

基于遥感影像的城市空间三维绿量 (绿化三维量)定量研究

周廷刚¹, 罗红霞¹, 郭达志²

(1. 西南师范大学资源环境科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 中国矿业大学测绘与空间信息工程研究所, 徐州 221008)

摘要:三维绿量又称绿化三维量,是指所有生长植物的茎叶所占据的空间体积。城市三维绿量的测量研究是城市绿化环境效益评价的基本前提,也是城市生态系统研究的重要内容之一。以红外航空遥感图像为主要信息源,研究了城市空间三维绿量定量计算的方法。在对植被遥感阴影图像分割的前提下,根据航空摄影时太阳、摄影机以及树木三者之间的几何位置关系,建立了空间三维绿量遥感中关键的植被高度模型。应用统计分析方法,建立了研究区主要树种的树高-冠径相关关系模型。根据冠径-冠高关系以及典型树种的树冠立体几何形态与绿量方程,运用 GIS 分别计算了浙江省宁波市江北区、江东区、海曙区和全市的总三维绿量和平均相对三维绿量,以及平均相对三维绿量的区域分布。宁波市全市及江北区、海曙区和江东区的平均相对三维绿量分别为 $3284.4\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、 $3652.4\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、 $2908.5\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $3229.7\text{ m}^3/\text{hm}^2$,总三维绿量分别为 1606.6 万 m^3 、 659.5 万 m^3 、 448.9 万 m^3 和 498.2 万 m^3 。研究结果不仅为城市绿化数据库的建立奠定了基础,而且还丰富了城市绿化评价指标,有助于估算城市绿化的生态环境效益,以及为城市绿化系统的设计,特别是为环境要求不同的功能区的绿化系统的设计、城市绿化群落布局的合理性评价和城市绿化规划提供有价值的技术参数。

关键词:空间三维绿量;定量计算;遥感影像;绿量模型;城市

Remote sensing image-based quantitative study on urban spatial 3D Green Quantity Virescence three-dimension quantity

ZHOU Ting-Gang, LUO Hong-Xia, GUO Da-Zhi (1. School of the Environment and Resources, Southwest China Normal University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China; 2. The Institute of Survey and Spatial Information Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 415~420.

Abstract: Three-dimension green quantity, also named virescence three-dimension quantity, refers to the spatial volume formed by stem and leaf of a plant. The study of the measurement for three-dimension green quantity is a basis precondition for the estimation of virescence urban environmental benefit, and also is an important part for urban ecosystem study. The present paper purports to take the color infrared aerial remote sensing image as its main research data. The basic method of quantitative remote sensing is investigated for urban spatial 3D green quantity. Firstly, the image's shadow of a plant is segmented. Secondly, the height model of a tree is established in accordance with the relationship of the sun, the camera and the tree in aerial remote sensing, which is a key model in spatial 3D green quantity. Thirdly, the model of relationship a tree's height and diameter for the crown of a tree, and the model of the relationship between diameter and height for the crown of a

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59478013);西南师范大学自然科学基金及自然地理学博士学科基金

收稿日期:2003-05-09;**修订日期:**2004-06-10

作者简介:周廷刚(1971~),男,四川省南部县人,博士,副教授,主要从事遥感与地理信息系统及其应用、城市生态环境研究。E-mail: zhoutg@swnu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 59478013); Nature Science and Physical Geography Doctor Discipline Foundation of Southwest Normal University

Received date: 2003-05-09; **Accepted date:** 2004-06-10

Biography: ZHOU Ting-Gang, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in the application of remote sensing & GIS and urban ecological environment studying. E-mail: zhoutg@sswnu.edu.cn

tree, are established by the statistic method, as correlativity of height with diameter for the crown of a tree exists specifically for the species of a plant. Fourthly, the stereoscopic geometry form and green quantity equation are established based on the study of the stereoscopic geometry form for typical species of a tree. Finally, the total 3D green quantity, the average relative 3D green quantity and its distribution are calculated GIS-based. The value of average relatively 3D green quantity is $3284.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, $3652.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, $2908.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ and $3229.7 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, and the value of total 3D green quantity is $1606.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, $659.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, $448.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ and $498.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ in Ningbo city, Jiangbei district, Jiangdong district and Haishu district of Ningbo City.

