为非阴影。第 4 层使用多尺度分割算法对树冠信息进行提取，多尺度分割算法的执行主要由 3 个因子决定：尺度、形状、紧致度。每种地物类别都有一个最优尺度对其进行分割，形状和光谱之和为 1，紧致度和平滑度之和等于形状，权重之和为 1。形状因子越大，光谱所占的比重越低。紧致度描绘了分割对象边缘形状的紧密程度，紧致度越小，对象边缘越平滑。本研究经过多次重复试验寻找最优尺度，试验遵循以下原则：1)最优尺度的选取，设置一个较小的尺度，较小的尺度设置会导致单木树冠过分割，较大的尺度设置会导致树冠信息欠分割，导致 2 颗以上的树合并。基于以上前提，设置合适的尺度，多次试验，目视解译完成最优尺度的选取。2)基于多尺度分割提取单木树冠信息的过程中，根据影像目视解译，对于大部分树木而言，其形状较规整。同时对树冠信息进行分析，部分树冠的光谱反射不均匀，导致树冠的整体光谱反射值和局部光谱反射值存在差异，因此可先确定形状因子。3)分析自然界中的树冠边缘，很少会有绝对平滑的树冠边缘出现，因此紧致度与平滑度各占 1/2。在试验中，以上 3 步往往都是同时进行，仅在设置参数时考虑不同参数的先后顺序，反复多次试验，根据目视解译选择出最优的参数为分割参数。桉树和杉木区域各层次分类解译分割算法及参数设置见表 1。

表 1 桉树和杉木林区各层次分割算法及参数设置

Table 1 Multi-level segmentation algorithm and parameter setting in *E. robusta* and *C. lanceolata* area

分类目标	分割算法	参数
区分桉树林区和杉木林区	棋盘分割(chessboard segmentation)	size=20 000
区分裸土和非裸土	棋盘分割 (chessboard segmentation)	size=2
区分阴影和非阴影	反差切割分割(contrast split segmentation)	size=3;type=add; image layer=G; contrast mode= edge ratio
区分树冠信息和非树冠信息	多尺度分割(multiresolution segmentation)	桉树:scale=14;shape=0.5;compactness=0.5 杉木:scale=16;shape=0.8;compactness=0.5

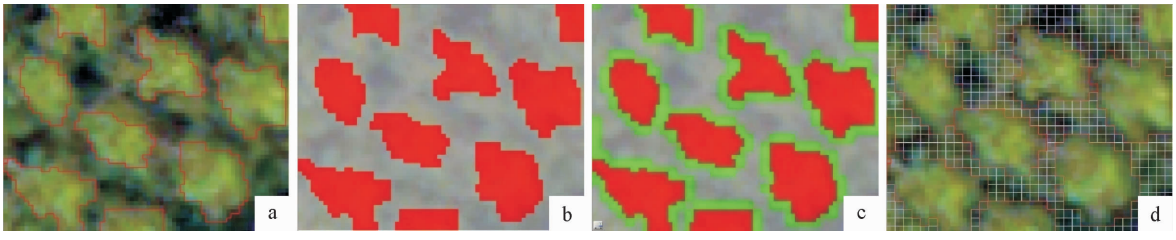
2.1.3 树冠与非树冠信息分类解译 面向对象分类解译是区别于传统的基于象元的解译方法。基于像素的解译方法，最小的对象是像元，划分对象主要以光谱特征为主。而面向对象的方法是在影像分割的基础上对每一个均质同一的小对象进行类别的划分，不仅克服了传统像元产生的缺点，还能充分挖掘影像的空间、纹理、结构、几何等特征[27]。基于 DOM 航空影像利用面向对象的方法对树冠和非树冠信息进行解译，以分割影像对象为基础，结合分类特征和分类算法将树冠信息和非树冠信息区别开来。本研究考虑到每层参与特征较少，因此使用的分类算法是隶属度分类，隶属度分类适合使用较少的特征来区分类别，由于其设定的阈值不是一个确定的数值，而是一个模糊范围，有利于提高分类的精度[28-29]。第 1 层基于整理后的小班数据生成桉树和杉木林区；第 2 层以桉树和杉木为掩膜区分裸土和非裸土(植被区)。由于 DOM 航空影像为 RGB 可见光 3 个波段组成，根据汪小钦[30]的研究构建可见光波段的植被指数，归一化绿红差异指数 NGRDI (normalized green-red difference index)，使用隶属度分类结合 NGRDI 特征得到裸土和非裸土区域；第 3 层以非裸土区域为掩膜执行反差切割分割得到：阴影和非阴影区域(植被区)；第 4 层在非阴影区域区分树冠信息、林间冠草和部分暗地物。由于传感器成像原因，树冠信息与林间灌木、草地和部分暗地物交界边缘存在明显的亮度差异，根据影像对象边界对比度特征分析，使用隶属度分类结合边界对比度特征得到树冠信息和非树冠信息。最后，由于在分割算法执行的过程中导致每个类别中都会产生一部面积较小的对象，给后期的树冠边界优化带来干扰。使用面积特征消除这一部分小对象。同时使用融合算法，将裸土区域、阴影区域指定为非树冠信息并做融合处理，以待后期提取单木树冠边界提供增长区域。

