

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.005

基于 eCognition 软件的显微图像叶脉网络提取与优化

朱济友¹ 于强¹ YANG Di² 徐程扬¹ 岳阳¹ 陈向³

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 佛罗里达大学地理系, 盖恩斯维尔 FL 326113;

3. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060)

摘要: 叶脉网络的提取及其性状参数的测算, 可为植物叶脉生态学机理研究提供重要参考。以不同叶特性的 6 类树种(国槐、毛白杨、臭椿、洋白蜡、元宝枫和栎树)叶片为对象, 基于 eCognition 软件对叶脉显微图像进行多尺度分割, 综合利用显微图像的光谱信息和几何信息构建提取知识库, 并使用叶脉循环生长法对提取结果进行完善, 增加叶脉网络的完整性。结果表明, 叶脉提取的最优阈值分别为: 尺度参数 200, 形状参数 0.7, 紧凑度参数 0.3, 亮度特征值 230~280, 光谱特征值 180~230, 几何特征值大于 1.5。叶脉密度测算的精度均达到了 93% 以上, 对植物叶脉信息的快速提取具有较高的普适性。

关键词: 叶脉网络; 叶脉密度; 显微图像; 面向对象法

中图分类号: S718.47 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0051-07

Extraction and Optimization of Microscopic Image Vein Network Based on eCognition Software

ZHU Jiyou¹ YU Qiang¹ YANG Di² XU Chengyang¹ YUE Yang¹ CHEN Xiang³

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Department of Geography, University of Florida, Gainesville FL 326113, USA

3. Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The extraction of leaf network and the measurement of its trait parameters provide an important reference for the study of leaf vein ecology. Taking the leaves of six tree species (*Sophora japonica*, *Populus tomentosa*, *Ailanthus altissima*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Acer truncatum* and *Koelreuteria paniculata*) with different leaf characteristics as object, the multi-scale segmentation of the vein microscopy image was based on eCognition software. Firstly, the microscopic images were segmented. And then the spectral information and object geometry information of microscopic images objects were comprehensively applied to build the road extraction knowledge base. Thirdly, the results of vein extraction were improved and completed in order to increase the integrity of the vein network. The results showed that the optimal thresholds for leaf vein extraction were: scale parameter was 200, shape parameter was 0.7, tightness parameter was 0.3, brightness characteristics value was 230~280, spectral characteristic value was 180~230, geometric feature value was greater than 1.5. The extraction of leaf vein density measurement was more than 93%, which had high universality.

Key words: leaf vein network; leaf vein density; microscopic image; object-oriented method

0 引言

叶片作为植物碳水耦合权衡过程中的重要结构, 在长期的生长、繁殖和进化过程中对其生长环境

的变化极其敏感, 且具有较大可塑性^[1]。叶脉是广泛分布于叶面, 且影响整个叶片机械支撑、水分供需平衡和资源流通的重要结构^[2]。叶脉密度作为叶脉网络功能性状中的重要指标, 表征了叶脉网络在

收稿日期: 2018-10-09 修回日期: 2018-11-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLX201806)、林业公益性行业科研专项重大项目(20140430102)和中国博士后科学基金面上项目(2018M641218)

作者简介: 朱济友(1993—), 男, 博士生, 主要从事生态林与城市林业培育理论与技术研究, E-mail: zhujiyou007@163.com

通信作者: 于强(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究, E-mail: yuqiang@bjfu.edu.cn

叶片中的分布、排列和走向规律,对蒸腾作用和光合作用过程中水分与光合产物的运输效率有密切关系,也是理解植物对环境调节机制的重要途径^[3]。已有研究表明,当植物遭受不良环境胁迫时,往往通过调整其功能性状以应对和适应环境变化。比如在水资源极度匮乏或高温环境中,植物通常具有较发达的叶脉网络结构,从而保证水分供给平衡,提高植物的生存适应与竞争能力^[4]。近年来,叶脉功能性状普遍成为国内外生态学家对植物叶片水分调节策略、叶片碳构建、叶片光合能力等方面研究的关键生理参数^[3-5]。随着研究的不断深入,基于叶片网络结构与环境变化关系、生态系统物质循环及植物分类等方面的研究不断涌现。深入研究叶脉功能性状及其生态学特性,探讨植物对全球气候变化响应及其权衡关系具有重要意义^[5-6]。叶脉含有植物的重要生理信息,而叶脉网络提取是叶脉功能性状研究工作的前提,也是植物建模、植物识别的关键步骤之一,因此高效、快速的叶脉提取方法研究显得尤为重要。