The results indicate that there is correlativity between the average relative 3D green quantity and the rate of green overlay in these regions. The average relative 3D green quantity will be large, if there is a big coverage rate of green overlay in a particular area. But the linear correlativity dose not exist among them, for the factors, which affect the average relative 3D green quantity include not only the coverage rate of green overlay, but also the structure of virescence and growth state of plant.

The method not only is important for the establishment of a city's green database, but also provides an important index for the evaluation of urban green area and is useful for studying of the green environmental benefit. At the same time, the findings of the study will also provide useful parameters for the design of green systems, especially to design for regions with special demands of green regions, and rationality for urban green community distribution and urban green planning.

Key words: Spatial 3D Green Quantity; quantitative calculation; remote sensing image; green quantity model; urban

文章编号:1000-0933(2005)03-0415-06 中图分类号:Q143 文献标识码:A

三维绿量又称绿化三维量,是指所有生长植物的茎叶所占据的空间体积^[1]。城市空间三维绿量的测量研究是城市绿化环境效益定量评价的基本前提^[2],也是城市生态系统研究的重要内容之一^[3]。由于城市绿化具有分布零散、结构多样等特点,其数量难以估计^[4],因此,常规的评价计算方法无法满足这方面的要求。遥感技术是在 20 世纪 60 年代发展起来的对地综合探测技术,现已广泛应用于生态环境评价、生物变量估算、生物参数计算等研究^[5~10]。特别是最近几年来,随着空间分辨率优于 1m 的卫星遥感资料的应用,极大地提高了生态研究的精度^[11],且更涉及到城市生态系统的应用研究^[12]。城市空间三维绿量定量研究的前提是对三维绿量进行定量测量。测量模式总体上有两大类,其一是“立体摄影测量”方法,即由相邻两航片的左右视差确定植被高度,在航片上测出该植被的面积,并判断出植被的类型,根据一定的绿量计算经验公式计算三维绿量值;其二是“平面量模拟立体量”的方法^[4],即对于某一特定的树种而言,利用冠径与冠高之间具有的某种统计相关关系,通过回归分析建立相关方程,根据航空像片上量得的冠径求取冠高,最后求得树冠的体积(树冠绿量)。平面量模拟立体量的方法以计算机的模拟计算代替复杂的人工立体量测,节省了大量的人力物力,并有助于绿量数据库的建立和数据的存储、管理和应用^[4]。同时,该方法计算的绿量比常规立体摄影测量的精度可以提高 1 倍以上,避免了因城市绿化植物高差较小,使用立体摄影测量法测量相对误差较大的弊病。以平面量模拟立体量的方法,其冠径是通过人工在航空像片上测量而得,工作强度和精度在很大程度上受到限制。我们的研究表明,利用植被特别是乔木所形成的阴影求出树木的高度,从树高反推冠径,是一种行之有效的方法,并在浙江省城市绿化航空遥感调查项目中的专题研究部分得到了实际应用。

1 树木高度模型的建立

在城市空间三维绿量的定量研究中,对树木的高度进行计算机识别是需要首先解决的问题。目标物在太阳光的照射下形成的阴影是遥感图像的重要特征之一,它们在彩红外图像中反射率较低,容易识别。阴影包含丰富的目标物三维信息,是目标物参数研究的重要标志性内容之一^[13],其中,阴影的投影长度被广泛应用于目标物的高度研究^[14,15]。在知道太阳和摄像机的几何方位关系之后,建立阴影的长度与植被的相关关系是比较容易的。而研究阴影的前提是选取恰当的阈值,从图像中分割出阴影信息。因此,利用阴影来计算树木高度主要包括两部分内容,一是为阴影分割优选阈值;二是阴影分割,利用太阳-摄像机-阴影之间的几何关系计算树木高度。

