

绿量快速测算模式

周一凡¹,周坚华²

(1. 北京大学数学科学学院,北京 100871; 2. 华东师范大学资源与环境学院,上海 200062)

摘要:着重讨论绿量快速测算方法中的原始数据自动采集问题。这里以原 LVV 基本测算模型的分树种径-高方程(D-H Eqs)为基础,通过加权归纳和系统误差调整,给出了测算精度较好的模糊径-高相关方程(G. D-H Eq),LVV 测算误差与原基本模型相比仅低 7.6%;通过树冠信息提取、噪声去除和边界跟踪等技术,给出了树冠边界周长面积比与冠径的相关方程(P/A-D Eq),并由实验证明了树冠的周长面积比(P/A)对冠径变化敏感,冠径自动提取和计算误差约为 10%。该研究不仅改变了原来 LVV 遥感测算模式中多数原始数据必须通过人工判读量算的现状,也实现了 LVV 数据更新的自动化。

关键词:城市植物群;绿量快速测算;遥感

文章编号:1000-0933(2006)12-4204-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Fast method to detect and calculate LVV

ZHOU Yi-Fan¹, ZHOU Jian-Hua² (1. College of Mathematic Science, Peking University, Beijing 100871, China; 2. College of Resources and Environment, East China Normal University, Shanghai 200062, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4204 ~ 4211.

Abstract: Analyzing the reciprocity among many factors in an urban ecosystem requires an effective methodology to collect information regarding both the amount as well as the vertical structure of urban vegetation community. It is the precondition to defining a suitable descriptor to depict the plant's detail vertical structure and to be used in a broad-scale detection with such fast detecting technique as remote sensing. The descriptor, living vegetation volume (hereafter refer to as LVV) was designed for both requirements.

LVV, a 3D descriptor of urban vegetation community, refers to the volume of the space occupied by the crown of a plant. The generally used items are the sum of LVV with the unit of m^3 , the summation of LVV all around a certain area, and the relative LVV with the unit of m^3/m^2 , the ratio of LVV to the land area in the same plot. The main reason to take the LVV as a descriptor of urban vegetation community is that the crown plays an important role in ecology and is responsible for the majority of material and energy exchanges with the atmosphere.

This study suggests two methods of getting LVV, one is the basic the other fast. The basic one is semiautomatic based on computer-aided interpretation and simulating calculation. The principal are the plant canopy diameter-height equations (refer to as D-H Eqs) and the mean error of algebra sum is only 1.31% when calculating canopy height by D-H Eqs. Then a fast method for renewing LVV data was developed in the consideration that a renewal can be taken by a simpler and quicker way after the accurate database was established. The principal are the general D-H Eqs (refer to as G. D-H Eqs) and the correlating equation between the ratio of perimeter to area (P/A) and the canopy diameter (refer to as P/A-D Eq). With the use of the fast method, every step for getting LVV can be processed by computer automatically. The trees, shrubs, lawns can be classified without intervention; the species of trees will be either provided by the existing database for the stable green lands or treated as the general species whose

基金项目:上海市科技发展基金资助项目(972312018)

收稿日期:2005-08-01; **修订日期:**2006-05-10

作者简介:周一凡(1985~),男,上海人,主要从事图像工程、遥感和城市生态系统研究。E-mail: Joeevan@163.com

Foundation item: The project was financially supported by the Science Foundation of Shanghai (No. 972312018)

Received date: 2005-08-01; **Accepted date:** 2006-05-10

Biography: ZHOU Yi-Fan, mainly engaged in fields of image engineering, remote sensing and urban ecosystem. E-mail: Joeevan@163.com

height will be simulated by one of the G-D-H Eqs for those green land with no record in the database. And by some classifying and tracing algorithms as well as the P/A-D Eq, the canopy diameter, another indispensable parameter for getting LVV, could be obtained with a veracity as high as near 90%.

The main objective of this study is to develop effective methods for getting LVV for a broad urban area especially to develop a fast method to meet the requirement of renewing the LVV database periodically.

Key words: urban vegetation community; living vegetation volume; remote sensing

为了研究城市生态系统中诸因子间的相互作用,需要对城市绿化的数量和结构进行准确定量研究,它要求一种能描述植物空间结构的新指标;另外为了使数据更新跟上城市快速发展的需要,又要求这种指标能以遥感技术快速大面积测算。城市“绿化三维量(living vegetation volume,简称“绿量”,LVV)”就是作者及其研究小组为满足这些要求而提出^[1]。LVV指绿化植物茎叶所占空间的体积,它是城市绿化指标体系的第一个立体指标。据报道,成龄乔木林的吸碳产氧量相当于同面积草坪的3到5倍。所以LVV在研究绿化布局、数量及其与大气环境的相关关系方面具有重要意义。