2.2 单木树冠边界后处理

树冠信息分类后处理是准确提取单木树冠边界的重要步骤，由于树冠信息提取过程中，分割算法尺度，解译的效果，导致树冠区域一部分冠边缘被当作林下灌木草地、阴影或暗地物提取为了非树冠信息。为了准确的描绘树冠边界需对这一部分信息识别提取出来，指定给树冠信息形成完整的单木树冠边界。在林区每棵树的单木边界情况复杂，同时树木之间交界区域复杂很难将树木的边界进行明显的区分，需要进一步对树冠边界进行处理，消除树冠边界之间的一些噪点，完成单木树冠边界的提取。

本研究使用区域增长算法提取单木树冠边界，以分类解译后的树冠信息种子对象为基底，指定树冠信息以外一定区域的漏提树冠信息为增长范围提

取单木树冠边界。首先根据提取的树冠信息和影像对比,确定树冠信息增长的范围;其次使用棋盘分割算法以增长范围为尺度对非树冠信息层执行分割形成增长区域。本研究经过对比,桉树设置的增长范围为 1,杉木设置的增长范围为 2;最后使用领域对象特征结合区域增长算法将树冠信息以指定区域范围增长完成单木树冠提取。以桉树林区为例,图 4 展示了树冠信息区域增长算法过程。观察提取的单木树冠边界,发现单木树冠边缘存在着一些不自然的反射噪点,需对单木树冠边缘进一步处理。形态学滤波是一种借助结构元素对图像进行处理和分析的数学工具,主要包括 4 类算子:腐蚀、膨胀、开运算、闭运算,对图像具有噪声抑制功能,其关键的核心要素在于结构元素的运用,结构元素一般以圆形和方形为主,起到滤波窗口的作用[31]。因此研究使用形态学滤波的开运算方法对树冠边界进行优化,抑制树冠边缘噪声。借助圆形结构元素,桉树设置的半径为 1.5 m,杉木设置的半径为 2 m,已达到去除噪声保持树冠边缘的效果。图 5 为林区部分桉树和杉木单木树冠提取结果。



