

网络出版时间:2017-03-31 16:08

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.05.022

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170331.1608.044.html

基于面向对象特征提取的植物叶片面积测量方法

刘时城^{1a}, 温仲明^{1b}, 戚德辉², 王红霞^{1b}, 郭 茹³

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002;

3 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】提出一种基于面向对象图像特征提取的植物叶面积测量方法, 为快速、高精度地测量野外采集植物的叶片面积提供支持。【方法】以扫描图像为基础, 借鉴遥感影像的面向对象图像特征提取的思想, 获得扫描对象的矢量轮廓, 以此计算其面积, 并采用 AutoCAD 绘制的 7 种多边形进行重复试验, 以验证该方法的精确性; 然后进一步对青蒿(*Artemisia carvifolia*)、臭蒿(*Artemisia hedinii*)、苜蓿(*Medicago sativa*) 3 种植物叶片进行重复试验, 并与矢量化方法、监督分类方法进行对比, 分析该方法在实际叶片测量中的稳定性和计算效率。【结果】利用基于面向对象图像特征提取的植物叶面积测量方法, 在进行标准几何图形的面积测量时, 该方法的相对误差皆小于 1.86%; 与矢量化方法、监督分类方法相比, 该方法在测量真实植物叶片面积时具有更高的稳定性, 而且耗时都小于 20 s, 用时最短; 该方法采用 IDL 模块设计, 可实现叶片面积的自动批量处理。【结论】基于面向对象特征提取的植物叶片面积测量方法, 是叶片面积高精度及批量自动化测量的一种新途径。

[关键词] 叶面积测量; 面向对象; 特征提取

[中图分类号] S127

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2017)05-0161-07

Measuring plant leaf area based on object-oriented feature extraction

LIU Shicheng^{1a}, WEN Zhongming^{1b}, QI Dehui², WANG Hongxia^{1b}, GUO Ru³

(1 a College of Nature Resources and Environment, b Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou,

Zhejiang 310002, China; 3 Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment,

Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】An object-oriented feature extraction method was proposed to quickly and accurately measure area of plant leaf sampled from field. 【Method】The scanned images of objects were collected and vector edge of objects was extracted by the object-oriented feature extraction method used in remote sensing to calculate the area. The accuracy was tested with repeated trials using seven standard geometrical objects in AutoCAD. Additionally, the areas of real leaf samples of *Artemisia carvifolia*, *Artemisia hedinii*, and *Medicago sativa* were measured to analyzed the stability and efficiency compared to unsupervised classification and vectorization methods. 【Result】The object-oriented feature extraction based method had the relative error of the less 1.86% in measuring standard geometrical objects. Compared with unsupervised classification and vectorization methods, the established method was more stable and used less time (<20 s) in measuring real plant leaves. This method can achieve batch processing of leaves with IDL de-

[收稿日期] 2016-02-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41271297)

[作者简介] 刘时城(1991—), 男, 湖北麻城人, 在读硕士, 主要从事生态学与 3S 技术研究。E-mail: xinongtudou@foxmail.com

[通信作者] 温仲明(1969—), 男, 陕西定边人, 副研究员, 博士, 主要从事植被恢复重建与环境变化关系研究。

E-mail: zmwmen@ms.iswc.ac.cn

sign.【Conclusion】 The object-oriented feature extraction based method provides a new and accurate approach for indoor batch processing of plant leaf area.

Key words: measurement of leaf area; object-oriented; feature extraction

叶片作为植物进行呼吸作用、光合作用和蒸腾作用的主要器官,其叶面积大小是植物生长状态的重要指标之一^[1-2]。在生态学研究,叶面积的准确测定是精确计算与之相关的各种参数的前提。野外的很多草本植物叶片小,容易发生变形或重叠而导致测量误差;同时这些叶片的采集量也极大,叶面积测量工作量极大^[3]。因此,如何快速准确地测量叶片面积对于生态学相关研究具有重要的意义。

目前叶面积测量方法有网格法、叶长叶宽推算法^[4-5]、Photoshop 法^[6]、数字图像处理法^[7-10]、叶面积仪法^[11]等。网格法是一种比较传统的方法,存在着工作量大、耗费时长等缺点,同时叶片边缘复杂时误差较大;叶长叶宽推算法是通过统计分析建模来推算叶面积,精确度不高,在实际操作中很少使用;Photoshop 法可以实现高精度的叶面积测量,但是手动绘制过程比较繁琐,导致工作量变大;数字图像处理法能够快速实现叶面积测量,但是算法的构建比较复杂;叶面积仪法测量快捷,但是实际测量中误差较大,而且成本较高,难以普遍使用。