随着计算机图像处理技术的发展和普及,如何从图像中快速提取所需信息逐渐成为遥感领域研究的热点^[7-8]。叶脉功能性状的传统测算方法普遍采用 Photoshop、image J 等图像分析软件,不仅费时、费力,还极易造成较大的人为误差^[7]。目前,针对叶脉提取的研究对象主要为鲜叶扫描图像,多基于人工神经网络、方向能量和 K-means 聚类等方法进行提取。大部分研究仅局限于叶脉轮廓的提取,无法实现对其相关指标的测算,若想进一步获取叶脉密度信息,仍需利用传统的方法测算,增加了不必要的

工作量^[9-10]。与鲜叶图像相比,经过浸泡处理后的叶片,利用光学显微镜拍摄出来的叶脉图像具有形状和轮廓清晰、信息量丰富等优点。本文将叶脉显微图像看作遥感影像,探讨遥感图像处理技术在叶脉分类和提取中的应用,进一步测算叶脉密度。以不同叶面积、不同叶生长特性的 6 类常见绿化树种(国槐、毛白杨、臭椿、洋白蜡、元宝枫和栾树)的叶脉显微图像为研究对象,基于多特征(亮度特征、光谱特征和几何特征)对大批量叶脉图像进行识别、分类和提取,以实现叶脉密度高效计算。

1 训练样本获取及提取流程

1.1 叶脉图像获取

北京市海淀区年平均气温 10 ~ 14℃,夏季平均气温 27.5℃,年平均降水量约 600 mm。采样地点为北京林业大学。如表 1(每列不同字母表示指标间达到显著性差异)所示,为消除叶片生长特性造成叶脉提取的差异,本文选取了北京市典型绿化树种中不同叶片大小、叶片质地及叶脉清晰度的 6 类树种(国槐、毛白杨、臭椿、洋白蜡、元宝枫和栾树)作为训练样本。于 2018 年 8 月 09:00—11:00,晴朗天气,分别在东西南北 4 个方位随机采集中冠层的成熟健康叶片。每类树种 30 株,每株树采集 30 片叶片。将鲜叶用 5% NaOH 溶液浸泡 5 d 至叶肉全部腐蚀,溶液每 24 h 更换一次。加入 1 滴甲苯胺蓝染液,用清水冲洗干净后,制作临时玻片,放于 LJ-CLP03 型光学显微镜下放大 40 倍后观察,每个玻片随机采集 10 幅图像供试验分析^[11]。

表 1 6 类树种叶片性状特征

Tab.1 Leaf traits of six tree species

树种	叶片面积/cm ²	叶片厚度/mm	叶片质地	被毛情况	叶脉清晰度
毛白杨	(101.38 ± 19.32) ^a	(0.23 ± 0.12) ^a	厚革质	光滑	明显
元宝枫	(30.50 ± 4.21) ^c	(0.15 ± 0.04) ^b	革质	光滑	明显
洋白蜡	(21.82 ± 3.24) ^d	(0.21 ± 0.08) ^a	革质	光滑	明显
臭椿	(36.99 ± 6.14) ^b	(0.24 ± 0.06) ^a	薄革质	粗糙	较明显
栾树	(23.24 ± 2.35) ^d	(0.18 ± 0.06) ^b	纸质	被毛	模糊
国槐	(8.93 ± 1.50) ^e	(0.16 ± 0.03) ^b	纸质	被毛	模糊