1.1 树木高度计算的原理

在进行航空摄影时,太阳、摄像机与树木三者之间具有一定的几何位置关系(图 1)。研究阴影长度与树木高度之间的关系,首先有几点假设:①树木是直立的,即树木垂直于所在地表面;②阴影直接投影在地面上;③阴影从树干所在位置开始;④太阳和摄像机在树木的同一侧。

从图 1 可知,阴影的长度 S_{sun} 与太阳的高度角 θ_{sun} 之间的关系为:

$$S_{\text{sun}} = h / \tan(\theta_{\text{sun}}) \quad (1)$$

在摄像机视场内,树木本身障碍所形成的本影长度为:

$$S_{sa} = hd/(H - h) \tag{2}$$

由于 $h \ll H$, 因而式(2)可改写为:

$$S_{sa} \approx hd/H \tag{3}$$

树木本影所遮挡的阴影长度 S_{sun} 为:

$$S_{sun} = S_{sa} \cdot \cos\theta \tag{4}$$

而在摄像机视场内的阴影长度 S 为:

$$S = S_{sun} - S_{sa} = h/\text{tg}(\theta_{sun}) - hd \cdot \cos\theta/H \tag{5}$$

所以:

$$h = \frac{SH \cdot \text{tg}(\theta_{sun})}{H - d\cos\theta \cdot \text{tg}(\theta_{sun})} \tag{6}$$

从(6)式可知,当树木、太阳和摄像机处于同一垂直面内时,

$\theta=0, h = \frac{SH \cdot \text{tg}(\theta_{sun})}{H-d \cdot \text{tg}(\theta_{sun})}$; 当太阳和摄像机分别在树木两侧时, $S = S_{sun}$, 则 $h = S_{sun} \cdot \text{tg}(\theta_{sun})$ 。同时,从公式(6)中可以看出,参数 S 是未知的,还要求取参数 S ,即研究 S 的计算方法与原理。

1.2 阴影图像分割与阴影宽度计算

利用阴影计算树木高度的理想条件是阴影带的边缘是清晰的,像元的大小为无限小。然而在实际中,阴影带的边缘是模糊的,像元的大小也是有限的,这就需要讨论像元亮度与阴影边界的关系。

设阴影的亮度为 I_0 ,地面背景值为 I_b ,像元亮度为 I_f ,则有:

$$I_f = fI_0 + (1 - f)I_b \tag{7}$$

式中, f 是阴影在一个像元中的百分数,即比例。

如果 I_0 和 I_b 能够从比较纯净的阴影和背景像元中求出,则:

$$f = (I_b - I_f)/(I_0 - I_b) \tag{8}$$

确定一个阈值 f_{min} ,如果 $f < f_{min}$,则该像元作为阴影像元;反之,该像元作为背景像元。因此,阴影模型受阈值选择的影响。

图像阈值的选取是阴影图像分割的重要内容,国内外对此进行了广泛的研究,提出了多种图像阈值选择方法。这些方法大致可以分为直方图法、最小误差、概率松弛法、遗传最优化法等十余类^[16,17]。它们都有各自的适用范围和优缺点,其性能与处理的图像有关。在本研究中,遇到的情况是植被阴影落在诸如茂盛的草地、灰白色的混凝土以及黑色的沥青路面背景上的分割问题,它们都不能较好地分割出阴影信息,因而用以下方法选取阈值,即:

$$f_{min} = \mu - k\sigma \quad 0.8 \leq k \leq 1.6 \tag{9}$$

式中, μ 为图像的均值, σ 为图像的标准差。

从(9)式可知,当 k 增加时,阈值 f_{min} 减小,反之,阈值 f_{min} 增大。 k 的此值范围是当 $k=1.6$ 时,许多明显是阴影的地方误分为非阴影; $k=0.8$ 时,许多非阴影又划分为阴影。

