

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170412

基于 eCognition 植物叶片气孔密度及气孔面积快速测算方法

朱济友 徐程扬 吴 鞠

(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, 干旱与半干旱地区森林培育及生态系统国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】叶片气孔是植物与外界进行物质交换的重要窗口, 对环境变化十分敏感。如何快速、精确地获得气孔密度和开放程度数据仍缺乏成熟的方法与技术, 本研究旨在探索植物叶片气孔密度及气孔面积的快速测算方法, 为今后植物气孔研究工作提供参考。【方法】以北京市常见绿化树种白蜡、臭椿和国槐叶片为研究对象, 采用面向对象分类的 eCognition 图像处理软件, 对叶片气孔显微图像进行多尺度分割和分类识别, 根据对象的光谱特征、亮度特征和几何特征构建规则并进行气孔分类和提取。【结果】气孔分割的最佳参数及自动提取规则组合为: 尺度参数 120~125, 形状参数 0.7, 紧凑度参数 0.9, 亮度值 160~220, 红光波段 > 95 , 形状-密度指数 1.5~2.2。【结论】该方法提取气孔密度和气孔面积的精度分别达到 99.2%、94.5%, 结果较理想, 适用于植物叶片气孔信息的快速提取。

关键词:易康软件; 气孔密度; 气孔总面积; 多尺度分割

中图分类号:S718.47 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2018)05-0037-09

引文格式: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.

Fast estimation of stomatal density and stomatal area of plant leaves based on eCognition

Zhu Jiyu Xu Chengyang Wu Ju

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

Abstract: [Objective] Leaf stomatal is a main channel used as exchange matter between plants and environment, which is very sensitive to environmental changes. How to calculate stomatal area and openness data quickly and accurately still lacks mature methods and techniques. This paper aims to explore the quantitative calculation of leaf stomatal density and stomatal area, and provide reference for future research on plant stomatal by this way. [Method] This study chose the leaf of *Fraxinus pennsylvanica*, *Ailanthus altissima* and *Sophora japonica* as objects, analyzing stomatal information by multi-scale segmentation and classification recognition and classifying the leaf stomatal microscopic images via eCognition image processing software. The stomatal imagines were classified and identified based on the spectral characteristics, brightness characteristics and geometric features of the objects. [Result] The results showed that the best parameters of the stomatal division and the combination of automatic extraction rules were: scale parameters 120~125, shape parameter 0.7, compactness parameter 0.9, brightness value 160~220, red light band > 95 , shape-density index 1.5~2.2. [Conclusion] The

收稿日期: 2017-11-22 修回日期: 2018-01-25

基金项目: 林业公益性行业重大项目(20140430102)。

第一作者: 朱济友。主要研究方向: 生态林与城市林业理论与技术。Email: zhujiyu007@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学科研楼 302。

责任作者: 徐程扬, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 城市林业。Email: cxyu@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

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

precision of stomatal density and stomatal area extracted by this method was 99.2% and 94.5%, respectively and the results were satisfactory. So the method is suitable for rapid extraction of stomatal information in plant leaves.

Key words: eCognition software; stomatal density; stomatal total area; multi-scale segmentation

气孔是植物表皮的重要组成结构,是植物叶片与外界进行水气交换的重要通道,其密度、大小和植物光合作用、蒸腾作用等生理活动密切相关,并在很大程度上影响植物水分利用、物质代谢、营养吸收及有机物质的积累,进而对植物体调节生态环境的作用产生影响^[1-4]。由于植物气孔的形态发育、生理功能对外界环境变化的反应极为敏感,因此常用来反映植物对气候环境变化的响应及适应性,在城市化进程不断加快的背景下对预测城市气候环境变化趋势具有重要的意义^[5-7]。但目前研究对象主要集中在玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、水稻(*Oryza sativa*)等农作物上,城市绿化树种却较少涉及^[8-12]。由于叶片气孔形态难以通过肉眼观察得出,传统测算气孔密度多采用光学显微镜放大后肉眼观测的方法,测量气孔大小一般多采用显微成像系统处理方法,不仅操作繁琐、效率低,而且容易带来人为误差。因此,如何提高气孔信息提取效率和精度在气孔特性研究中显得尤为重要。

eCognition 是全世界首个面向对象分类的遥感影像处理软件,通过模拟人类思维对影像综合分析、定义分割尺度并提取信息,具有强大的逻辑分类功能^[13]。目前,面向对象分类技术主要应用于城市建筑物提取、植被分类及农作物遥感解译等方面^[14-16],鲜有对气孔特征识别测算方法的研究。通过新鲜叶片制作玻片,利用光学显微镜放大 100 倍后拍摄出来的高清图像可以清晰地捕捉到气孔的形状及纹理等特征^[17-18]。相比传统的最小二乘模板匹配法和面向像元法,面向对象分类法根据对象的光谱特征、形状特征和纹理特征进行对象分类识别,能够更准确地区分植被类型^[18]。那么,显微图像可以视为遥感影像,能否利用遥感中面向对象分类法对气孔进行精确分类,并提取气孔数量和面积相关信息,进一步测算气孔密度和面积?能否通过技术参数筛选区别叶片中气孔和非气孔图像?