1.2 叶脉图像处理

1.2.1 提取流程

基于 eCognition Developer 64 软件的遥感分类方法以包含多种语义信息空间关系的像元对象为处理单元,可以实现较高层次遥感图像的分类及目标对象信息的提取^[12]。如图 1 所示,叶脉网络的提取流程主要包括图像预处理、多尺度分割、知识库构建、特征选取、叶脉提取及完善等步骤。基于遥感面向对象法的分割方式主要有多尺度分割、棋盘分割

和多阈值分割等,根据树种的叶脉特征,本文选用多尺度分割方式,可以实现分割后目标对象的权重同质性达到最大^[13]。

1.2.2 叶脉密度计算及精度分析

叶脉密度及叶脉面积传统测算方法是利用 Photoshop、image J 等图像处理软件对叶脉图像进行测算。本文基于遥感面向对象法,在 eCognition 软件中确定叶脉最佳提取阈值,对图像校准后,即可批量测算叶脉密度。

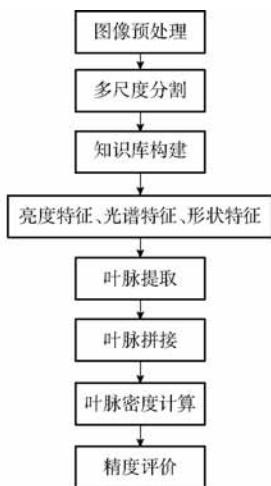


图 1 叶脉提取流程图

Fig. 1 Flow chart of vein extraction

每类树种随机选取 300 幅叶脉显微图像用于分析。其中 100 幅图像用于面向对象分类法进行批量计算,另外 200 幅利用 image J 软件实测。采用均方根误差对所得结果进行精度检验^[14],即

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_0)^2} \quad (1)$$

$$P' = \frac{\bar{P}_i - R}{P_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 R ——均方根误差 P' ——提取精度

P_i ——image J 软件实测值

\bar{P}_i ——image J 软件实测均值

P_0 ——提取值 n ——样本数

2 面向对象的叶脉提取及优化

2.1 图像预处理

为了增强显微图像中叶脉和背景部分的反差,在 eCognition 软件中,对所有训练样本进行 LUT 拉伸,保证原始图像初始特征的相对一致性,以达到更好的分割效果。

2.2 图像分割

图像分割是面向对象分类法最关键的一步,分割质量直接影响提取精度。基于叶脉区别于背景的特点,选用多尺度分割方式,利用对象与非对象同质性最小的区域合并法,将分割后叶脉的权重同质性最小化,以获取图像不同尺度信息^[15]。在 eCognition 中,能对任意分辨率的区域进行同质合并、异质分离,从而实现不同尺度对象的提取。因此,需要不断调整尺度参数来控制合并算法的阈值,找出最佳图像分割参数。

由表 2 可知,不同分割参数的叶脉最终提取精度存在极显著性差异,而在不同环境和不同树种间不存在显著性差异。如图 2a、2b 所示,当尺度参数

设置为 100 时,图像被分割得十分破碎;当尺度参数设置为 300 时,图像分割相对比较粗糙,叶脉的边界吻合度较低。通过实测结果对比,叶脉分类精度与分割尺度不呈线性关系,参数太大或太小均会影响分类精度。经过不断调整发现,在尺度参数为 200 时,6 类树种的叶脉图像分类精度达到最高。如图 2c、2d 所示,在尺度参数一定的条件下,紧凑度参数过大、形状参数过小时,图像分割边界十分密集,最终影响叶脉分割精度;反之,则分割边界十分稀疏,影响分割精度。因此,在精准、清晰地分出叶脉的同时,还需保证叶肉背景与叶脉对象形状差异达到最大。如图 3 所示,经过多次尝试,当形状参数为 0.7、紧凑度参数为 0.3 时,6 类树种的叶脉分割质量达到最佳。

表 2 基于分割参数及提取特征的叶脉网络提取结果的差异性分析

Tab. 2 Differences analysis of interpretation results of leaf vein images based on segmentation parameters and extraction characteristics