在地理信息系统和遥感研究领域,图像特征的提取和分析是一项重要的研究内容,并且形成了一定的技术与方法积累。近年来,不少研究者将上述领域的思想引入到叶面积测量中,形成了基于 GIS 或 RS 的叶面积测量方法^[12-14],这些方法借助一些专业的平台,可以实现叶面积的快速准确测量。基于 GIS 或 RS 的叶面积测量方法包括矢量化法^[15]和监督分类法^[13],其中矢量化法是通过人工手绘出植物叶片的矢量边界,进而计算其面积;而监督分类法则是将叶片的扫描图像分成背景和叶片 2 类,统计叶片的栅格数后计算叶面积。这 2 种方法不仅耗时长,而且测量结果的稳定性也较差。

与传统的图像分类法不同,面向对象特征地物提取方法首先通过一定的分割方法对影像进行分割,继而提取分割单元的各种特征,并在特征空间对对象进行标识,最终实现特征的提取^[16]。本研究试图通过对这种面向对象特征提取方法的分割参数及提取规则的研究,结合 ENVI 软件的二次开发^[17],提出一种针对扫描叶片的自动、批量提取与计算方法,并选取不同植物叶片作为研究对象,将面向对象图像特征提取方法的叶面积计算结果与影像监督分

类法、手动矢量化法的结果进行比较,评价 3 种方法在精度、速度等方面的差异,为叶面积的快速测量提供方法上的支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料的准备

1.1.1 标准图形的绘制 使用 AutoCAD2014 精确绘制出等边三角形、矩形、五边形、六边形、圆以及 2 种不规则的多边形,共有 7 类图形;将每一类图形复制 4 个,得到了 5 个相同的图形。将这 5 个图形分别进行不同角度任意旋转,得到的结果如图 1 所示。这 7 类图形的面积可以在 AutoCAD2014 中通过图形的属性来查询。



图 1 7 类标准图形的绘制

Fig. 1 Seven standard geometrical objects for drawing

1.1.2 实体植物样本采集 如图 2 所示,以野外采集具有代表性的青蒿(*Artemisia carvifolia*)、臭蒿(*Artemisia hedinii*)、苜蓿(*Medicago sativa*) 3 种草本植物的叶片作为研究对象:青蒿的叶面轮廓曲折,整体呈现三分叉;臭蒿的叶片呈现锯齿状;苜蓿的叶片则比较圆润规则。

1.2 试验材料的扫描

使用扫描仪为 MICROTECK 纷腾 v700Plus,型号是 MRS-9600-TU2L,扫描时用一张白纸作为背景^[18]。由于扫描图像采用横扫式的逐点记录^[19],

因此与相机的中心投影相比,几何变形很小。同时扫描仪能够将叶片或几何图形很好展平,这样也就进一步减小了误差。扫描过程中,需要记录下扫描

叶片或几何图形所采用的分辨率^[20],这与叶片或几何图形的面积计算息息相关。本研究中采用的分辨率皆为 300 dpi。



图 2 3 种植物的叶片
Fig. 2 Leaves of three plants

1.3 试验方法

借助遥感中面向对象图像特征提取的思想来实现叶片的提取与计算。主要包括两个步骤:首先,对图像进行分割获得分割斑块;其次,利用图斑分类等操作完成整个信息提取过程。其优点在于处理对象从像元过渡到了特征像元集的对象层次,使得参与后续分析的特征数量更为丰富,更接近提取数据信息的思维逻辑。本研究采用的软件是 ENVI4.8 中 ENVI ZOOM 软件平台内嵌的面向对象空间特征的提取模块 (Feature Extraction)。

1.3.1 分割阈值与融合阈值的选择 采用 Feature Extraction 模块对影像进行分割。基于边缘分割的算法,能够根据图像临近像素的亮度、纹理、颜色等信息快速、准确地对影像进行分割,并支持在预览窗口中实时地查看分割结果^[21]。它支持随时修改参数,只需用滑块调整阈值设定输入参数,便可以产生由细到粗的多尺度分割结果。通过比较,设置合理的分割阈值,以便尽可能准确地分割出边缘特征。分割阈值的范围为 0~100。

由于同一个叶片被切成了很多细碎的斑块,而过多的细碎斑块不利于下一步叶片的提取,因此还需要有一个融合过程。此阈值的范围也为 0~100。研究过程中,调节阈值的大小,同时预览合并结果,最终选取一个合适的融合阈值。