注:a. 树冠信息;b. 构建增长区域;c. 指定增长范围;d. 单木树冠边界。

图 4　树冠信息区域增长算法过程

Fig. 4　Region growth algorithm process diagram

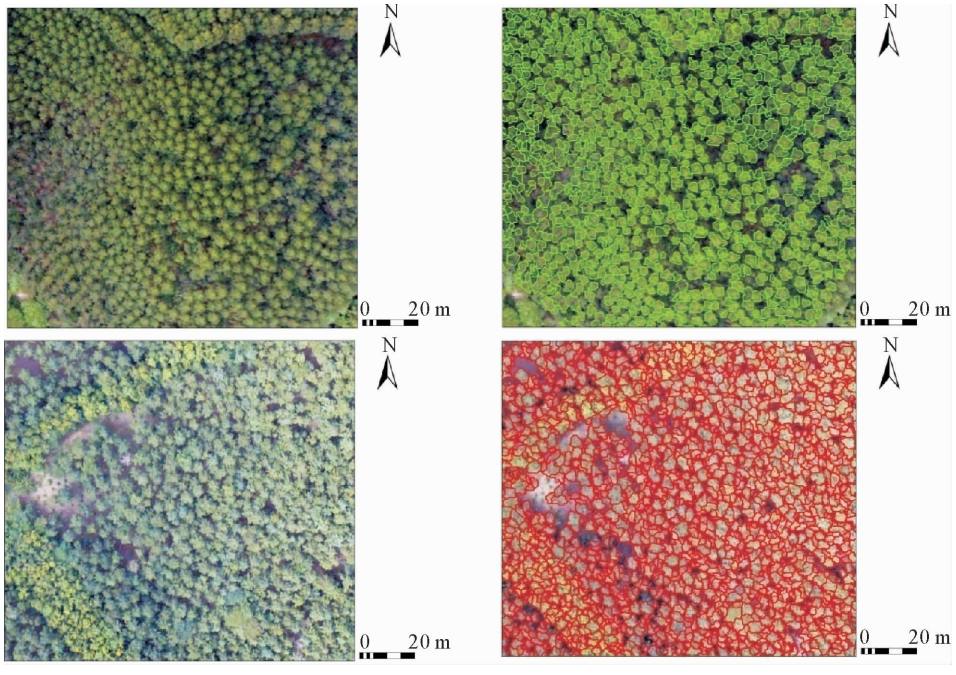


图 5　桉树和杉木林区部分单木树冠提取结果

Fig. 5　Local result of individual canopy boundary extraction in *E. robusta* and *C. lanceolata* forests

3　结果与分析

3.1　精度评价

由于在林区单木树冠形状的复杂程度,基于影像提取单木树冠会导致很多情况的出现,很难有一个统一的标准来描绘单木树冠被检测出是否正确的特点,因此,基于不同单木树冠检测率的评价体系也应运而生。本研究主要参考文献[17]和文献[32]的单木树冠精度评价体系完成研究区单木树冠提取精度的检验。具体为提取的树冠面积与验证树冠面积重叠≥50%,≤120%,则可认为完全提取出树冠边界,即为 1∶1。为了增加评价体系的客观性和有效性,本研究精度评价指标以用户精度、生产者精度、错判误差、漏判误差、总体精度 5 个指标为主。上述 5 个指标的计算公式如下:

$$A_u = N_{1:1} / N_{rct} \times 100\% \quad (1)$$

$$A_p = N_{1:1}/N_{dct} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_f = N_{fdc}/N_{rct} \times 100\% \quad (3)$$

$$E_o = N_{ndc}/N_{rct} \times 100\% \quad (4)$$

$$A_o = I_{area}/R_{area} \times 100\% \quad (5)$$

式中，A_u 为用户精度，A_p 为生产者精度，E_f 为错判误差，E_o 为漏判误差，A_o 为总体精度。$N_{1:1}$ 为正确提取的树冠数量，N_{rct} 为参考树冠的总数量，N_{dct} 对应参考树冠区域检测出的树冠总数量，N_{fdc} 为错提树冠数量，N_{ndc} 未检测出的树冠数量，I_{area} 为检测出的树冠与参考树冠相交面积，R_{area} 为参考树冠总面积。

检测出树冠面积大于参考树冠面积的 120%，多个树冠被提取为一个树冠，一个树冠被提取为多个树冠均认为是错提树冠，错判误差定义为错提树冠与参考树冠之间的数量比；检测出的树冠面积小于参考树冠面积的 50%以及未被检测出的树冠均认为是漏提树冠，漏判误差定义为漏提树冠与参考树冠的数量比；用户精度定义为 1∶1 检测出的树冠与参考树冠之间的数量比值；生产者精度定义为 1∶1检测出的树冠与对应参考树冠区域检测出的总的树冠数量比值；总体精度定义为检测出的树冠与参考树冠的相交面积占参考树冠总面积的比值。

3.2 结果分析

以地理信息系统软件为平台，通过目视解译人工勾绘形成精度检验数据，检验数据选取的原则在桉树和杉木林区分别随机勾绘一定数量的单木树冠作为检验数据，勾绘时尽可能选择人眼能目视判读的树木且保证研究区内验证数据分布均匀，最后通过空间叠加分析和目视解译统计完成单木树冠提取精度评价。本研究依据研究区桉树和杉木的分布情况，桉树林区勾绘 465 个单木树冠，杉木林区勾绘 168 个单木树冠作为参考数据，具体统计参数见表 2，依据各个统计参数得到 5 个精度评价指标，精度评价指标见表 3。