变异来源	参数间		环境间		树种间	
	F	P	F	P	F	P
分割参数	43.102	0.000 1	24.101	1.220 1	23.134	0.868 0
亮度特征	68.322	0.000 5	32.922	0.824 2	29.302	0.385 1
光谱特征	35.021	0.002 9	27.163	0.072 5	26.001	0.387 1
形状特征	20.105	0.000 1	8.002	0.083 8	13.134	0.840 2

注:精度为自动提取值与目视镜检值的差。

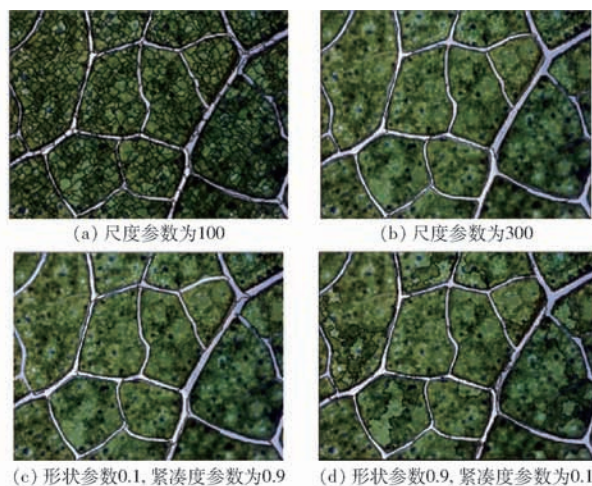


图 2 叶脉图像分割

Fig. 2 Leaf vein images segmentation

2.3 知识库构建、叶脉提取与优化

叶脉提取过程中,知识库构建对叶脉分割图像的提取至关重要^[16-17]。叶脉显微图像中包含了多种可用于目标对象分类的信息,对叶脉特征进行概括和描述后,将其转换为规则,从而实现叶脉的提取。对 6 类不同形态、不同质地叶片的叶脉分布特征和显微图像特点进行总结,最终选用亮度特征和

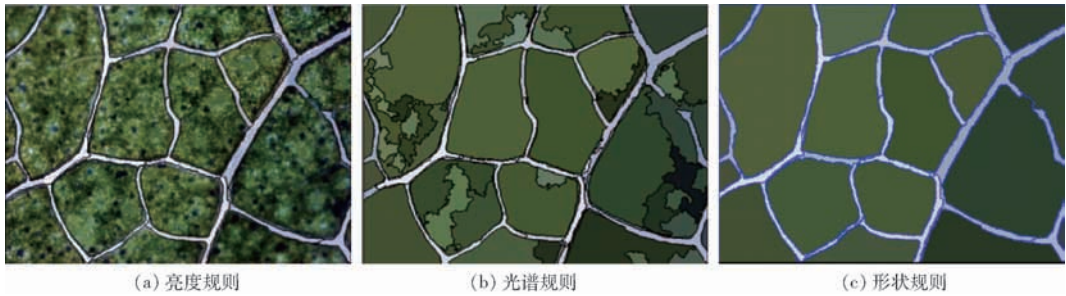


图3 叶脉网络提取结果

Fig. 3 Leaf vein network extractions result

形状特征构建叶脉提取知识库,再将这两个特征转换为相应规则进行提取。

2.3.1 亮度规则

将对象分为叶脉和背景两种,选中分割出来的叶脉单元即可显示出叶脉的亮度,对所有叶脉单元的亮度进行总结后,将最大值和最小值作为提取阈值。由表2可知,亮度特征的阈值对叶脉的提取精度存在极显著性差异,而在不同环境、不同树种间不存在显著性差异。如图3a所示,经过对600幅图像的反复调整得出,叶脉亮度特征值设置在230~280时,基本能将目标对象与背景区分。除了叶脉对象外,还有较多亮度较高的叶肉背景也被区分出来,这些大部分属于密集气孔或保卫细胞的轮廓边界。对于革质叶片来说,其叶脉外凸明显,但发达的气孔结构在显微图像上也形成了与叶脉相对一致的线条。此时,出现了较多误判的部分,仅仅通过亮度特征难以实现叶脉对象的提取。