基于此,本研究以北京市常见绿化树种白蜡(*Fraxinus pennsylvanica*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)和国槐(*Sophora japonica*)为研究对象,利用eCognition Developer 64 面向对象分类法对气孔图像进行多尺度分割,确定最佳的尺度参数、形状参数和紧致度参数,选用光谱特征、亮度特征和几何特征对气孔进行分类和提取,并对所得结果进行精度分析,

突破了传统测算方法的局限性,实现高效率、高精度地批量计算气孔密度和气孔面积,为今后植物气孔研究工作提供参考。

1 研究区概况

北京市海淀区(39°54'N, 116°25'E)年平均气温10~14℃,夏季平均气温27.5℃,年平均降水量600 mm。取样地点在奥林匹克森林公园及海淀区街道两侧。奥林匹克森林公园占地680 hm²,绿化面积478 hm²,绿化覆盖率95.61%,优势树种主要有白蜡、臭椿、国槐、油松(*Pinus tabuliformis*)和毛白杨(*Populus tomentosa*)等,采样点分别为奥林匹克森林公园南园洼里片林、奥海畔、奥林东桥及北园大花园。海淀区街道主要行道树为白蜡、臭椿和国槐等,采样点分别为清华同方大厦至国家会议中心沿路街道及逸城东苑至北京航空航天大学街道两侧。

2 材料与方法

2.1 植物材料

为消除不同生境下不同树种叶片气孔提取的差异,选取了北京市绿化常用树种中不同叶大小、叶质地和叶被毛情况的白蜡、臭椿、国槐(表1)。2017年7月分别到奥林匹克森林公园、学院路和大屯路街道采集叶片。在晴天10:00—12:00利用高枝剪按东、南、西、北方位摘取成熟健康叶片。每树种选取30株树,每株树采集30个叶片。所采集的叶片装入5℃冰盒保存,并在1 h内完成制片和图像采集。

2.2 气孔图像获取

制片采用“指甲油印迹法”,即在叶片背面一侧沿叶基至叶尖分上、中、下3处避开主脉均匀涂上一层透明指甲油,待2~3 min晾干后用镊子撕取指甲油层并制作临时气孔玻片^[19]。每张叶片制3个玻片,每个玻片利用光学显微镜放大100倍后随机选取10个视野进行图像采集,每个树种共采集600张气孔图像供试验分析。

2.3 气孔图像处理

2.3.1 气孔图像预处理

利用eCognition Developer 64对原始显微图像进行几何校正和LUT拉伸,以增加气孔对象特征与背景非对象特征的反差,达到更好的分割效果。

表 1 3 个树种叶片性状特征

Tab. 1 Leaf traits of three tree species

树种 Tree species	叶面积 Leaf area/cm ²		质地 Texture	被毛情况 Leaf hair condition
	公园 Park	街道 Street		
白蜡 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	24.637 ± 1.432	21.866 ± 2.209	革质 Coriaceous	光滑 Smooth
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	45.017 ± 5.230	36.940 ± 4.043	薄革质 Thin coriaceous	粗糙 Rough
国槐 <i>Sophora japonica</i>	11.134 ± 2.005	8.903 ± 1.002	纸质 Papery	被毛 Hair cover

2.3.2 面向对象法解译数据提取过程

面向对象分类的过程主要包括影像分割、特征选取、规则建立及分类提取(图1)。在 eCognition 中影像分割主要包括棋盘分割、多尺度分割和多阈值分割等方式^[17,20]。通过观察不同生境、不同树种的气孔特征,本试验选用多尺度分割方式,即根据同质性和异质性标准将整个影像分割成若干个互不交叉、互不重叠的子区域。分割参数主要包括尺度、形状和紧致度参数,其中尺度参数的大小决定了目标气孔能否在固定的空间分辨图像中被正确识别出来,形状参数和紧致度参数分别决定了分割界面的准确度及几何结构分割的吻合度^[21]。为保证分割对象大小吻合、形状规则、边界清晰,使分割结果达到最佳,需要设置分割参数来控制区域合并算法的阈值。

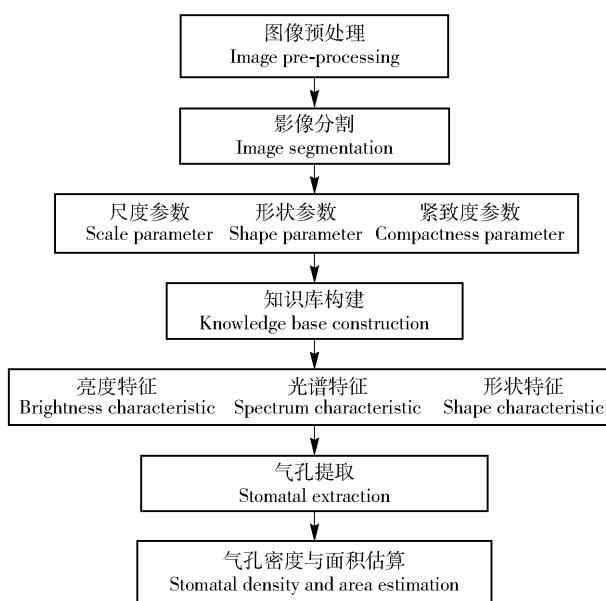


图 1 气孔提取流程图

Fig. 1 Flow chart of stomatal extraction on basis of eCognition

完成初始分割后,根据自动生成的矢量面文件选择气孔典型特征进行提取。选择特征时基于以下几点考虑:(1)气孔与非气孔亮度的显著差异;(2)气孔在显微图像上的特殊光谱特征;(3)气孔具有轮廓规则的形状特征,摆脱了颜色和亮度特征反映图像灰度值时重复出现的部分形式和分布规则,解决由光谱和亮度混淆导致分类结果破碎或粗放的问