对于不同的像片, k 的取值不同,同一像片即使是不同的区域, k 值也不一样。对分割出的阴影图像二值化,并对图形进行边界跟踪,形成封闭多边形。由每一个多边形的面积和长度,求出阴影带的宽度,即为需求的树木阴影长度 S 。

2 树高、冠径与冠高相关关系模型

2.1 树高与冠径相关关系模型

不同的树种,其树高与冠径的相关关系并不相同,就是同一树种在不同的生长阶段,其树高与冠径的关系也不相同。因而无法用统一的曲线来描述不同树种的树高与冠径相关关系。对每一树种,统计分析了不同区域、不同生长阶段的5个样本数据,建立了主要树种的树高与冠径相关关系模型(表1)。

2.2 冠径与冠高相关关系模型

不同的树种其冠径与冠高的关系并不同,就是同一树种,在不同的生长阶段其冠径-冠高关系也不相同。绝大多数树种很难用“单弧”曲线描述其生长全过程的冠径-冠高关系。为此,园林部门常采用具有“S”型特征的增大曲线来描述植物的某些生长因素。为了将该方程实际应用于依冠径求取冠高及得到更高的拟合精度,周坚华等人对原曲线方程作了修正^[4],增强了自变量系数。修正后方程的一般形式为:

$$y = 1/(a + be^{-cx}) \tag{10}$$

其中, x 为冠径, y 冠高, b 为回归系数, a, c 为系数。

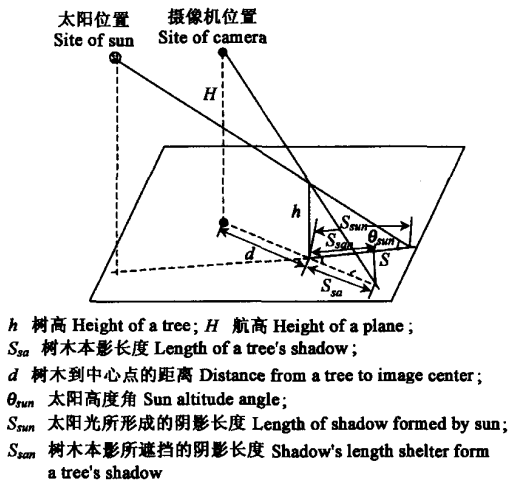


图1 成像时太阳、摄像机和树木之间的相对几何位置关系

Fig.1 The geometrical ubiety of sun, camera and tree in imaging

表 1 树木树高-冠径相关方程

Table 1 The correlative equation on the height and crown diameter of some trees

种类 Species	相关系数 γ Correlative coefficient	树高-冠径相关方程 Correlative equation for height of a tree and diameter of crown of a tree
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	0.9995	$y=0.003x^3-0.103x^2+1.5735x-1.8013$
雪松 <i>Cedrus deodara</i>	0.9950	$y=0.0057x^4-0.1441x^3+1.753x^2-3.891x+5.9186$
香樟 <i>Cinnanomum camphora</i>	0.9995	$y=0.007x^3-0.1737x^2+1.8987x-1.7321$
龙柏 <i>Juniperus chinensis var. kaizuka</i>	0.9895	$y=1.116\ln(x)+0.8815$
罗汉松 <i>Podocarpus brevifolius</i>	0.9995	$y=0.0013x^3-0.0613x^2+1.2898x-1.0253$
悬铃木 <i>Platanus hispanica</i>	0.9999	$y=0.0113x^3-0.2894x^2+3.3218x-7.3971$
柳树 <i>Salix babylonica</i>	0.9945	$y=0.0006x^3-0.0221x^4+0.3396x^3-2.5123x^2+9.0647x-9.7286$
白玉兰 <i>M. denudata</i>	0.9988	$y=-0.0003x^3+0.055x^2+0.1301x+0.694$
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	0.9999	$y=15.38\ln(x)-29.942$
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.9999	$y=0.3903\ln(x)+1.7222$
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	0.9997	$y=0.0005x^3-0.0249x^2+0.5544x-0.1952$