2.3.2 光谱规则

由表2可知,光谱特征的阈值对叶脉的提取精度存在显著性差异,而在不同环境、不同树种间不存在显著性差异。如图3b所示,基于光谱特征对叶脉进行提取仍存在部分错分或漏分的现象,因此需要根据光谱特征对叶脉进行进一步的分类。对显微图像属性分析可知,叶脉的光谱特征值为180~230,而背景部分的光谱特征值大部分位于180以下。因此,通过将光谱(红光波段)特征值设定在180以上即可较好地将叶脉与背景分离。

2.3.3 形状规则

由表2可知,形状特征的阈值对叶脉提取精度存在极显著性差异,而在不同环境、不同树种间不存在显著性差异。由于仅依靠亮度特征和光谱特征很难将叶脉与背景部分分离,这时需要利用形状特征对叶脉进一步提取。首先在亮度规则提取类别中将所有叶脉对象合并,与气孔、保卫细胞等细胞器形状轮廓不同的是,叶脉具有比较特殊的长条线状轮廓。合并后的叶脉对象特征更加明显,分出的对象为线形,而背景对象则多为块状。据此利用密度作为形

状特征进一步提取,当叶脉形状越接近线形时,其密度越小。如图3c所示,对6类树种叶脉图像反复试验,将几何特征值大于1.5的类别归为叶脉,这样可以去除绝大部分背景对象,大部分合并后的叶脉得以完整保留。

2.4 提取优化

如图4a、4b所示,除毛白杨、洋白蜡和元宝枫等革质叶外,其他纸质、薄革质叶片均被短绒毛。因此,在拍摄叶脉显微图像过程中,出现叶脉被绒毛遮挡或掩盖的现象,表现为叶脉不连续或中断。因此,为了尽量减少此类现象造成的误差,需要将中断的叶脉缝隙拼接起来。本文采用循环迭代的方式找出中断叶脉的方向,目的是利用eCognition软件的面向对象分类技术,找出一种叶脉提取的普遍性规则及阈值范围^[18]。具体步骤为:①将距离图像边界最接近的区域作为循环起点的基准对象。②从基准对象开始,找到一个与其距离为零的相邻对象作为起始对象。③将原来的基准对象设定为叶脉类别,并把步骤②找出的起始对象作为新的起始对象继续寻找下一个起始对象,直到最后一个起始对象值大于1,循环结束。如图5所示,经过不同分割参数、提取规则的层层叠加和优化拼接等步骤,根据最优参数对6类树种的验证,提取精度逐渐提高。