题^[22]。对 3 个树种的叶片气孔显微图像对比观察后,选用亮度特征、光谱特征及形状特征构建气孔提取知识库,并将这 3 个特征转化为规则进一步分类提取。

2.4 气孔密度和气孔面积计算

气孔密度和气孔面积传统测算方法是根据显微图像利用 Photoshop 等图片处理软件进行测算,本研究采用 eCognition 软件确定了气孔最佳提取规则组合,对显微图像校准后,在特征类相关 (class-related) 下的统计分类物体数量 (numer of classified objects) 和统计分类物体面积 (area of classified objects) 选择对象类别 Stomatal 即可快速计算出气孔的数量和面积。

2.5 精度分析

每个树种随机选取 120 张气孔图像用于分析。其中 60 张气孔图像用于面向对象分类法批量计算,60 张用于显微镜镜检实测的精度验证,将气孔数量与气孔面积提取值和实测值差值算出最后的精度。本研究采用均方根误差检验^[23],公式如下:

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{实测值}} - P_{\text{分类值}})^2} \quad (1)$$

$$P(\%) = \frac{P_{\text{实测均值}} - R}{P_{\text{实测均值}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $P_{\text{实测值}}$ 指显微镜 DP2-BSW 软件镜检实测的气孔个数和气孔面积, $P_{\text{分类值}}$ 为分类提取得到的气孔个数和气孔面积。

3 结果与分析

3.1 图像最佳分割参数确定

如表 2 所示,不同分割参数间的气孔密度解译结果有极显著差异($P < 0.01$),而在树种间、环境间的气孔解译精度差异不显著($P > 0.01$)。当尺度参数设置过小时,气孔被分割得较破碎、边界较模糊,无论哪个树种的叶片气孔图像,都难以区分出气孔结构和非气孔结构;当尺度参数设置过大时,气孔被分割得较粗放,对象边界吻合度较差,且出现误判现象,导致气孔未被完全分割出来。然而,通过显微镜镜检结果验证表明,气孔影像的自动解译精度并非与分割尺度呈线性关系,而是在 120 尺度上误差

最低。

在一定范围内,气孔图像边界吻合程度随形状、紧致度参数的增大而呈先减后增的“U型”曲线变化(图2)。在尺度参数一致的情况下,紧致度参数设置过大、形状参数设置过小将会弱化对象边界对影像的贡献程度使主要贡献率偏向结构的锐化,导致图像分割界面密集,进而影响气孔切割的吻合度和气孔面积的估算;反之则会强化对象边界对影像的贡献程度,导致分割界面较稀疏,对最终分割结果

造成不良影响。

基于分割不能太破碎也不能太粗放的原则,通过不同环境、不同树种叶片气孔的分割参数不断调整发现,尺度参数在120、形状参数0.7和紧致度参数0.9左右时,3个树种气孔分割均达到最理想的效果(图2)。经过白蜡、臭椿和国槐在两个不同生境条件下共360张气孔显微图像反复的尝试和调整,最终确定最佳分割参数组合为:尺度参数120~125、形状参数0.7、紧致度参数0.9。

表2 分割参数及提取规则对气孔影像解译结果显著性差异分析

Tab. 2 Significance difference analysis in interpretation results of stomatal images based on segmentation parameters and extraction rules

变异来源 Source of variation	参数间 Inter-parameter		环境间 Inter-environment		树种间 Inter-tree	
	F	P	F	P	F	P
分割参数 Segmentation parameter	28.675	0.000 1	14.507	0.982 1	18.092	0.341 0
亮度特征 Brightness characteristic	63.564	0.004 5	25.991	0.453 2	25.667	0.543 1
光谱特征 Spectrum characteristic	45.321	0.003 3	34.987	0.067 5	32.131	0.204 1
形状特征 Shape characteristic	7.834	0.002 1	2.012	0.078 5	18.098	0.982 1