在 ENVI4.8 软件中,分割阈值与融合阈值均是通过人为地修改,并结合预览结果反复调整而得到。这一过程具有极大的盲目性和不确定性。为了分析二者阈值的关系及对分割结果的影响,将分割阈值和融合阈值各均分为 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 等 11 个等级,同时将两个阈值两两组合,得到 121 个组合。保持其他的条件不变,将得到

的这些结果分析比较,选择出比较恰当的阈值范围。这样就为分割阈值和融合阈值的选择提供依据,避免人为的盲目性。

1.3.2 构建叶片提取规则 扫描图像为“.jpg”格式,拥有红、绿、蓝 3 个波段^[19]。通过以上步骤,图像被切割成一个个图斑。这些图斑分别为叶片和作为背景的白纸。叶片和白纸在光谱信息方面存在着极大的差异,这也正好作为提取叶片的依据。因此,本研究过程中主要以光谱属性来构建规则,在 ENVI 的 FX 工具中,光谱属性分为很多种类,包括波段最小灰度值、最大灰度值、平均灰度值和灰度值标准差^[22]。

从各个切割图斑各波段平均灰度值的直方图 (图 3) 可以发现,其为一个双峰形的图像。由于白纸接近白色,故值较大的峰形附近的图斑对应的是白纸图斑,而叶片的平均灰度值都较小,故值较小的峰形附近的图斑对应的是叶片图斑,在双峰形的直方图中间有一大片空白的区域,这个区间的平均灰度值就是区分叶片图斑和白纸图斑的阈值。研究发现,3 个波段都可以选择这样 1 个阈值。3 个阈值构成了一个提取规则。假设 a 、 b 、 c 为 band_1、band_2、band_3 3 个波段的阈值,则在 ENVI 中,提取某叶片图斑的规则表述为:

$$avg_{band_1} < a \text{ and } avg_{band_2} < b \text{ and } avg_{band_3} < c。$$

式中: avg_{band_1} 、 avg_{band_2} 、 avg_{band_3} 分别为某叶片图斑在 3 个波段的平均值, and 连接词表示必须同时满足上述 3 个条件,才属于某叶片。

1.3.3 叶片提取 经过上一步规则的筛选,符合条件的叶片图斑将合并在一起。本研究中提取的结果将以矢量的形式输出。矢量图形面积为原扫描图像的最小栅格像元个数,记录在叶片矢量数据的属

性表中。

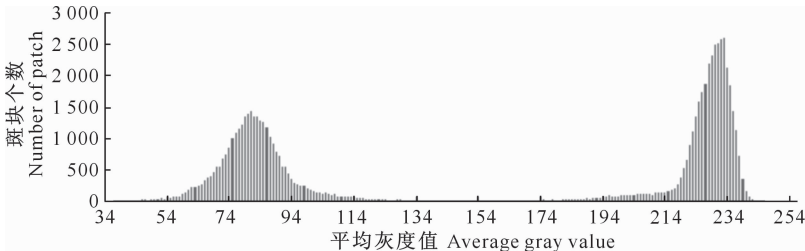


图 3 某图斑不同波段平均灰度值的直方图

Fig. 3 Average DN of a patch on different bands

1.3.4 叶片面积的计算输出 矢量属性表中包含的面积信息是栅格单元的个数,并不是真实的面积值,还需要借助图像的分辨率进行换算^[13]。假设扫描使用的分辨率为 N dpi,由于 1 dpi 的长度为 25.4 mm,则每个栅格的宽度为 $(25.4/N)$ mm,那么真实的面积为:

$$A_2=(25.4/N)^2\times A_1。$$

式中: A_1 为属性表中扫描叶片的栅格单元个数; A_2 为真实的面积,单位为 mm^2 。

1.4 批处理程序设计

本研究通过预先的测试,确定某一类图像提取时的 2 个阈值和 1 个规则集,然后通过现有的 IDL 批处理框架^[17],借助于 ENVI 二次开发^[22]设计出一个批处理程序,可以一次性处理大量叶片。



图 4 5 个不规则图形

Fig. 4 Five irregular geometrical objects

当分割阈值或者融合阈值为 100 时,无法正确提取出图形,导致结果无法计算。因此实际结果只

表 1 不同融合阈值和分割阈值下的相对误差

Table 1 Relative errors of different merge levels and scale levels

%

分割阈值 Scale level	融合阈值 Merging level									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
10	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
20	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
30	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
40	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
50	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
60	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
70	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
80	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
90	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04