表 2 桉树和杉木林区统计参数

Table 2 Parameter statistics in *E. robusta* Smith and *C. lanceolata* area

参数统计	正确提取的树冠数量 ($N_{1:1}$)	参考树冠的总数量 (N_{rct})	检测出树冠的总数量 (N_{dct})	错提树冠的数量 (N_{fdc})	未检测出的树冠数量 (N_{ndc})	相交面积 (I_{area})/m²	参考树冠总面积 (R_{area})/m²
桉树	355	465	483	95	15	2 494.91	2 875.77
杉木	131	168	192	27	10	1 667.15	1 868.71

表 3 桉树和杉木林区精度评价指标

Table 3 Accuracy index in *E. robusta* and *C. lanceolata* area %

评价指标	用户精度(A_u)	生产者精度(A_p)	错判误差(E_f)	漏判误差(E_o)	总体精度(A_o)
桉树	76.34	73.05	20.43	3	86.75
杉木	77.98	68.23	16.07	5	89.21

由表 3 可以看出，使用面向对象的方法提取单木树冠边界，桉树的总体精度为 86.75%，杉木的总体精度为 89.21%，杉木高于桉树；桉树的用户精度为 76.34%，杉木的用户精度为 77.98%；桉树的生产者精度为 73.05%，杉木的生产者精度为 68.23%；桉树的错判误差为 20.43%，杉木的错判误差为 16.07%；桉树的漏判误差为 3%，杉木的漏判误差为 5%。经目视统计过程中发现，错判误差来源主要由 2 种情况造成：一个单木树冠被分为多个单木树冠；多个树冠被合并为一个树冠。在同一个林分中，相同树种不同林龄的树冠大小不一样，林龄小的树冠容易被合并，林龄大的树冠很容易被过分割，所以致使一个尺度很难对不同大小的树冠进行提取。漏判误差的来源主要由 2 种情况造成：1)传感器在采集数据过程中，小树由于周边树冠的遮挡，导致辐射能量过低，在解译过程中被视为阴影和暗地物排除；2)无论使用哪种分类解译的方法，都会存在“同物异谱，异物同谱”现象。所以在解译过程中会导致树冠信息的损失，从而对这一部分单木树冠造成漏检。

4 结论与讨论

以 DOM 航空影像为数据源，使用面向对象的方法分树种多层次多尺度提取树冠信息是可行的。首先基于树冠信息结合区域增长算法准确的提取单木树冠范围；其次使用形态学滤波的方法优化单木树冠边界；最后批量、自动化完成林区内桉树和杉木树种的单木边界提取。桉树单木树冠提取的总体精度 86.75%，杉木单木树冠提取的总体精度为 89.21%，整体满足林业部门获取数据的精度需求。

采用面向对象的方法分树种提取单木树冠边界符合遥感图像认知规律，桉树和杉木分属阔叶和针叶树，树冠大小和形状存在差异。针对不同树种采用不同的图像分割尺度更能高效、准确的提取单木树冠。

单木树冠提取过程，结合语义信息构建树冠和非树冠信息解译的分类体系是符合人脑认知过程，更便

于理解与树冠信息相连地物信之间的联系和区别。从林区内多层次分类提取树冠信息,使用非树冠掩膜避免分类过程中对树冠信息的重复操作。同时,依据分类体系科学合理的选择分割算法,例如反差切割分割算法直接解译出阴影与非阴影区域,此过程能减少解译的步骤以达到高效的提取目标信息。

解译影像对象,提取目标信息,特征选取是基础。特征能否准确描述和界定目标的共性会影响到提取目标信息的精度。研究根据遥感成像原理,树冠信息边界区域与周边地物边界光谱反射值的差异。利用邻域边界对比度特征很好的区分出树冠信息和非树冠信息(林间灌木、草地和部分暗地物),同时也避免了对这一部分非树冠信息多次解译。因此,除了光谱、纹理常用的特征以外,更应该充分发挥对象的邻域、形状以及层次结构等特征。

利用面向对象解译目标地物后需对其进行分类后处理以达到优化结果的目的。本研究基于树冠信息种子对象使用区域增长算法对其进行边界范围增长,最终得到单木树冠边界,其中增长的范围人为指定,存在一定的主观性,因此一个合适的增长范围是提取树冠边界的关键;形态学滤波能保持树冠边缘的形状,同时也能抑制树冠边缘的噪声点,对提取后的单木树冠起到优化作用。