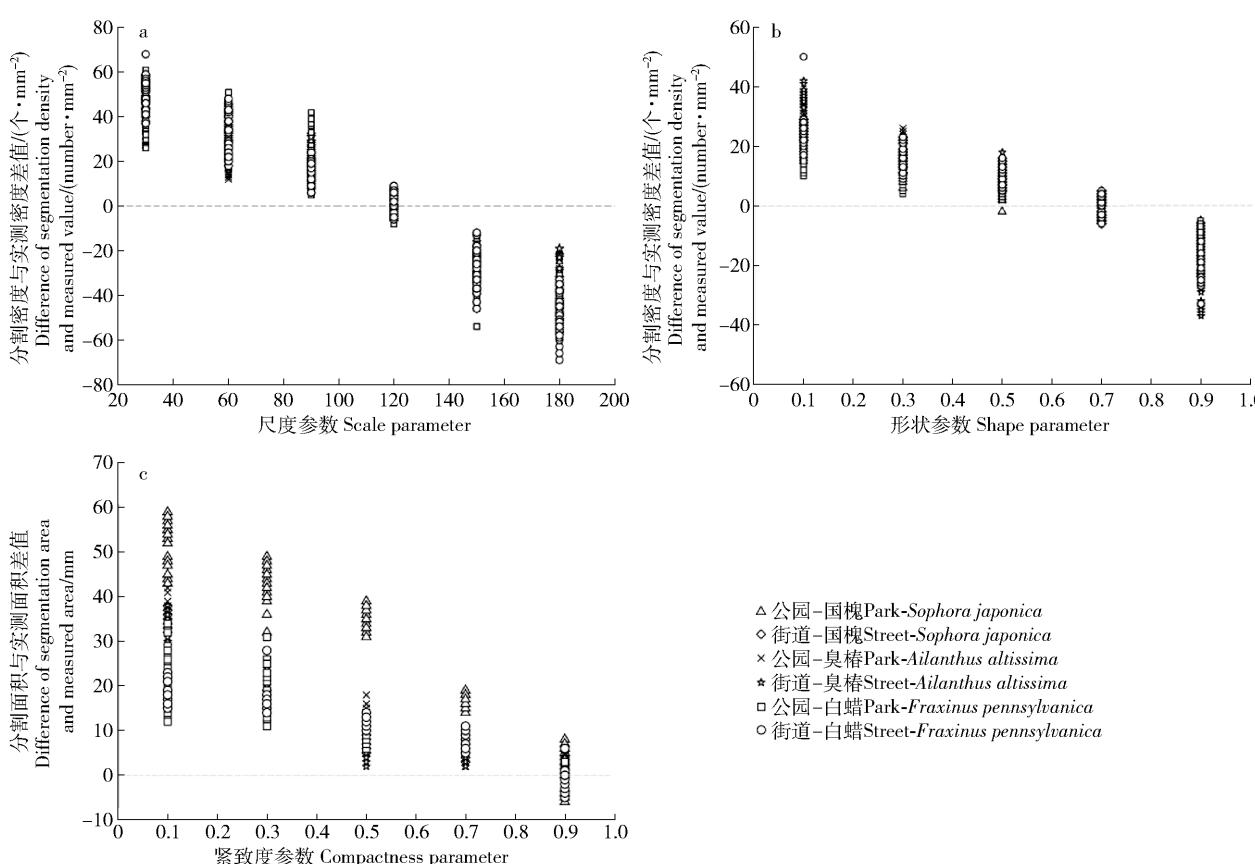


图2 多尺度分割与实测密度差值散点图

Fig. 2 Scatter plot of d-value between multi-scale segmentation and measured density

3.2 气孔分类及自动提取的图像解译条件

气孔显微图像包含了多种可用于分类的特征,利用eCognition对提取气孔时需将气孔特征进行高度概括和描述,并将气孔特征的描述转换为分类规

则从而实现气孔的提取。本研究通过对气孔特征的对比,选用亮度特征、光谱特征及形状特征构建气孔提取知识库,并将这3个特征转化为以下3个规则分类提取。

3.2.1 亮度值规则

亮度值对气孔提取精度存在极显著性差异($P < 0.01$)(表2)。选取亮度值进行分类,对照多波段影像和被选中的区域可明显看出类别特征范围的大致精度,对特征范围进一步调整至重合精度最大为止,此时的阈值即为气孔识别规则,符合这一阈值范围

的气孔对象被分出来;而未选中的表示特征值较小的对象即非气孔部分。经过多次试验得出,气孔亮度值范围限定在160~220时基本将气孔与表皮细胞区分开,但仍存在部分气孔边界不吻合的现象(表3)。

表3 分类对象特征阈值范围

Tab. 3 Threshold range of classification object feature

对象 Object	亮度特征 Brightness characteristics	光谱特征 Spectrum characteristics			形状特征 Shape feature
		蓝光波段 Layer 1 blue band	绿光波段 Layer 2 green band	红光波段 Layer 3 red band	
气孔 Stoma	160~220	>175	165~250	>95	1.5~2.2
非气孔 Non-stoma	>200	<185	<185	<95	<1.5

3.2.2 光谱规则

光谱特征对气孔提取精度存在极显著性差异($P < 0.01$)(表2)。对气孔图像分割属性分析知,大多数非气孔部分的蓝光波段均值(mean layer 1)在185以下,但同时也存在一部分气孔位于蓝光波段均值的范围内,此时的分类结果不太理想;非气孔部分的绿光波段均值(mean layer 2)基本在185以下,而气孔绿光波段均值在165~250之间,与非气孔部分存在较多的重叠,导致分类误差较大;气孔红光波段均值(mean layer 3)基本位于95以上,而非气孔部分红光波段均值却难以达到95,因此可通过将红光波段阈值设定在95以上即可分离出叶面上的非气孔部分(表3)。通过与原图的对比发现,此时的分类准确率最高。