2 结果与分析

2.1 面向对象特征提取方法的精确性验证

2.1.1 分割阈值与融合阈值的选择 本研究以图 4 中面积已知的不规则图形为研究对象,这 5 个图形的区别在于旋转的角度不同。按照 1.3.1 中所描述的方式应该有 121 个处理,每次处理测出 5 个值;取这 5 个值的平均值,与已知的面积进行比较。本研究使用一个相对误差 Δ 来衡量结果的准确程度:

$$\Delta=\left|\frac{\overline{A}-A}{A}\right|\times 100\%。$$

式中: Δ 为相对误差, $\overline{A}$ 为测量面积的平均值, A 为真实面积。

由表 1 可以看出,分割阈值一定时,随着融合阈值的变化,相对误差未发生变化。而融合阈值不变,当分割阈值为 0~70 时,相对误差未发生变化;当分割阈值为 80、90 时,相对误差随着分割阈值的增加而略有增大。根据上述结果,只要分割阈值处于较小的范围内,相对误差也比较小,并且误差值保持不变。但是如果 2 个阈值太小,斑块数量就会太多、太细碎。因此在本试验中,将分割阈值和融合阈值均设为 50。

2.1.2 精确性验证 为了验证上述方法的可行性,

对图 1 中面积已知的 7 种几何图形进行测量。这 7 种面积已知的标准几何图形,每个都有 5 个重复。计算每种图形的平均值、样本标准差及测量的相对误差如表 2 所示。其中测量值的结果以“平均值±样本标准差”的形式表示。从表 2 可以看出,7 种图形面积测量的相对误差为 0.07%~1.86%。由于各个几何图形颜色一致,且位于同一扫描图形中,尚无法判断几何图形与相对误差间存在何种关系。由表 2 还可以看出,所有测量结果的相对误差均小于 2%。

表 2 7 种标准图形的测量值及相对误差

Table 2 Observed values and relative errors of seven standard geometrical objects

编号 No.	几何图形 Geometrical object	真实值/mm ² True value	测量值/mm ² Measured value	相对误差/% Relative error
1	三角形 Triangle	128.09	125.71±0.60	1.86
2	矩形 Rectangle	299.54	299.02±0.60	0.18
3	正五边形 Regular pentagon	249.91	251.39±0.67	0.59
4	正六边形 Regular hexagon	301.36	303.05±0.53	0.56
5	圆 Circle	346.36	344.69±0.61	0.48
6	不规则图形 1 Irregular geometrical object 1	317.95	314.38±0.74	1.12
7	不规则图形 2 Irregular geometrical object 2	212.05	211.89±1.04	0.07

2.2 3 种植物实体叶片测量结果的对比与分析

2.2.1 3 种叶面积测量方法所得结果的对比 将本研究提出的面向对象特征提取方法与矢量化方法、监督分类方法进行对比。使用 ArcGIS10.0 软件人工矢量化叶片,即人为勾画完成叶片的矢量边界,并计算叶面积。使用 ENVI4.8 软件进行监督分类,并计算叶面积。

以青蒿、臭蒿、苜蓿 3 种草本植物的叶片为研究对象,每种植物选取 4 片叶子,并将叶片放置在不同的方向,然后重复扫描 5 次,从而产生 5 组数据,结

果取 5 组数据的平均值,并计算样本标准差。表 3 是 3 种草本植物叶片在不同方法下的测量结果。从表 3 可以看出,各种方法的测量结果很接近,但样本标准差却存在差异。虽然无法知道各个叶片的真实面积,无法准确计算相对误差,但是可以由样本标准差来评估各种方法的稳定性。矢量化方法的样本标准差都比较大,监督分类方法次之,而面向对象特征提取方法的样本标准差都比较小。这说明 3 种方法中面向对象特征提取方法的测量结果稳定性最好,测量结果的变异最小。

表 3 不同测量方法下各种植物叶面积的测量结果

Table 3 Measured areas of different plant leaves with different methods mm²

植物类型 Plant type	矢量化方法 Vectorization	监督分类方法 Unsupervised classification	面向对象特征提取方法 Object-oriented feature extraction
青蒿 <i>Artemisia carvi folia</i>	2 470.05±12.05	2 497.43±10.38	2 465.03±7.77
臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i>	905.47±8.91	909.19±2.22	894.60±2.13
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	1 351.04±5.66	1 349.72±5.55	1 345.18±4.62