目前国内外以遥感技术对植物非平面指标的研究,主要涉及森林蓄积量调查和林木垂直结构研究等方面。如国内有报道以遥感与GIS技术结合分析植物群落分布^[2],以高分辨率遥感图像提取树冠信息^[3],以遥感数据结合实地踏勘调查林木结构^[4]等。国外的项目有两个大类比较引人注目:(1)通过雷达图像(SAR、SIR、Lidar等)记录的林木冠顶起伏特征来研究林木的垂直结构。包括根据统计相关性提取地面生物量^[5]和森林蓄积量^[6]。(2)基于单植株的精确探测。多数研究认为,细分到单植株有助于分析林木垂直结构和提高森林分类精度^[7,8]。但以雷达图像研究森林垂直结构,目前只能区分原生林和次生林等森林大类^[5,6,9];对雷达后向散射与地面生物量关系的研究只适合于低生物量水平的森林。对于获取单植株边界的研究刚刚起步不久,从最初的由高反射区识别树冠中心^[10]到后来的树冠边界绘图,证明了基于单植株的遥感分析对植物垂直结构的精细研究具有重要意义^[7,8,11]。但目前这些研究还集中在林木类型较单一的试验区。另外,由于对植被垂直结构的研究还处于试验阶段,所以在森林生物量等特征与大气环境的相关研究方面,能搜索到的外国文献很有限^[12]。

与森林相比,城市绿化的类型更加复杂,不仅树种多样、结构多变、种植不规则、零散分布,和具有人工修剪与植物自然生长相结合的特点;并且常常埋藏于建筑物之间,信息提取比较困难。要对城市绿化的数量和结构进行准确的定量研究,必须使用更精细和特殊的方法测算数量和描述空间结构。在作者及其研究小组对LVV的长期研究和测算实践中,一直采用“分树种LVV遥感测算模式”(基本模式)来逐株测算LVV。它以分树种的D-H Eqs模拟计算树高,和根据树种选配几何体来计算LVV。根据实地测量和精度分析,以这种方法测算LVV的代数和平均相对误差仅为1.31%^[1]。

但该基本模式只是一个半自动模式,它的一些原始数据(比如树种、冠径等)必须由人工判读获得。这种采集工作耗时繁琐枯燥,它与后期的计算机模拟计算形成鲜明的耗时反差。以上海市建成区为例,一个5~6人的工作小组约需6~8个月才能完成遥感图像判读和原始数据采集工作,而同样范围的计算机LVV模拟计算,在普通配置的个人电脑上,只需要约1min时间。要使LVV成为一个可推广的绿化定量指标,必须解决模拟计算自动化与原始数据采集人工化的矛盾,以实现LVV测算的总体自动化。

植物因富含叶绿素,在近红外波段有远高于大多数地物类型的反射率,利用该波段获取的遥感数据提取植被覆盖范围信息的技术已经相当成熟。但树种和冠径这两个关键数据一直以来必须通过人工判读、量算获取,它们成为LVV自动测算的瓶颈。在本研究中,作者试图打通这个瓶颈,使所有原始数据采集逐步自动化。

1 研究与试验

考虑到当基于绿量基本测算模式建立了基础数据库后,在LVV数据更新中可以采用较快速和简化的测算模式。这里把改进后的LVV测算模式称为快速模式,目前该快速模式已经可以用于LVV数据库更新等方