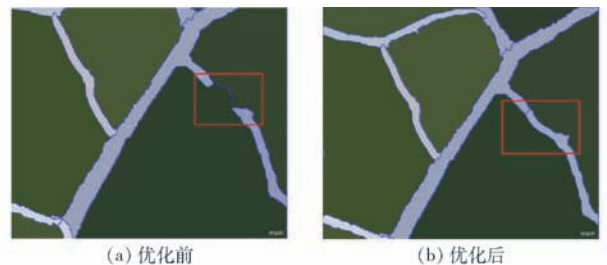


图4 叶脉网络优化

Fig. 4 Leaf vein network optimization

3 结果评价

eCognition 是全世界首个面向对象分类的软件,面向对象法可以充分考虑目标对象的特征信息,包

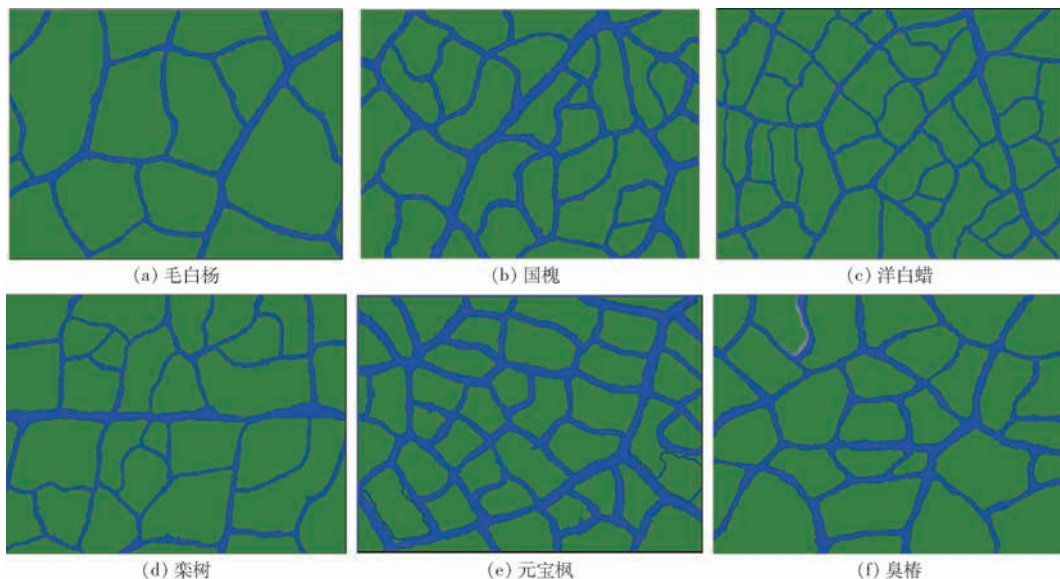


图 5 最优提取阈值的 6 类树种叶脉图像提取结果

Fig. 5 Extraction results of leaf vein images of six tree species in optimal extraction threshold

括光谱特征、几何特征和纹理特征等,图像进行多尺度分割后形成了一系列互不交叉或重叠的子单元,减少了对对象的破碎率,能有效地避免“椒盐效应”^[19-20]。叶脉是植物叶片水分运输的重要结构,不仅发挥着叶片的机械支撑作用,而且还与叶片蒸腾、光合作用等生理活动有密切关系^[2,20]。近年来,叶脉网络及其在分类学、叶片水分利用和对环境变化权衡的关系已成为生态学上的研究热点^[21-22]。随着林业遥感技术的不断发展,如何准确、有效地从图像中解译出目标对象信息,成为遥感技术研究的热点^[23-24]。为了得出普遍适用的提取参数,本文选取了不同叶片大小、叶片质地和叶片表面特征的 6 类常见绿化树种叶片作为训练样本,充分将大尺度

技术应用于解决微观尺度问题。与此同时,充分考虑了特殊叶片生长特性,如叶片绒毛造成叶脉不连续的问题,运用循环迭代的方式将间断的叶脉进行拼接,保证了叶脉网络的完整性。每类树种随机选取 100 幅图像利用 image J 图像处理软件进行测量,与本文方法的自动提取结果进行对比验证。如图 6、表 3 所示,尽管 6 类树种的叶片特征及叶脉密度存在较大差异,但并未影响最终的提取结果,提取精度均在 93% 以上且在树种间均不存在差异性。这说明通过合理设定的提取参数,采用面向对象法来提取叶脉网络并计算叶脉密度,与其他方法相比,该方法简单、快速、通用,具有较高的普适性,可用于大批量快速、精确计算叶脉密度。