3.2.3 形状规则

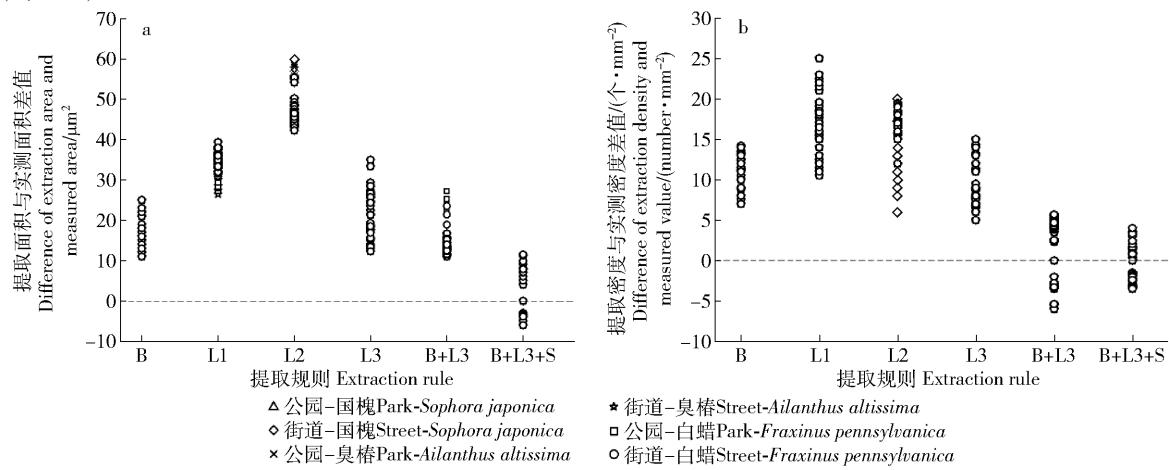
形状特征对气孔提取精度存在显著性差异($P < 0.05$)(表2)。由于图像亮度和波段的反差不能完

全将气孔与背景分开,分类时存在漏分和错分的现象。为去除非气孔部分,在Stomatal类别中将所有对象进行合并,使气孔对象特征更加明显,分出的对象为椭圆或卵圆形气孔,据此利用形状规则中的密度特征(shape-density)进一步提取。经过大量试验得出,密度范围为1.5~2.2时可以很大程度上剔除非气孔部分,大部分合并后的气孔完整的保留了下来(表3)。

随着3个规则及其叠加组合的层层分类,提取精度逐渐提高(图3、4)。经过3个树种在两个不同生境条件获取的360张气孔显微图像反复尝试和调整,得出气孔分类提取的最佳规则组合及阈值范围分别为亮度值160~220、红光波段>95、形状-密度指数1.5~2.2。

3.3 气孔密度、气孔面积解译及其精度估计

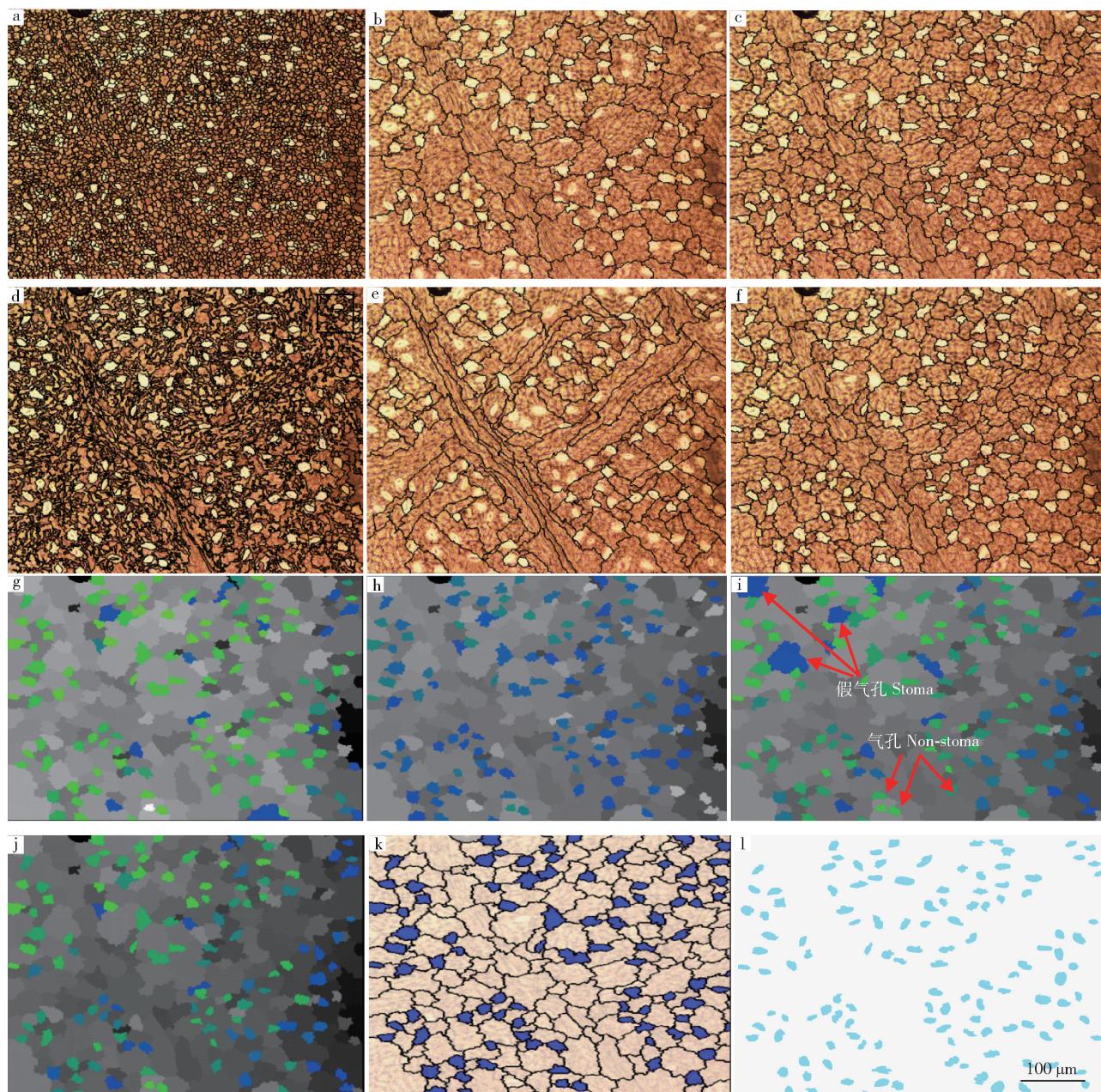
根据得出的最佳参数及分类规则阈值,每个树种选取60张图像进行检验,尽管各树种在不同生长环境中的气孔密度和气孔总面积存在较大差异,