基于 DOM 航空影像使用面向对象方法分树种提取单木树冠时,林分的年龄、郁闭度高低等都会给分割过程中带来尺度上的影响。航空影像由于正射校正过程中存在的误差,使得树冠未能得到很精确的正射处理。同时处于影像边缘的树木,由于扫描角度过大会导致单木树冠的侧面误提为树冠。以上都会降低单木树冠边界的提取精度。另外,如果研究区面积过大,导致不同时间获取的影像存在太阳高度角的变化,最终会使得树冠的侧影发生变化,从而加大了单木树冠提取的难度,导致单木树冠的提取精度降低。如何对不同太阳高度角的影像进行校正处理,有待后续进一步深入研究。基于区域增长算法增长树冠边界需要人为指定增长区域范围,如何借助对象邻域边界特征自动化选择增长范围等诸多研究点需要进一步深入研究。

致谢:本次试验的 DOM 航空影像及 2013 年小班调查数据由广西省壮族自治区林业勘测设计院提供,在此表示衷心感谢。

参考文献:

[1] 丰伟,吴焕荣,王岩,等. 基于航空影像的树冠提取方法研究[J]. 山东林业科技,2010,40(4):32-34,53.

[2] 廖彩霞. 树冠表面积及体积的预估[J]. 科技信息,2010(16):100-101.

[3] 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.
LIU F J,ZHENG S K,LU Y N. Effect of tree crown disposition the vertical distribution of annual incerment in the main stem of poplar[J]. Scientia Silvae Sinicae,1991,27(1):14-20. (in Chinese)

[4] 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.

[5] 李赟. 基于 UAV 高分影像的林木冠幅提取与蓄积量估测研究[D]. 南京:南京林业大学,2017.

[6] 何游云,张玉波,李俊清,等. 利用无人机遥感测定岷江冷杉单木树干生物量[J]. 北京林业大学学报,2016,38(5):42-49.
HE Y Y,ZHANG Y B,LI J Q,*et al*. Estimation of stem biomass of individual *Abies faxoniana* through unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Journal of Beijing Forestry University,2016,38(5):42-49. (in Chinese)

[7] 王维枫,雷渊才,王雪峰,等. 森林生物量模型综述[J]. 西北林学院学报,2008,23(2):58-63.
WANG W F,LEI Y C,WANG X F,*et al*. A review of forest biomass models[J]. Journal of Northwest Forestry University,2008,23(2):58-63. (in Chinese)

[8] 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,1997,102(D24):29555.

[9] CONGHE SONG L E B. MVP:a model to simulate the spatial patterns of photosynthetically active radiation under discrete forest canopies[J]. Canadian Journal of Forest Research,2004,34(34):1192-1203.

[10] LARSEN M,ERIKSSON M,DESCOMBES X,*et al*. Comparison of six individual tree crown detection algorithms evaluated under varying forest conditions[J]. International Journal of Remote Sensing,2011,32:20,5827-5852.

[11] 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.

[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(2-3):322-334.

[13] 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.

[14] YANG L,WU X,PRAUN E,*et al*. Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems-GIS"09-tree detection from aerial imagery[C]. The 17th ACM SIGSPATIAL International Conference-Seattle,Washington:ACM Press,2009:131.

[15] 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.

[16] 刘晓农,旦增,邢元军. 基于无人机高分影像的冠幅提取与树高反演[J]. 中南林业调查规划,2017,36(1):39-43.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 刘杰,李卫正,张青萍,等. 基于小型 UAV 的森林公园正射影像制图分析——以上海滨江森林公园为例[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):213-218.
LIU J,LI W Z,ZHANG Q P,*et al*. DOM mapping analysis of forest park based on UAV——a case study of Shanghai riverside forest park[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(2):213-218. (in Chinese)

[20] 胡健波,张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展[J]. 生态学报,2018,38(1):25-35.
HU J B,ZHANG J. Unmanned aerial vehicle remote sensing in ecology:advances and prospects[J]. Acta Ecologica Sinica. 2018,38(1):25-35. (in Chinese)

[21] 赵峰,庞勇,李增元,等. 机载激光雷达和航空数码影像单木树高提取[J]. 林业科学,2009,45(10):81-87.
ZHAO F,PANG Y,LI Z Y,*et al*. Extraction of individual tree height using a combination of aerial digital camera imagery and LiDAR[J]. Scientia Silvae Sinicae,2009,45(10):81-87. (in Chinese)