面。图 1 对基本和快速模式的技术流程进行了比较。

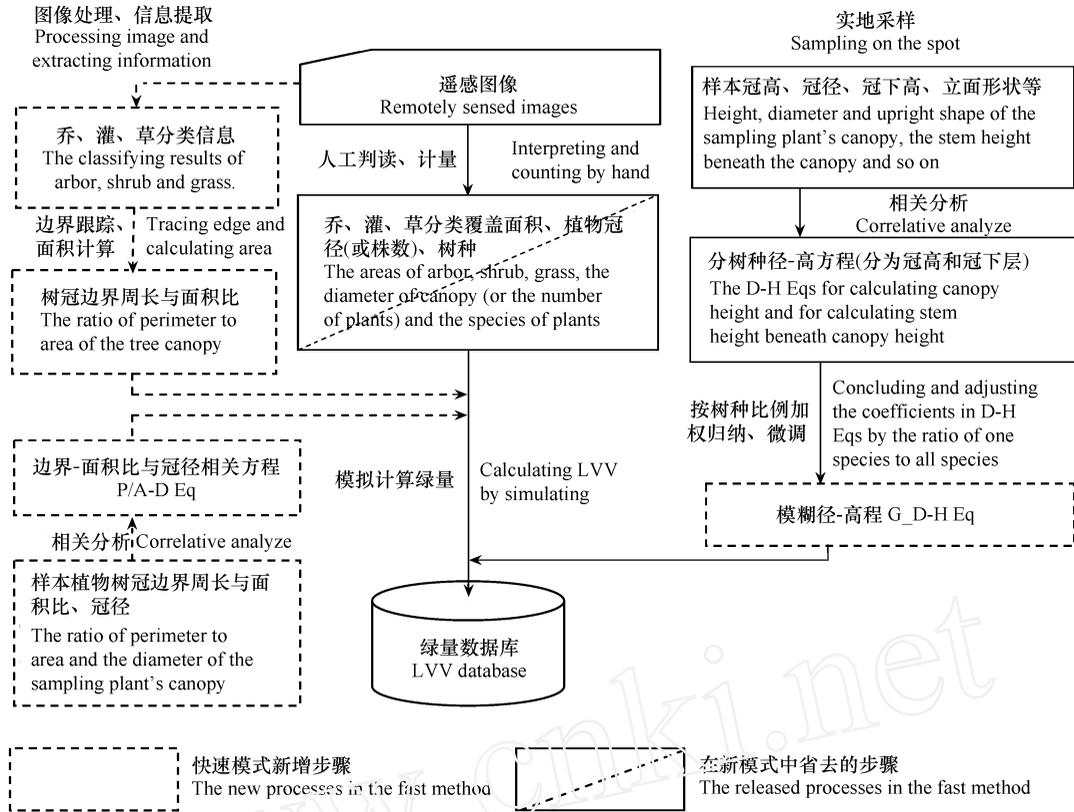


图 1 快速模式与基本模式的技术流程比较

Fig. 1 Comparing technical frames of getting LVV by the fast mode with by the basic mode

以上海市为例,主要讨论快速模式中的两个新技术:以加权归纳法模糊树种和通过提取图斑边界特征计算冠径。

1.1 树种模糊化

在基本模式中,由分树种 D-H Eqs 模拟计算冠高,然后选配几何体计算树冠 LVV。D-H Eqs 的基本形式出自一元回归中常用的“逻辑斯蒂曲线”,并作了一些修正:

$$y = 1 / (a + be^{-cx}) \quad (1)$$

式中, x 为树冠直径; y 为冠高; b 为回归系数; a, c 为系数。

其中 c 是作者为了增加曲线斜率的可调性而增加的系数。根据该方程,曾对上海市的 27 个主要绿化树种分为冠高和冠下高建立了 50 个 D-H Eqs,冠下的方程用于计算复层绿地中树冠下灌木的 LVV。

为了免除树种判读,快速模式在原有分树种 D-H Eqs 的基础上,使用加权归纳法给出模糊径-高方程(G_D-H Eq)。该 G_D-H Eq 在现阶段可以直接用于 LVV 数据更新;未来,随着较好的树种自动提取算法的产生,仍可用于部分难识别树种的 LVV 测算。

树种模糊化使误差不可避免,但通过加权归纳和误差调整,可以减少区域 LVV 计算误差,直至小到一个合理的、可以接受的范围内,这便是树种模糊化的基本思想。

初步 G_D-H Eq 是根据某树种在植株总数中所占比例越大权越大的原则筛选出来的。树种比例数据可以根据现有分树种 LVV 数据库统计得到。图 2、图 3 为与基本模式中 D-H Eqs 对应的径-高曲线,不同曲线表达各树种在植株总数中所占的比例,4 种形式的曲线分别表示比例 30%、10%、3%和 <3% 的树种,黑色粗线为筛选出的“初步模糊径-高曲线”,对应的方程为初步 G_D-H Eq:

$$y = 1/(0.083784 + 1.835642e^{-0.55x}) \quad (\text{用于冠高计算}) \quad (2)$$

$$y = 1/(0.162732 + 0.900612e^{-0.26x}) \quad (\text{用于冠下高计算}) \quad (3)$$

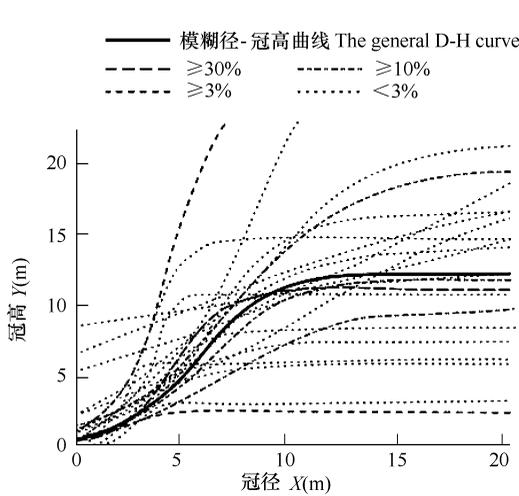


图2 乔木及单株大灌木的冠径-冠高曲线

Fig.2 The diameter-height curves for calculating canopy height

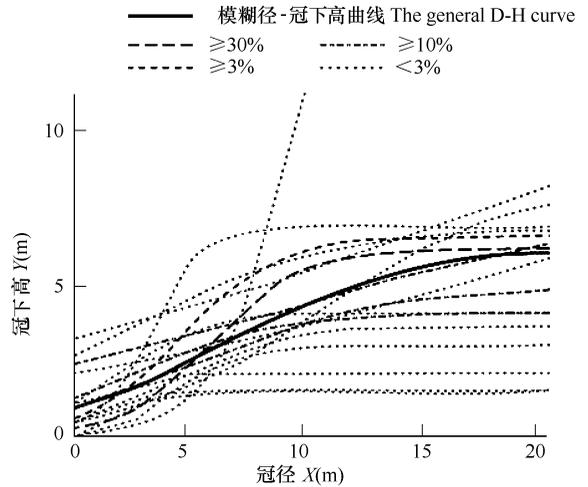


图3 乔木及单株大灌木的冠径-冠下高曲线

Fig.3 The diameter-height curves for calculating stem height beneath canopy

然后在(2,3)式的基础上,采用10km²样本区的数据进行方程系数微调。微调的目标一是使正负误差平衡,二是要降低大误差的频数,三是要降低大冠径(x值较高)处的误差频数。调整后的G-D-H Eq为:

$$y = 1/(0.099978 + 1.965642e^{-0.60x}) \quad (\text{用于冠高计算}) \quad (4)$$

$$y = 1/(0.162732 + 0.900612e^{-0.30x}) \quad (\text{用于冠下高计算}) \quad (5)$$

1.2 冠径信息提取

树冠边界特征提取与冠径计算是实现LVV计算原始数据采集自动化的另一个关键点。冠径信息,不仅可以用于冠高的模拟计算,还可以与覆盖面积结合求取植株数。

冠径可能与树冠的边界特征如形态变化和尺度变化等有关,并曾经尝试使用分形理论来描述边界的形态变化。但试验证明植冠边界的分维值与冠径之间不存在相关性。对于提取冠径信息而言,边界的尺度变化特征更为重要。试验也证明以边界与所围图形面积的关系来描述边界尺度的变化特征,对于冠径信息提取非常有效。

1.2.1 获得乔灌木分布二值图和树冠边界特征提取 乔灌木分布二值图主要根据归一化植被指数(NDVI)和其他分光谱特征提取信息制作。并通过限制近红外波段的反射值来去除阴影,以改善因阴影造成的植株图斑粘连现象和最大限度地分隔树冠。

根据该二值图,采用一些现有的跟踪算法^[15~17]可以获得乔灌木树冠的边界。本文选用文献^[15]所介绍的跟踪算法作为树冠边界提取的第一步,该算法采用2×2窗口跟踪,能将连通区的所有边界(包括内部空洞的边界)全部提取出来。为了获得对提取植物冠径信息有意义的边界,作者对该算法进行了3点主要改进:

(1)改进A 跟踪前以 Sobel 算子去除杂点和凹陷 为了减少边界跟踪的运算量,可以先去除没有意义的杂点和凹陷。通过排列 Sobel 算子对所有元素(边、角、点)在不同位置和方向时卷积,认定有且只有不多于两个像素的杂点或凹陷满足: $R|xy| \geq 2$,可以据此条件去除这类杂点和凹陷。

具体步骤是对全图像以 Sobel 算子求卷积,对符合 $R|xy| \geq 2$ 的像素 1、0 互置。

(2)改进B 在跟踪过程中形成链码 为了获得边界链码,在跟踪过程中,直接将当前窗口前进方向对应

$R|xy| = |R_x| + |R_y|$,其中 R_x 、 R_y 分别为以 S_x 和 S_y 对图像的卷积。

的 4-链码记录于 2 × 2 窗口的左上像素。并在交叉点处采用“同点双层记码”法,即以十位表示前码,而以个位表示后码。而保证前后两个链路的连通性。

为了消除斜边链码表达上的“阶梯”现象,减少链码冗余,先直接将 4-码记为 8、2、4、6。然后按照图 4 对 4 种阶梯状斜边链码进行变换,而形成伪 8-链码。

(3) 改进 C 据链码去除噪声和修复链路

噪声去除主要指去除小半径孤岛和凹陷,以及单线像素。图像中的单线像素在树冠边界表达中没有意义,它或表现为孤立线条,或为图形边界上的毛刺,或起到连接两个图形的作用,所以这里将单线也作为噪声去除。根据链码很容易识别单线,因为它两边的 8-链码值总是相差 4。在去除单线的同时要修复链路以便在后面的边界补偿中继续使用。