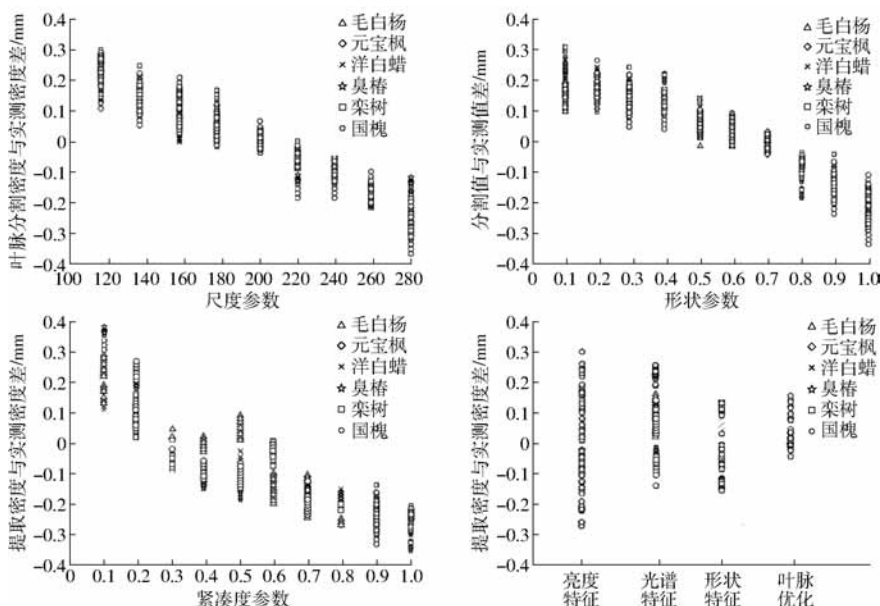


图 6 不同分割参数、提取特征的分类精度

Fig. 6 Classification accuracy of different segmentation parameters and extraction characteristics

表3 叶脉自动提取值与实测值差值与精度

Tab.3 Difference comparison between automatic extraction value and measured value of leaf vein and its extraction precision

树种	提取值/mm	实测值/mm	差值/mm	精度/%
毛白杨	1.58 ± 0.41	1.64 ± 0.24	0.06 ± 0.006	95.1
元宝枫	1.23 ± 0.32	1.28 ± 0.33	0.05 ± 0.009	96.0
洋白蜡	1.18 ± 0.35	1.20 ± 0.25	0.02 ± 0.010	98.3
臭椿	0.99 ± 0.07	0.93 ± 0.13	0.06 ± 0.002	93.9
栎树	1.48 ± 0.39	1.56 ± 0.23	0.08 ± 0.006	94.8
国槐	1.24 ± 0.25	1.32 ± 0.18	0.08 ± 0.003	94.8

4 结束语

在基于遥感面向对象分类法,同时结合多特征提取叶脉网络的基础上,用循环迭代方式对中断的叶脉进行了拼接处理。得到了普遍适用的叶脉提取阈值,即尺度参数为200,形状参数为0.7,紧凑

度参数为0.3,亮度特征值为230~280,光谱特征值为180~230,几何特征值大于1.5。运用该方法对叶脉密度测算的结果较理想,6类树种的提取精度均达到93%以上,说明该方法用于大批量提取叶脉网络、测算叶脉特征信息具有较高的普适性。