[22] 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. (in Chinese)

[23] 朱超洪,刘勇. 基于影像认知和地学理解的面向对象分类研究[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):536-541.
ZHU C H,LIU Y. A study on object-oriented remote sensing image classification based on image cognition and geographical understanding[J]. Remote Sensing Technology and Application,2012,27(4):536-541. (in Chinese)

[24] 马浩然,赵天忠,曾怡. 面向对象的最优分割尺度下多层次森林植被分类[J]. 东北林业大学学报,2014,42(9):52-57.
MA H R,ZHAO T Z,ZENG Y. Object-based multi-level classification of forest vegetation on optimal segmentation scale [J]. Journal of Northeast Forestry University,2014,42(9):52-57. (in Chinese)

[25] BAATZ M,SCHAPE A. Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing,Enschede,Netherlands,1999:16-20.

[26] 陈旭,徐佐荣,余世孝. 基于对象的 QuickBird 遥感图像多层次森林分类[J]. 遥感技术与应用,2009,24(1):22-26,130.

[27] 王建芳,包世泰. 面向对象解译方法在遥感影像地物分类中的应用[J]. 热带地理,2006(3):234-235,237-238,242.

[28] 赵勋,岳彩荣. 基于遥感数据的林地变化检测方法研究[J]. 林业资源管理,2019(1):101-108,135.

[29] 乔婷,张怀清,陈永富,等. 基于 NDVI 分割与面向对象的东洞庭湖湿地植被信息提取技术[J]. 西北林学院学报,2013,28(4):170-175.
QIAO T,ZHANG H Q,CHEN Y F,*et al*. Extraction of vegetation information based on NDVI segmentation and object-oriented method[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(4):170-175. (in Chinese)

[30] 汪小钦,王苗苗,王绍强,等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. 农业工程学报,2015,31(5):152-159.
WANG X Q,WANG M M,WANG S Q,*et al*. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2015,31(5):152-159. (in Chinese)

[31] 卜帆,石玉立. 机载 LiDAR 高差和高分影像的城市树冠提取比较[J]. 遥感技术与应用,2017,32(5):875-882.
BU F,SHI Y L. The comparison of urban tree crown extraction based on airborne LiDAR elevation difference and high resolution imagery[J]. Remote Sensing Technology and application,2017,32(5):875-882. (in Chinese)

[32] 李响. 基于 LiDAR 数据和标记控制区域生长法的单木树冠提取[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2015.

(上接第 152 页)

[9] WEI S P,WU W J,JI Z Q. New antifungal pyranoisoflavone from *Ficus tikoua* Bur. [J]. International Journal of Molecular Sciences,2012,13:7375-7382.

[10] 钮绪燕,詹刚明,姬志勤,等. 苦皮藤杀菌剂对黄瓜霜霉病菌的活性测定[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(11):30-33.

[11] 王帅,刘召阳,高小宁,等. 10 种生物源杀菌剂对苹果树腐烂病菌的室内活性评价[J]. 西北林学院学报,2019,34(1):150-156.
WANG S,LIU Z Y,GAO X N,*et al*. Antifungal activity of 10 biological fungicides against valsa mali[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(1):150-156. (in Chinese)

[12] 王雅琴,傅育红,高锦明等. 苦楝内生真菌抗菌活性的研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(1):20-22.
WANG Y Q,FU Y H,GAO J M,*et al*. Antifungal activity of endophytic fungus from *Melia azedarach* L. [J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(1):20-22. (in Chinese)

[13] 黄国洋. 农药实验技术与评价方法[M]. 北京:中国农业出版社,2001:128-142.

[14] 曹静,曹克强. 中草药提取物 Ts-86 对马铃薯晚疫病菌的抑制作用[J]. 江苏农业科学,2009(3):136-137.
CAO J,CAO K Q. Inhibition of the extract of Chinese traditional medicinal Ts-86 on *Phytophthora infestans*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2009(3):136-137. (in Chinese)

[15] 汤毅,曹支敏,王洁菲. 花椒锈病发生规律与化学防治研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):150-153.
TANG Y,CAO Z M,WANG J F. Occurrence regularity and chemical control of pricklyash rust[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(1):150-153. (in Chinese)

[16] GB/T 17980.34-2000. 农药田间药效试验准则(一)杀菌剂防治马铃薯晚疫病[S]. 2000.