图 5 比较了提取的原始树冠边界和按照上述除噪声算法去除噪声之后的效果。

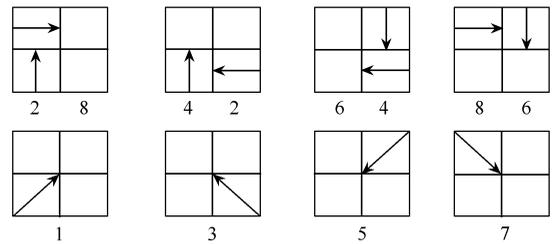


图 4 斜边链码变换

Fig. 4 Commutation of chain code in the bevel edges

the upper show original codes and the lower show commutated codes

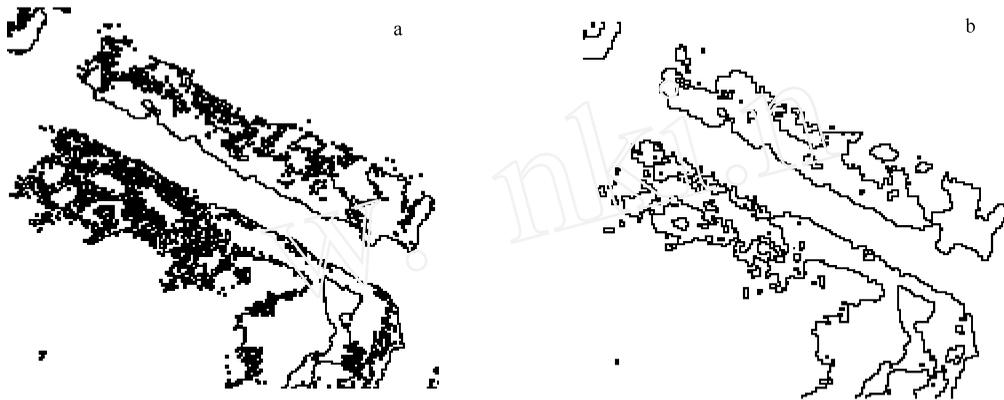


图 5 去除噪声

Fig. 5 Removing noise

a 为原图 ,b 为操作后的图 the a and the b shows canopy boundaries before and after removing noises respectively

1.2.2 边界-面积比 (P/A) 与冠径 (D) 的相关分析 样本选择时,为了代表不同大小、类型的植物,选择了平均冠径从 1.57 ~ 11.18m 的各类样本 38 个。

根据前述的边界跟踪算法,可以得到树冠边界和计算每个样本的 P/A。这里值得一提的是“周长补偿”。尽管已经在形成二值图时消除了大部分树冠阴影的影响,但有些密栽植株的边界仍然难以分开。为此,当一个图斑的周长达到阈值,并且其链码特性指示的纵横比也达到阈值时,就按如下公式进行周长补偿:

$$\text{补偿值} = \text{图斑纵向跨度} \times (\text{纵横比} - 1) \times 2$$

经过补偿,此类样本的冠径计算误差平均减少大于 20%。

P/A 与 D 的相关分析情况如图 6 所示。以对数曲线能够较好地描绘其间的相关关系,而有周长面积比 x 与冠径 y 之间的相关方程 (P/A-D Eq) 如下:

$$y = - 4.4878 \ln(x) + 0.1563 \tag{6}$$

该方程的 R^2 为 0.8293,是相应样本数在 99%置信度下限值的 4.86 倍(限值为 0.1706)^[18]。它从一个角度证明了周长面积比 x 与冠径 y 具有很好的相关性。在 LVV 自动测算中,可以通过计算机跟踪获得树冠边界和计算 x,然后以方程 6 计算冠径 y,进而获得 LVV。本文的试验表明这种方法不仅可行,其精度也是值得信赖的。

2 结果与分析

G. D-H Eq 和 P/A-D Eq 是本研究的主要研究成果,也是实现原始数据采集和 LVV 自动测算的关键。下面分析该二方程的可靠性,以及检验周长面积比与冠径的非线性关系。

2.1 以模糊径-高方程计算 LVV 的精度检验

G. D-H Eq 系通过加权归纳和系统误差调整两个主要步骤获得。为了确定系统误差微调理论的有效性,以及由 G. D-H Eq 计算 LVV 的可靠程度,作者在 2000 年上海市 LVV 数据库中随机抽取了 24 个数据库文件作为精度分析样区。每个数据库文件对应的实地面积为 1 km²。这里以微调前后的 G. D-H Eq 分别计算 LVV,并与基本模式的计算值相比较。

图 7 显示了各样本 LVV 计算相对误差的分布情况。由图可见:微调前计算的 LVV 偏大,正误差出现几率高,正误差约为负误差的 4.8 倍,平均相对误差为 12.5%;而微调后计算的 LVV 正负误差分布均衡,平均相对误差也下降到 7.6%。在这个精度检验中,所有冠高均由 G. D-H Eq 计算;实际在 LVV 数据更新时,总有相当数量的稳定绿地树种是已知的,所以用该快速模式更新 LVV 数据库,其误差一般不会高于 7.6%。