B. 亮度值 Brightness value, L1. 蓝光波段 Layer 1 blue band, L2. 绿光波段 Layer 2 green band, L3. 红光波段 Layer 3 red band, S. 形状特征 Shape feature

图3 气孔分割精度

Fig. 3 Stomatal segmentation accuracy



a,b,c. 尺度参数分别为 30、180 和 120; d. 形状参数为 0.1, 紧致度参数为 0.9; e. 形状参数为 0.9, 紧致度参数为 0.1; f. 形状参数为 0.7, 紧致度参数为 0.9; g,h,i,j,k,l 分别为亮度特征、蓝光波段、绿光波段、红光波段、亮度值 + 红光波段、亮度值 + 红光波段 + 形状特征(图示为臭椿)。a, b and c, partitioning scales of 30, 180 and 120; d, shape parameter is 0.1, compactness parameter is 0.9; e, shape parameter is 0.9, compactness parameter is 0.1; f, shape parameter is 0.7 and compactness parameter is 0.9; g, h, i, j, k and l, brightness characteristics, blue band, green band, red band, brightness value + red band, brightness value + red band + shape feature (*Ailanthus altissima* used as an example).

图 4 气孔图像分割及提取过程

Fig. 4 Segmentation and extraction process of stomatal image

自动解译获得的气孔密度和总面积精度均在 99.2% 和 94.5% 以上(表 5), 且解译精度在树种间及环境间均不存在差异性(表 6)。这说明通过科学设定解译条件参数, 采用 eCognition 自动解译方法获取树木叶片气孔信息具有较高的普适性, 可用于大批量快速、精确计算气孔密度、气孔大小和总气孔面积。

4 结论与讨论

随着林业遥感技术应用的日益成熟, 信息检测和估算方法的多元化, 将该技术应用到林业科研和生产中显得十分必要。eCognition 面向对象分类技术应用于植物叶片气孔提取, 得出气孔分割的最佳参数及自动提取规则组合分别为尺度参数 120 ~

表4 最佳分割参数及提取规则组合阈值范围

Tab. 4 Threshold range of the best segmentation parameters and extraction rules

分割参数 Segmentation parameter			提取规则 Extraction rule		
参数 Parameter	阈值范围 Threshold range	规则 Rule	阈值范围 Threshold range		
尺度参数 Scale parameter	120 ~ 125	亮度特征值 Brightness characteristic value	160 ~ 220		
形状参数 Shape parameter	0. 7	红光波段值 Layer 3 red band	> 95		
紧致度参数 Compactness parameter	0. 9	形状特征值 Shape characteristic value	1. 5 ~ 2. 2		

表5 气孔提取精度

Tab. 5 Accuracy of stomatal extraction

环境 Environment	树种 Tree species	气孔密度/(个·mm ⁻²)				气孔面积			
		Stomatal density/(number·mm ⁻²)				Stomatal area/μm ²			
		提取值 Extraction value	镜检值 Measured value	差值 Deferece value	精度 Accuracy	提取值 Extraction value	镜检值 Measured value	差值 Deferece value	精度 Accuracy
街道 Street	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	179 ± 9	176 ± 7	2 ± 2	100.0	341 ± 15.7	331 ± 22.4	10.5 ± 1.3	97.1
	白蜡 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	284 ± 6	285 ± 7	1 ± 1	99.6	185 ± 16.4	196 ± 19.6	11.1 ± 2.6	94.4
	国槐 <i>Sophora japonica</i>	247 ± 10	249 ± 9	2 ± 1	99.1	310 ± 21.5	318 ± 21.2	8.4 ± 3.2	97.5
公园 Park	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	229 ± 7	244 ± 18	4 ± 1	98.3	233 ± 8.4	255 ± 25.3	11.2 ± 1.5	95.7
	白蜡 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	399 ± 8	167 ± 15	2 ± 2	98.9	396 ± 12.5	158 ± 22.1	13.1 ± 1.8	94.6
	国槐 <i>Sophora japonica</i>	295 ± 9	198 ± 18	3 ± 1	98.9	298 ± 13.2	184 ± 17.5	17.8 ± 5.4	93.0