参 考 文 献

- [1] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 821–827.
- [2] LAVOREL S, GRIGULIS K. How fundamental plant functional trait relationships scale-up to trade-offs and synergies in ecosystem services[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 100(1): 128–140.
- [3] BRODRIBB T J, HOLBROOK N M. Water stress deforms tracheids peripheral to the leaf vein of a tropical conifer[J]. *Plant Physiology*, 2005, 137(3): 1139–1146.
- [4] FEILD T S, BRODRIBB T J, IGLESIAS A, et al. Fossil evidence for Cretaceous escalation in angiosperm leaf vein evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(20): 8363–8366.
- [5] NARDINI A, SALLEO S, RAIMONDO F. Changes in leaf hydraulic conductance correlate with leaf vein embolism in *Cercis siliquastrum* L[J]. *Trees*, 2003, 17(6): 529–534.
- [6] WALLS R L. Angiosperm leaf vein patterns are linked to leaf functions in a global-scale data set[J]. *American Journal of Botany*, 2011, 98(2): 244–253.
- [7] KANG J, MIZUKAMI Y, HONG W, et al. Modification of cell proliferation patterns alters leaf vein architecture in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Planta*, 2007, 226(5): 1207.
- [8] FU H, CHI Z. Combined thresholding and neural network approach for vein pattern extraction from leaf images[J]. *IEEE Proceedings Vision, Image and Signal Processing*, 2006, 153(6): 881–892.
- [9] RUNIONS A, FUHRER M, LANE B, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 702–711.
- [10] CLARKE J, BARMAN S, REMAGNINO P, et al. Venation pattern analysis of leaf images[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4292(2): 427–436.
- [11] 朱济友, 于强, 刘亚培, 等. 植物功能性状及其叶经济谱对城市热环境的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(9): 72–81.
ZHU Jiyu, YU Qiang, LIU Yapei, et al. Response of plant functional traits and leaf economics spectrum to urban thermal environment[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(9): 72–81. (in Chinese)
- [12] SEZGIN M, SANKUR B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 146–165.
- [13] 唐伟, 赵书河, 王培法. 面向对象的高空间分辨率遥感影像道路信息的提取[J]. *地球信息科学学报*, 2008, 10(2): 257–262.
TANG Wei, ZHAO Shuhe, WANG Peifa. Object-oriented road information extraction from high resolution imagery[J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(2): 257–262. (in Chinese)
- [14] 荐圣淇, 赵传燕, 赵阳, 等. 基于遥感图像处理技术胡杨叶气孔密度的估算及其生态意义[J]. *生态学报*, 2011, 31(17): 4818–4825.
JIAN Shengqi, ZHAO Chuanyan, ZHAO Yang, et al. Based on image processing technology estimating leaves stomatal density of *Populus euphratica* and analysis of its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4818–4825. (in Chinese)
- [15] KINDU M, SCHNEIDER T, TEKETAY D, et al. Land use/land cover change analysis using object-based classification approach in munessa-shashemene landscape of the Ethiopian Highlands[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(5): 2411–2435.
- [16] 刘炜, 王聪华, 赵尔平, 等. 基于面向对象分类的细小河流水体提取方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(7):

- 237 - 244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140737&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.037.
- LIU Wei, WANG Conghua, ZHAO Erping, et al. Extraction of small river information based on object-oriented classification [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 237 - 244. (in Chinese)
- [17] 毛学刚, 侯吉宇, 白雪峰, 等. 基于 DOM 及 LiDAR 的多尺度分割与面向对象林隙分类[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 152 - 159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170919&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.019.
- MAO Xuegang, HOU Jiyu, BAI Xuefeng, et al. Multiscale forest gap segmentation and object-oriented classification based on DOM and LiDAR [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 152 - 159. (in Chinese)
- [18] BENZ U C, HOFMANN P, WILLHAUCK G, et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2011, 58(3): 239 - 258.
- [19] 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象法的田间渠系分布信息提取[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 205 - 214. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.026.
- HAN Wenting, ZHANG Liyuan, ZHANG Haixin, et al. Extraction method of sublateral canal distribution information based on UAV remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 205 - 214. (in Chinese)
- [20] 朱济友, 徐程扬, 吴鞠. 基于 eCognition 植物叶片气孔密度及气孔面积快速测算方法[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(5): 37 - 45.
- ZHU Jiyu, XU Chengyang, WU Ju. Fast estimation of stomatal density and stomatal area of plant leaves based on eCognition [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(5): 37 - 45. (in Chinese)
- [21] BAAZIZ K B, LOPEZ D, BOUZID S, et al. Early gene expression in the walnut tree occurring during stimulation of leaf hydraulic conductance by irradiance[J]. Biologia Plantarum, 2012, 56(4): 657 - 666.
- [22] SALA A, WOODRUFF D R, MEINZER F C. Carbon dynamics in trees: feast or famine? [J]. Tree Physiology, 2012, 32(6): 764 - 775.
- [23] LI Y, CHI Z, FENG D D. Leaf vein extraction using independent component analysis[C]//Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2006, 5: 3890 - 3894.
- [24] HERDIYENI Y, NURFADHILAH E, ZUHUD E A M, et al. A computer aided system for tropical leaf medicinal plant identification[J]. Faculty of Mathematics & Natural Sciences, 2013, 3(1): 23 - 27.