2.2 周长面积比与冠径相关方程的精度检验

在本研究中,采用周长面积比 P/A 作为冠径计算的原始数据,并通过该比值与冠径的统计相关关系 P/A-D Eq 和相应的补偿修正算法来求取冠径。为了检验 P/A-D Eq (即方程 6)用于实际冠径提取的精度,作者以前述树冠边界跟踪算法和方程 6 计算了 2000 年上海市 LVV 数据库中 3 km² 的冠径数据,并以原采样栅格(每个栅格对应的实地面积为 50 × 50m²)为单位,逐格与原有人工量算冠径相对照,数据列于表 1。由表可见,各区域样本的平均误差比较稳定,冠径实际测算精度接近 90%,它说明用该方程和相应的测算方法提取乔灌木冠径是基本可行的。

2.3 周长面积比与冠径非线性关系的实例检验

图 6 显示,植物冠径与相应的周长面积比之间存在很好的相关性,并显示二者之间的关系是非线性的。即 P/A(图中的 x)有一个变化值时,在 P/A 的低值端,比在高值端对应于一个较大的冠径差。下面通过随机抽取的样本来检验这种非线性关系的普遍适用性。图 8 和表 2 显示不同树冠尺寸的边界跟踪情况和相应的计算数据。由表 2 可知,当 P/A 的相对变化值接近时,在 P/A 较低值端的相对变化值 0.2159 对应于一个较大的冠径差 3.75;而在 P/A 的较高值端的相对变化值 0.2513 对应于一个较小的冠径差 2.88。它提供了周长面积比与冠径非线性关系的一个实例。

3 讨论和结论

本文研究了 LVV 的快速测算模式。作为对基础模式的补充,快速模式主要用于 LVV 数据的更新和复测。

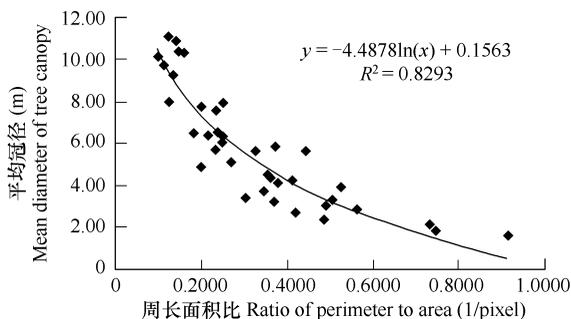


图 6 周长面积比与平均冠径的相关性

Fig.6 The correlation between the ratio of perimeter to area and average diameter of tree canopy

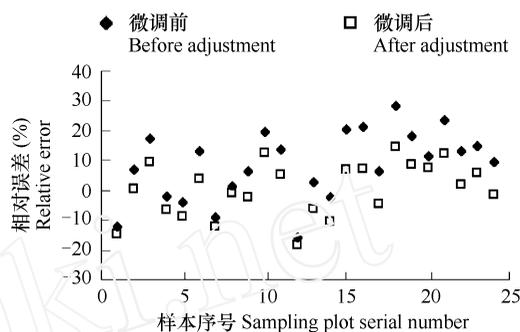


图 7 微调前后的模糊 D-H Eq 测算的精度比较

Fig.7 Comparing the precisions of getting VQ by general D-H Eqs both before and after adjustment

表 1 周长面积比与冠径相关方程的精度检验

Table 1 Checking the precision of calculating canopy diameter with P/A-H Eq

文件 File	有效样本数 Number of valid samples	平均相对误差 Average relative difference	中误差(m) Mean error
23	361	10.6045 %	0.5461
24	388	10.3917 %	0.4639
33	392	10.4562 %	0.4690