表6 提取结果与实测值差值显著性分析

Tab. 6 Significance analysis in the difference between extraction result and measured value

变异来源 Variance source	气孔密度 Stomatal density					气孔面积 Stomatal area				
	离差平方和 Sum of squares of deviation	df	均方		Sig.	离差平方和 Sum of squares of deviation	df	均方		Sig.
			Sum of squares	df				Mean	F	
环境间 Inter-environment	0. 003	1	0. 003	0. 004	0. 948	0. 225	1	0. 225	1. 639	0. 201
树种间 Inter-tree	2. 867	2	1. 433	2. 195	0. 113	0. 506	2	0. 253	1. 842	0. 160
误差 Error	232. 506	357	0. 653			48. 867	357	0. 137		
总计 Total	235. 376	360				49. 598	360			

125、形状参数 0.7、紧致度参数 0.9、亮度值 160 ~ 220、红光波段 > 95、形状-密度指数 1.5 ~ 2.2。对不同生境、不同树种、不同叶面积及叶质地的叶片气孔密度和气孔面积估算结果均较理想, 精度分别达到 99.2% 和 94.5%, 该方法可用于大批量获取气孔特征信息, 为今后气孔特征的深入研究奠定基础。

该方法的关键在于分割参数的确定及提取规则的建立, 以确保分割的精确度和吻合度^[21-23]。同时, 由于不同树种叶片特征的差异, 如叶片绒毛、粉尘等杂质导致获取气孔图像时出现部分气孔被掩盖的问题, 可能在一定程度上降低遥感方法自动提取气孔信息的准确度^[24]。因此, 为了提高自动解译结果的精度, 应在制片前先对叶片进行快速固定, 使气孔形态尽可能地保持试验处理状态, 而后应该对叶表面进行擦拭清洗, 尽可能把绒毛和杂质清除干

净, 在印迹处理过程中保证印迹液涂抹均匀, 以避免亮度不均影响提取精度^[25]。

经过验证, 面向对象分类方法对不同生境、不同树种的叶片气孔提取结果没有显著差异, 得出的解译阈值适用于大部分木本植物, 具有普遍适用性。与传统方法相比, 该方法大大提高气孔特征分类提取工作的效率, 对大批量气孔分类提取工作具有重要意义。但由于研究范围及样本有限, 在草本植物以及农业主要作物叶片气孔特征的应用尚有待进一步研究, 在未来的研究工作中应建立更大更全面的样本库, 使得该方法在草本植物范畴有更好的训练样本, 从而提高气孔识别的效果。

参 考 文 献

- [1] 王瑞丽, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 气孔特征与叶片功能性状之间关联性沿海拔梯度的变化规律: 以长白山为例[J]. 生态学报,