原始曲线方程与修正后的方程的拟合精度表明,增加 c 值后使相关系数平均提高 17.9%。

宁波市与上海市地理位置比较接近,植物生长状态几乎相同,周坚华等人建立了上海市常见树种的冠径-冠高相关方程^[4],以此模型来表达宁波市常见树种的冠径-冠高相关关系(表 2)。

表 2 常见树木冠径-冠高相关方程^[4]

Table 2 Correlative equation of diameter of crown and height for tree

种类 Species	相关系数 γ Correlative coefficient	冠径-冠高相关方程 Correlative equation for diameter of crown and height of a tree
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	0.703	$y=1/(0.047223+0.94057e^{-0.37x})$
雪松 <i>Cedrus deodara</i>	0.910	$y=1/(0.080197+0.743825e^{-0.47x})$
香樟 <i>Cinnanomum camphora</i>	0.870	$y=1/(0.086886+2.886574e^{-0.57x})$
龙柏 <i>Juniperus chinensis var. kaizuka</i>	0.972	$y=1/(0.069298+5.265099e^{-1.27x})$
罗汉松 <i>Podocarpus brevifolius</i>	0.717	$y=1/(0.138702+0.766532e^{-0.49x})$
悬铃木 <i>Platanus hispanica</i>	0.918	$y=1/(0.105595+1.534633e^{-0.39x})$
柳树 <i>Salix babylonica</i>	0.972	$y=1/(0.095657+365.5584e^{-2.27x})$
白玉兰 <i>M. denudata</i>	0.836	$y=1/(0.122672+1.052523e^{-0.67x})$
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	0.735	$y=1/(0.027305+0.17026e^{-0.09x})$
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.930	$y=1/(0.177828+568.2129e^{-3.51x})$
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	0.769	$y=1/(0.038946+1.20699e^{-0.77x})$

3 三维绿量模型建立及计算

3.1 树冠三维绿量方程建立

树冠的形态不仅因树种而异,就是同一树种也会因其立地条件、生长环境等的差异而不同^[4]。为了较准确地计算树冠绿量,必须为不同的树种选配最接近该树种典型树冠形态的规则立体几何图形。将树冠形态归纳为球体(包括圆球体、椭球体)、单圆锥体、双圆锥体、圆台体、球柱体、球缺体、倒球扇体等几类形态。各类体态的轴长比例、上下结合图形的比例等由各自的树高-冠径、冠径-冠高相关关系决定。表 3 是常见树木树冠立体几何形态及绿量方程表。

3.2 三维绿量的计算

以宁波市为研究对象,分别计算了江北区、江东区、海曙区和全市的绿化总三维绿量和平均相对三维绿量(表 4),以及全市平均相对三维绿量的区域分布(图 2)。从表中可以看出,区域的平均相对三维绿量与绿化覆盖率具有一定的相关关系,绿化覆盖率高的区域,其平均相对三维绿量就比较高,但两者之间并非直线相关,因为决定平均相对三维绿量的因素不仅有绿化覆盖率,而且还应包括绿化结构和植物的生长状态。在绿化覆盖率高且植物生长状态良好、绿化结构为复层的区域,其平均相对三维绿量就较大;反之,平均相对三维绿量就较小。

4 讨论

(1)城市空间三维绿量研究是一件比较复杂的工作,既涉及到遥感图像的处理,又涉及植物生态方面的内容。该研究所用资料为 1:1 万彩色红外航空遥感图像,对于较低矮的灌木类植物,未能较好地识别其高度。同时,在三维绿量的研究中,未涉及草地的绿量计算。

表 3 常见树木树冠立体几何形态及绿量方程
Table 3 The solid geometry shape and green quantity for crown of a tree