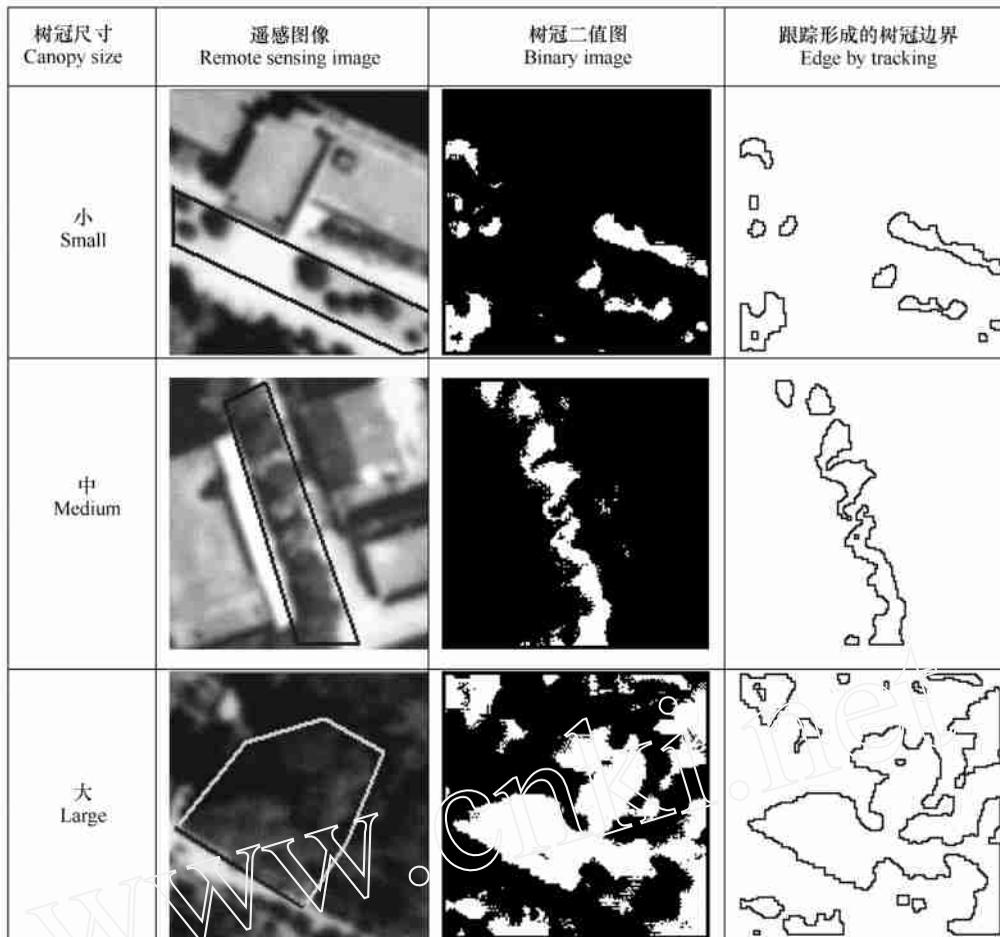


图 8 不同树冠尺寸的边界跟踪情况

Fig. 8 The tracked edges corresponding to different canopy sizes

表 2 冠径变化对树冠周长面积比的影响

Table 2 The effect of diameter change to the ratio of perimeter to area of tree canopy

树冠尺寸 Canopy size	冠径 Diameter			面积 Area A (pixel)	周长 Perimeter P (pixel)	周长面积比 P/A	
	像元数 Pixel	长度 (m) Meter	相对变化 Difference			P/A (1/pixel)	相对变化 Difference
小 Small	9.5	2.71	2.88	494	296	0.5992	0.2513
中 Medium	19.0	5.59		1558	542	0.3479	
大 Large	32.7	9.34	3.75	3894	514	0.1320	0.2159

使用快速模式从原始数据采集到 LVV 的模拟计算可以全部自动化。通过研究给出了测算精度较好的模糊径-高方程 (G. D-H Eq) ;给出了树冠边界面积比与冠径的相关方程 (P/A-D Eq) ;在地物边界跟踪、形成链码和边界整理等算法的设计上具有新颖性;设计了 LVV 自动测算的算法和开发出了相应的软件模块。

一般情况下,对于首次测算 LVV 的城市,可以使用基本模式建立 LVV 数据库;然后用快速模式来实现 LVV 的自动复测和更新数据库。复测时,对于稳定绿地,可采用原有人工判读的树种信息,对于尚无数据的新建绿地可采用 G. D-H Eq 计算树高和最后获得 LVV。而冠径则可以全部由前述树冠边界跟踪算法和方程 6 计算获得。

与基本模式相比,快速模式的主要问题是精度较低(区域 LVV 和的相对误差约为 7.6%) ,而且要求事先知道所有骨干树种在植株总数中的比例。目前尚在进行中的 LVV 自动测算模式研究将逐步解决这些问题。

自动测算模式主要研究计算机树种自动识别,考虑通过树冠纹理特征、树冠边界形状特征的识别分类,结合原有的光谱特征等,开发合用的树种分类器,以减少树种模糊化带来的精度损失;在未来,G-D-H Eq(方程 6) 仅用于一些非骨干树种、难识别树种和多树种混栽情况的树高计算。

已经完成的绿量遥感测算基本模式、快速模式,以及尚在研究中的自动模式,逐步提高着绿量测算的可操作性和快捷性。绿量测算方法的不断完善,为城市绿化植物群与大气环境交流作用的理论研究奠定了基础,并将逐步形成一个快速、动态、允许由非遥感专业人员更新和操作的、以绿量为基础的城市绿化管理和相关研究体系。

References :