2.2.2 3 种叶面积测量方法测量时间的对比 记录 3 种不同叶片叶面积测量方法所用的时间,对于

同一种植物,5 个重复所用的时间取平均值,结果如表 4 所示。

表 4 3 种植物叶面积不同测量方法所用时间的比较

Table 4 Comparison of average time of different methods for leaf areas of three plants s

植物类型 Plant type	矢量化方法 Vectorization	监督分类方法 Unsupervised classification	面向对象特征提取方法 Object-oriented feature extraction
青蒿 <i>Artemisia carvi folia</i>	668.50	23.39	19.75
臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i>	610.65	21.57	16.31
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	350.74	19.79	16.54

从表 4 可以看出,面向对象特征提取方法所用

时间较监督分类法稍短,但是差距较小;而矢量化方

法明显用时较长,这是因为前 2 种方法都是计算机自动识别计算,而矢量化方法则是采用人工勾画叶片的边界,这样耗时就比较长。如果采用 IDL 的批处理设计,可以对采集的大量叶片进行自动化面积测量,这样就可以大大节省时间。

3 结 论

本研究提出的基于面向对象特征提取的叶面积测量方法,提供了一种精度更高、测量速度更快的叶面积测量方法。在精度验证中,其相对误差小于 1.86%;在与矢量化和监督分类这 2 种已有方法的比较中,该方法在测量结果的稳定性与节省测量时间方面均略胜一筹。

在生态学研究过程中,叶面积的准确快速测量相当重要。而研究中的草本植物叶面积测量工作相当繁琐:这些叶片面积小,而且叶片大多卷曲。目前很多的研究都比较倾向于无损测量。虽然无损测量不会破坏植物的结构,但很多草本植物的小叶片是无法进行无损测量的,这就要使用扫描图像作为测量的基础。本研究提出的面向对象特征提取的叶面积测量方法正是建立在此基础之上,特别适合这类叶片的测量。

将遥感影像处理的思想运用于微观的叶面积测量过程中,是本方法的一大创新。面向对象特征提取方法在遥感影像分类中的使用已经相当成熟,并拥有一个完整的处理流程,因此该方法的应用便于实现,而且测量过程也比较简便,并且该方法还可以实现一次性测量多片叶子,也可以批量化测量多幅叶子的扫描图像,这样也能更大地提高测量效率,因而具有很大的应用潜力。但是基于面向对象特征提取的叶面积测量方法以叶片的扫描图像为测量基础,不能进行叶面积无损测量,并且在每次测量时,必须要将这些植物叶片采摘下来进行细心保存,采集的叶片也需要及时进行扫描,防止叶片被破坏而影响叶面积的准确测量和计算。

〔参考文献〕

- [1] Igathinathane C, Prakash V S S, Padma U, et al. Interactive computer software development for leaf area measurement [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 51: 1-16.
- [2] Bylesjö M, Segura V, Soolanayakanahally R Y, et al. LAMINA: a tool for rapid quantification of leaf size and shape parameters [J]. BMC Plant Biology, 2008, 8(1): 82.
- [3] Caldas L S, Bravo C, Piccolo H, et al. Measurement of leaf area with a hand-scanner linked to a microcomputer [J]. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, 1992, 1(4): 17-20.
- [4] Spann T M, Heerema R J. A simple method for non-destructive estimation of total shoot leaf area in tree fruit crops [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(3): 528-533.
- [5] 王忠芝, 张金瑞. 基于图像处理的叶面积测量方法 [J]. 微计算机应用, 2010, 31(5): 68-72.
Wang Z Z, Zhang J R. A measurement approach of leaf area based on digital image processing [J]. Microcomputer Applications, 2010, 31(5): 68-72.
- [6] 肖 强, 叶文景, 朱 珠, 等. 利用数码相机和 Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 711-714.
Xiao Q, Ye W J, Zhu Z, et al. A simple non-destructive method to measure leaf area using digital camera and Photoshop software [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(6): 711-714.
- [7] 韩殿元, 黄心渊, 付 慧. 基于彩色通道相似性图像分割方法的植物叶面积计算 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 179-183.
Han D Y, Huang X Y, Fu H. Measurement of plant leaf area based on image segmentation of color channel similarity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 179-183.
- [8] 陈涛涛, 迟道才, 梁 茜. 基于矩形框几何校正的多叶面积测量方法 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 206-213.
Chen T T, Chi D C, Liang Q. Multi-leaf area measurement method based on geometric correction with rectangular box [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 206-213.
- [9] 谭 峰, 高艳萍. 基于图像的植物叶面积无损测量方法研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 170-173.
Tan F, Gao Y P. Investigation of the method for non-destructive measurement of leaf area based on image [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(5): 170-173.
- [10] Chien C F, Lin T T. Leaf area measurement of selected vegetable seedlings using elliptical hough transform [J]. Transactions of the Asae, 2002, 45(4): 1669-1677.
- [11] Gong A, Wu X, Qiu Z, et al. A handheld device for leaf area measurement [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 74-80.
- [12] 陈积山, 朱瑞芬, 张月学. 基于 GIS 在苜蓿叶面积测定中的应用 [J]. 草业科学, 2012, 29(7): 1044-1048.
Chen J S, Zhu R F, Zhang Y X. Application of spatial analysis technology to quantifying leaf area of *Medicago sativa* plant based on GIS [J]. Pratacultural Science, 2012, 29(7): 1044-1048.
- [13] 乐通潮, 张会儒, 谭芳林. 基于自动分类法的红树植物叶片信息测定 [J]. 林业科学, 2014, 50(5): 34-40.
Le T C, Zhang H R, Tan F L. Application of automatic classification method to measuring leaf parameters of *Mangrove* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(5): 35-40.
- [14] 吴雪琼, 杨文斌, 李 卫, 等. 基于 ArcMap 的赤峰杨叶面积信息提取方法 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(8): 57-60.