- 2016,36(8):2175-2184.
- Wang R L, Yu G R, He N P, et al. Altitudinal variation in the covariation of stomatal traits with leaf functional traits in Changbai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (8):2175-2184.
- [2] 高冠龙,张小由,常宗强,等.植物气孔导度的环境响应模拟及其尺度扩展[J].*生态学报*,2016,36(6):1491-1500.
- Gao G L, Zhang X Y, Chang Z Q, et al. Environment response simulation and the up-scaling of plant stomatal conductance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (6):1491-1500.
- [3] 王艳萍,刘胜利,陈玉珍,等.3种长白山高山杜鹃叶片结构及其对环境的适应性[J].*北京林业大学学报*,2012,34(4):18-25.
- Wang Y P, Liu S L, Chen Y Z, et al. Leaf structural characteristics of three wild *Rhododendron* plants and their adaptation to Changbai Mountains, northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34 (4):18-25.
- [4] 熊慧,马承恩,李乐,等.不同生境条件下蕨类和被子植物的气孔形态特征及其对光强变化的响应[J].*植物生态学报*,2014,38(8):868-877.
- Xiong H, Ma C E, Li L, et al. Stomatal characteristics of ferns and angiosperms and their responses to changing light intensity at different habitats [J]. *Acta Phytocologia Sinica*, 2014, 38 (8): 868-877.
- [5] 司怀通,于天卉,关心怡,等.红树林植物气孔对环境因子的响应及其与水力功能的协调[J].*植物生理学报*,2017,53(3):487-496.
- Si H T, Yu T H, Guan X Y, et al. Stomatal responses to environmental factors and its coordination with hydraulic functions in plants of mangrove forests [J]. *Acta Phytocology of Plant Physiology*, 2017, 53 (3):487-496.
- [6] 刘小刚,万梦丹,齐韵涛,等.不同遮阴下亏缺灌溉对小粒咖啡生长和水光利用的影响[J].*农业机械学报*,2017,48(1):191-197.
- Liu X G, Wan M D, Qi Y T, et al. Effect of deficit irrigation on growth and water radiation use of arabica coffee under different shading [J]. *Transaction of the Chinese society for agricultural Mechanery*, 2017, 48 (1):191-197.
- [7] 张川红,尹伟伦,沈应柏.盐胁迫对国槐与核桃气孔的影响[J].*北京林业大学学报*,2002,24(2):1-7.
- Zhang C H, Yin W L, Shen Y B. Effects of salt stress on stomatal of *Sophora japonica* and *Juglans regia* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(2):1-7.
- [8] 郑云普,徐明,王建书,等.玉米叶片气孔特征及气体交换过程对气候变暖的响应[J].*作物学报*,2015,41(4):601-612.
- Zheng Y P, Xu M, Wang J S, et al. Response of stomatal traits and gas exchange of maize leaves to climate warming [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41 (4):601-612.
- [9] 王曙光,李中青,贾寿山,等.小麦叶片气孔性状与产量和抗旱性的关系[J].*应用生态学报*,2013,24(6):1609-1614.
- Wang S G, Li Z Q, Jia S S, et al. Relationships of wheat leaf stomatal traits with yield and drought resistance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (6):1609-1614.
- [10] 魏琳,张卫国,任柏林,等.小麦离体表皮上气孔对若干关键生理因子的应答反应[J].*植物生理学报*,2015,51 (5):649-654.
- Wei L, Zhang W G, Ren B L, et al. Stomatal response to several key physiological factors using epidermal strips of wheat [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51 (5):649-654.
- [11] 徐俊增,彭世彰,魏征,等.节水灌溉水稻叶片胞间CO₂浓度及气孔与非气孔限制[J].*农业工程学报*,2010,26(7):76-80.
- Xu J Z, Peng S Z, Wei Z, et al. Intercellular CO₂ concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26 (7):76-80.
- [12] 金欣欣,石建初,李森,等.根系吸水模型模拟覆膜旱作水稻气孔导度[J].*农业工程学报*,2017,33(9):107-115.
- Jin X X, Shi J C, Li S, et al. Modeling stomatal conductance using root-water-up take in ground cover rice production system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33 (9):107-115.
- [13] 李郁竹,曾燕.应用NOAA/AVHRR数据测算局地水稻种植面积方法研究[J].*遥感学报*,1998,2(2):125-130.
- Li Y Z, Zeng Y. Study on method of rice planting area estimation at regional scale using NOAA / AVHRR data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(2):125-130.
- [14] Wardlow B D, Egbert S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U. S. Central Great Plains [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 (3):1096-1116.
- [15] Sulong I, Mohd-Lokman H, Mohd-Tannizi K, et al. Mangrove mapping using Landsat imagery and aerial photographs: Kemaman district, Terengganu Malaysia [J]. *Environment Development & Sustainability*, 2002, 4 (2):135-152.
- [16] 李明泽,于欣彤,高元科,等.基于SAR极化分解与Landsat数据的森林生物量遥感估测[J].*北京林业大学学报*,2018,40(2):1-10.
- Li M Z, Yu X T, Gao Y K, et al. Remote sensing quantification on forest biomass based on SAR polarimetry decomposition and Landsat data [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40 (2):1-10.
- [17] Ghassemian H, Landgrebe D A. Object-oriented feature extraction method for image data compaction [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 8 (3):42-48.
- [18] Laliberte A S, Rango A, Havstad K M, et al. Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93 (1):198-210.
- [19] 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,等.大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局[J].*环境科学*,2017,38 (1):412-422.
- Zhao H, Zheng Y F, Cao J C, et al. Effects of atmospheric ozone pollution on stomatal absorption flux of winter wheat and its spatial and temporal patterns [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2017, 38 (1):412-422.
- [20] Johansen K, Arroyo L A, Phinn S, et al. Comparison of geo-object based and pixel-based change detection of riparian environments using high spatial resolution multi-spectral imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76 (2): 123-136.

- [21] Lucas R, Rowlands A, Brown A, et al. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2007, 62(3):165-185.
- [22] 李春干, 邵国凡. Landsat 7 ETM+ 图像森林分类的辅助数据研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 1-5.
Li C G, Shao G F. Using Landsat 7 ETM+ images as ancillary data for forest cover classification of SPOTS 5 images [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 1-5.
- [23] 魏晶昱, 毛学刚, 方本煜, 等. 基于 Landsat 8 OLI 辅助的亚米级遥感影像树种识别[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(11): 23-33.
Wei J Y, Mao X G, Fang B Y, et al. Submeter remote sensing image recognition of trees based on Landsat 8 OLI support [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(11): 23-33.
- [24] 贾旭梅, 王延秀, 党兆霞, 等. 八棱海棠上 11 个矮化砧木生长及其叶片解剖特性的研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(6): 1126-1136.
Jia X M, Wang Y X, Dang Z X, et al. The growth and leaf anatomical characteristics of 11 dwarf rootstocks in *Morus robusta* Rehd [J]. *Northwest Botany*, 2017, 37 (6): 1126-1136.
- [25] 王丛鹏, 贾伏丽, 刘沙, 等. 干旱对欧美杨气孔发育的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(6): 28-34.
Wang C P, Jia F L, Liu S, et al. Drought induces alterations in stomatal development in *Populus deltoides* P. nigra [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(6): 28-34.

(责任编辑 范娟
责任编委 蒋湘宁)