- [1] Zhou J H. Study on the indexes of urban plant community. *Journal of Chinese Landscape Architecture* , 1998 ,14(59) :61 ~ 63.
- [2] Guan Z Q, Li Deren. Remote sense imagery for the analysis of integrated community unit. *Remote Sensing for Land & Resources* , 1997 ,1 :44 ~ 52.
- [3] Qin X L, Li Z Y, Yi H R. Extraction method of tree crown using high-resolution satellite image. *Remote Sensing Technology and Application* , 2005 ,20(2) : 228 ~ 232.
- [4] Li H, Lu X X, Chen S J , *et al.* Dynamic analysis and evaluation of Xinjiang forest resources : based on remote sensing and GIS. *Acta Geographica Sinica* , 2003 ,1 :133 ~ 138.
- [5] Joao R Santos , Corina C Freitas , Lucian S Araujo , *et al.* Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* ,2003 ,87 :482 ~ 493.
- [6] Thierry Castel , Francisco Guerra , Yves Caraglio , *et al.* Retrieval biomass of a large Venezuelan pine plantation using JERS-1 SAR data. *Analysis of forest structure impact on radar signature. Remote Sensing of Environment* , 2002 ,79 :30 ~ 41.
- [7] Tomas Brandtberg , Timothy A Warner , Rick E Landenberger , *et al.* Detection and analysis of individual leaf-off tree canopies in small footprint , high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* ,2003 ,85 :290 ~ 303.
- [8] Donald G Leckie , Francois A Gougeon , Nicholas Walsworth , *et al.* Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree canopy analysis. *Remote Sensing of Environment* ,2003 ,85 :355 ~ 369.
- [9] Daniel A Zmble , David L Evans , George C Carlson , *et al.* Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne Lidar. *Remote Sensing of Environment* ,2003 ,87 :171 ~ 182.
- [10] D A Poulit , D J King , F W Bell , *et al.* Automated tree canopy detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment* ,2002 , 82 :322 ~ 334.
- [11] MJ Aitkenhead , MJ Mustard , AJ S McDonald. Using neural networks to predict spatial structure in ecological system. *Ecological Modelling* ,2004 ,179 :393 ~ 403.
- [12] Geoffrey G Parker , Mark E Harmon , Michael A Lefsky , *et al.* Three-dimensional Structure of an Old-growth Pseudotsuga-Tsuga Canopy and Its Implications for Radiation Balance , Microclimate and Gas Exchange. *Ecosystems* , 2004 ,7(5) : 440 ~ 453.
- [13] Christoph B Puhr , Daniel N M Donoghue , Nicholas J Cox. Logit modelling to map canopy closure in conifer plantations : a case study using landsat TM data from S. W. Scotland. *Remote Sensing Society Observations & Internations. New York: The Remote Sensing Society* ,1997. 171 ~ 176.
- [14] Zhang L P , Zheng L F , Tong Q X , *et al.* The estimations of biologic variable through hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing* , 1997 ,1(2) :111 ~ 114.
- [15] Wu Y L , Fei X D , Jing R J. A method for fast binary image boundary following and its hardware implementation. *Journal of China Institute of Communications* , 1997 ,18(5) .
- [16] Yu D G , Dai Y F. A hierarchical representation for object recognition. *Journal of Image and Graphics* , 1997 ,2(7) : 41 ~ 42.
- [17] Cui F K , Zhang F S , Bai L , *et al.* Using neighborhood points to trace edge of object. *Journal of Luoyang Institute of Technology* ,1997 ,22(1) : 28 ~ 34.
- [18] The editing board of mathematics handbook. *Mathematics Handbook*. Beijing : People Education Publishing Company , 1979. 837 ~ 838.

参考文献 :

- [1] 周坚华. 城市生存环境绿色量值群的研究. *中国园林* ,1998 ,14(59) :61 ~ 63.
- [2] 关泽群,李德仁.应用遥感图像分析植物群落的分布图式. *国土资源遥感* ,1997 ,01 :44 ~ 52.
- [3] 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. *遥感技术与应用* , 2005 ,20(2) :228 ~ 232.
- [4] 李虎,吕巡贤,陈蜀江,等.新疆森林资源动态分析——基于 RS 与 GIS 的森林资源动态研究. *地理学报* ,2003 ,1 :133 ~ 138.
- [14] 张良培,郑兰芬,童庆喜,等.利用高光谱对生物变量进行估计. *遥感学报* ,1997 ,1(2) :111 ~ 114.
- [15] 吴宇岚,费旭东,荆仁杰.边界的快速跟踪算法和硬件实现. *通信学报* , 1997 ,18(5) .
- [16] 于东刚,洪彦:二值图像边界平滑跟踪的一个算法. *中国图像图形学报* , 1997 ,2(7) : 41 ~ 42.
- [17] 崔凤魁,张丰收,白露,等.二值图像目标邻域点法边界跟踪算法. *洛阳工学院学报* ,197 ,22(1) : 28 ~ 34.
- [18] 数学手册编写组:数学手册.北京:人民教育出版社,1979. 837 ~ 838.