Wu X Q, Yang W B, Li W, et al. The method of extracting leaf area information with ArcMap software [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(8): 57-60.

[15] 刘玉华, 贾志宽, 史纪安, 等. GIS 空间分析技术在苜蓿叶面积测定中的应用 [J]. 草业学报, 2006, 15(2): 119-123.

Liu Y H, Jia Z K, Shi J A, et al. Application of GIS spatial analyst technology to measuring leaf area of *Medicago sativa* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(2): 119-123.

[16] 韦玉春, 汤国安, 杨 昕. 遥感数字图像处理教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 200-207.

Wei Y C, Tang G A, Yang X. Guide of remote sensing digital image processing [M]. Beijing: Science Press, 2007: 200-207.

[17] 董彦卿. IDL 程序设计: 数据可视化与 ENVI 二次开发 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 455-461.

Dong Y Q. IDL programming: data visualization and the secondary of ENVI [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 455-461.

[18] Varma V, Osuri A M. Black spot: a platform for automated and rapid estimation of leaf area from scanned images [J]. Plant Ecology, 2013, 214(12): 1529-1534.

[19] 张桂兰. 扫描仪的原理及其使用方法 [J]. 印刷技术, 1995(5): 244-245.

Zhang G L. The principle and introduction of scanner [J]. Printing Technology, 1995(5): 244-245.

[20] Bakr E M. A new software for measuring leaf area, and area damaged by *Tetranychus urticae* Koch [J]. Blackwell Verlag, 2005, 192(2): 173-175.

[21] 陈侯曦. 基于面向对象的鱼塘面积遥感估算: 以台山市为例 [D]. 南京: 南京大学, 2011.

Chen Y X. Estimation of ponds area based on object-oriented classification method with remote sensing data: a case of Taishan [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.

[22] 邓书斌. ENVI 遥感数字图像处理方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 211-218.

Deng S B. Methods of remote sensing digital image processing with ENVI [M]. Beijing: Science Press, 2010: 211-218.

(上接第 160 页)

[27] 司民真, 李 伦, 张川云, 等. 顶空及 SERS 结合快速检测葱属植物大葱挥发物 [J]. 激光生物学报, 2015, 24(4): 348-353, 367.

Si M Z, Li L, Zhang C Y, et al. Rapid detection of volatile organic compounds of green Chinese onion using headspace combined with SERS [J]. Acta Laser Biology Sinica, 2015, 24(4): 348-353, 367.

[28] 汪 潇, 王锡昌. 顶空固相微萃取与气质联用法分析大葱的挥发性风味成分 [J]. 现代食品科技, 2008, 23(3): 69-71.

Wang X, Wang X C. Analysis of volatile flavor components of scallion by headspace solid phase micro-extraction and GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 23(3): 69-71.

[29] 马 威, 张介眉, 涂 欣, 等. 葱与土壤元素含量相关性研究 [J]. 湖北中医杂志, 2010, 32(5): 77-78.

Ma W, Zhang J M, Tu X, et al. Study on elements content correlation between soil and *Allium fistulosum* L. [J]. Journal of hubei Chinese medicine, 2010, 32(5): 77-78.