种类 Species	立体几何形态 Solid geometry shape	树冠绿量方程 Equation of green quantity for crown of a tree
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	卵形体 Egg body	$\pi xy^2/6$
雪松 <i>Cedrus deodara</i>	圆锥体 Cone	$\pi xy^2/12$
香樟 <i>Cinnanomum camphora</i>	球体 Sphere	$\pi xy^2/6$
龙柏 <i>Juniperus chinensis</i> var. <i>kaizuka</i>	单圆锥体 Single cone	$\pi xy^2/12$
罗汉松 <i>Podocarpus brevifolius</i>	倒球扇体 Fall global fan style	$\pi(2x^3-x^2 \cdot \sqrt{4x^2-y^2})/3$
悬铃木 <i>Platanus hispanica</i>	圆柱体 Cylinder	$\pi xy^2/4$
柳树 <i>Salix babylonica</i>	卵形体 Egg body	$\pi xy^2/6$
白玉兰 <i>M. denudata</i>	圆球体 Pellet style	$\pi xy^2/6$
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	双圆锥体 Twin cone	$\pi xy^2/12$
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	卵形体 Egg body	$\pi xy^2/6$
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	单圆锥体 Single cone	$\pi xy^2/12$

表 4 宁波市三维绿量
Table 4 The 3D green quantity of Ningbo City

行政区 Distriets	区域面积(hm ²) Area	绿化覆盖率(%) Rate of virescence overlay	平均相对三维绿量(m ³ /hm ²) average relatively 3D green quantity	总三维量(万 m ³) The total 3D green quantity
江北区 Jiangbei district	1805.66	30.44	3652.4	659.5
海曙区 Haishu district	1543.43	16.16	2908.5	448.9
江东区 Jiangdong district	1542.55	21.53	3229.7	498.2
宁波市 Ningbo City	4891.64	23.12	3284.4	1606.6

(2)以宁波市为研究对象建立的城市空间三维绿量研究方法,对于条件近似的南方城市具有一定的适用性。但是,对于其它地域差别较大的城市,该模型并不一定适用。因为受气候影响,同一树种在不同的气候区的形态会有较大的差别,所以其树高-冠径、冠径-冠高相关关系模型以及三维绿量方程需重新计算,但树高的识别方法以及研究方法具有普适性。

(3)在城市绿化宏观管理研究中,城市绿化三维量的研究,以及以绿量的定量分布模型分析绿化与环境效益的相关关系,代表着城市绿化布局结构及其生态环境效益研究的新方向。本文研究了城市空间三维绿量遥感研究中的部分相关模型,特别是利用具有一定高度的树木在阳光下产生的阴影来建立树木的高度模型,进而建立相关的树高-冠径、冠径-冠高模型,为城市绿化数据库的建立奠定好的基础。这些模型的建立有助于估算城市绿化的生态环境效益,并可为城市绿化系统的设计,特别是为环境要求不同的功能区的绿化系统的设计提供有价值的技术参数。

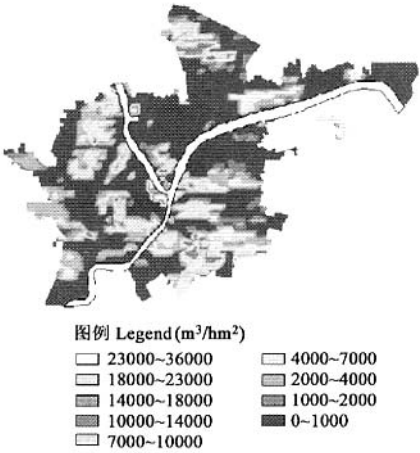


图 2 宁波市平均相对三维绿量分布图
Fig. 2 The distribution of average relative 3D green quantity in Ningbo City

References:

[1] Huang X L, Zhang G Q. The study on green quantity group for exist environment in city (1). *Chinese Landscape Architecture*,1998,**44** (1):61~63.

[2] Zhou Y F, Zhou J H. The urban Eco-environmental estimation system based on 3-dimension vegetation quantity. *Chinese Landscape Architecture*,2001,(5):77~79.

[3] Zhou J H. An analysis of the macro effect of vegetable's deducing and decomposing sulphur dioxide through the 3-dememsional vegetable quantity. *China Environmental Science*, 1999,**19**(2):161~164.

[4] Zhou J H, Sun T Z. Study on remote sensing model of three-dimensional green biomass and the estimation of environmental benefits of

- greenery. *Remote Sensing of Environment China*, 1995, **10**(5):162~173.
- [5] Zhang L P, Zheng L F, Tong Q X. The estimation of vegetation variables based on high resolution spectra, *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(2):111~114.
- [6] Li Y, Demetriades-shah T H. Use of second derivatives of canopy reflectance for monitoring prairie vegetation over different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **44**:81~87.
- [7] Zhang J H, Fu C B. A study on relationships between remote sensing information and plant photosynthetic parameters in estimating biomass model. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, **28**(2):128~132.
- [8] Karin S Fassnacht, Stith T Gower, Mark D MacKenzie, et al. Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **61**: 229~245.
- [9] Coops N C, Waring R H. The use of multi-scale remote sensing imagery to derive regional estimates of forest growth capacity using 3-PGS. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75**:324~334.
- [10] Law B E, Waring R H. Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by under story vegetation. *Ecological Applications*, 1994, **4**:272~279.
- [11] Franklin S E, Mnudie A J, Lavigne M B. Using spatial co-occurrence texture to increase forest structure and species composition classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, **67**(7):849~855.
- [12] Lai Z B, Xia S D, Cheng J C. Application model research of high resolution remote sensing data in urban environment evaluation. *Progress in Geography*, 2000, **19**(4):359~364.
- [13] Cheng F, Thiel K H. Delimiting the Building Heights in a City from the Shadow in a Panchromatic SPOT-Image-Part 1: Test of Forty-Two Buildings. *Int. J. Remote Sensing*, 1995, **16**: 409~415.
- [14] Huertas A, and Nevatia R. Detecting Building in Aerial Images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1988, **41**: 131~152.
- [15] Liow Y T, and Parlidis T. Use of Shadows for Extracting Building in Aerial Images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1990, **49**: 242~277.
- [16] Wu Y Q, Zhu Z D. The progress of threshold select about image processing in last 30 years. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 1993, **8**(3):193~201.
- [17] Zheng H, Pan L. The automatic selection of image threshold on the basis of genetic algorithms. *Journal of Image and Graphics*, 1999, **4**(A)(4): 327~330.

参考文献:

- [1] 黄晓鸾, 张国强. 城市生存环境绿色量值群的研究(1). *中国园林*, 1998, **44**(1):61~63.
- [2] 周一凡, 周坚华. 基于绿化三维量的城市生态环境评价系统. *中国园林*, 2001, (5):77~79.
- [3] 周坚华. 以绿化三维量分析植物群降解 SO₂ 的宏观效应. *中国环境科学*, 1999, **19**(2):161~164.
- [4] 周坚华, 孙天纵. 三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算. *环境遥感*, 1995, **10**(3): 162~173.
- [5] 张良培, 郑兰芬, 童庆禧. 利用高光谱对生物变量进行估计. *遥感学报*, 1997, **1**(2):111~114.
- [7] 张佳华, 符宗斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究. *测绘学报*, 1999, **28**(2):128~132.
- [12] 赖志斌, 夏曙东, 承继成. 高分辨率遥感卫星数据在城市生态环境评价中的应用模型研究. *地理科学进展*, 2000, **19**(4):359~364.
- [16] 吴一全, 朱兆达. 图像处理中阈值选取 30 年(1962~1992)的进展(一). *数据采集与处理*, 1993, **8**(3):193~201.
- [17] 郑宏, 潘励. 基于遗传算法的图像阈值的自动选取. *中国图象图形学报*, 1999, **4**(A)(4):327~330.