

树冠叶面积体密度和叶面积指数的 间接估值方法研究*

王锦地 李小文

A. H. Strahler

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101) (美国波士顿大学遥感中心)

摘要 本文论述了根据计算机断层成像的原理,对树冠的叶面积体密度和叶面积指数等构造参数进行间接估值的方法。说明了对树冠多角度底视数据的获取,对树冠外形的反投影重构,和获得冠层内叶面积体密度的空间分布的原理和方法。总结了测量工作经验,并用测量数据对估值方法进行了检验。

关键词 树冠,计算机断层成像,叶面积指数,叶面积体密度。

1 前言

随着遥感技术的发展,新一代遥感仪器已具有获得同一地面目标多个方向的反射数据的能力,使得地物反射的各向异性特征再次成为遥感数据应用研究的热点。人们希望通过地对地物二向性反射特征的研究,建立起遥感数据与地物的物理和生物参数之间较为严格的数学关系,使遥感观测数据的应用,从地物光谱的定性解译发展到对地物结构及其特征参数进行定量估值和反演的阶段。

植被对于人类的生存和活动具有十分重要的意义,但由于植被三维结构的复杂和多样性,对植被与电磁波反射的相互作用的研究具有相当的难度。对植被冠层的描述采用介电常数,导电率等参数已难于进行,因而无法延用直接求解麦克斯韦方程和波动方程的方法。在对植被冠层的辐射特征的研究中,多种冠层反射模型在各自不同的尺度上建立了植被冠层结构和构造参数与冠层反射之间的数学关系。如 Li-Strahler 几何光学模型从遥感像元的尺度出发,建立了森林结构参数(植被覆盖度,平均树高度,平均冠幅尺寸等)与冠层二向性反射分布函数之间的数学关系。这些数学模型的研究,提供了应用遥感数据反演地表植被结构参数的可能性,但模型的适用性需要大量的遥感数据和地面观测数据进行验证,模型的改进更要以可靠的遥感与地面观测同步获取的数据为依据。从这个意义上讲,对植被冠层的观测数据的获取,与建立数学模型的研究具有几乎同等重要的意义。

近年来新型的星载遥感仪器的研制,使人们可望在不久的将来获得地面目标系统的

* 国家自然科学基金资助项目。

在工作中朱启疆教授对文中所述第二数据集数据获取给予指导和协助,范韶华、曹兆丰、赵京在观测、胶片数据数字化中给予协助,在此致谢。

收稿日期:1994年9月8日;收到修改稿日期:1995年4月19日

多角度遥感数据,而作为美国地球观测系统中中分辨率成像光谱仪(MODIS)的模拟机载辐射光谱仪 ASAS,已经能够获取地物不同方向的遥感观测数据。但目前与遥感数据相配套的地面观测数据的获取仍不尽人意,对植被结构参数的测量,特别是对林木树冠的叶面积指数(LAI)和叶倾角分布(LAD),这些冠层反射模型中主要反演的参数的测量,测量方法及其实现都还在探索之中。对于水平均匀植被的叶面积指数,传统的测量方法均基于对植株的破坏性测量,即将待测叶片全部剪下逐叶测量叶面积。常用的方法有直接测量法,标准形状法,基于叶面形状模型的公式计算法,基于叶面积和叶重量之间关系的称重法,以及使用光面积计的测量法^[1]。在野外进行的间接测量方法有:接触频率法,即用一根细长杆从不同方向插入植被,记录长杆触及叶或茎的高度和次数,用从不同方向插入多次的记录结果计算植被的叶面积指数和全植被指数^[1]。近年来使用的 LICOR 仪器,则利用植被下不同方向测得的电磁辐射强度与附近空旷处测得值的比值来计算植被的 LAI。对于不连续植被, A. R. G. Lang 和项月琴等曾在根据太阳直接辐射在冠层内的透过率推算水平均匀冠层的叶面积指数的基础上,将这一方法推广到冠层中有较大空隙的情况。这里所用方法的原理与上述的间接测量方法相似,将太阳光线视作插入冠层的探针,通过测量空隙频率推算叶面积指数^[2]。

本文所述的工作是针对诸如林木冠层等不连续植被叶面积指数的估值方法研究。首先从理论和实验上讨论单棵树冠的叶面积指数和冠内叶面积体密度的估值问题。根据计算机断层扫描成像的原理,采用地面摄影的方法获取树冠的多角度观测数据,应用图像重建算法重构树冠的几何形状,再对冠层内的叶面积体密度进行估值,进而推算整个树冠的叶面积指数。为了验证估值结果,对树冠的形状和结构参数进行了同步采样测量。本文将详述估值和观测的方法,这些方法对于林木树冠结构参数的获取是很有意义的。

2 树冠的断层成像及树冠结构参数的估值

计算机断层扫描成像(CT)理论曾引起科技界的极大关注,由投影重建图像的理论和技术,广泛应用于很多科学技术领域。从理论上讲,假定位于光源和检测器之间的被重构物体是无限薄的,并且在任何特定的光源和检测器的位置,所有射线光子在落于无限薄片内的直线上传播,则被测物体在此切片内的相对线性衰减系数的分布是由它的所有线积分的集合唯一决定的^[3]。因此,若信号检测器接收到的信号可以表示为沿穿过被测物体的线积分,即:

$$P_{\theta} = \int_{R_{\theta}(\theta)} f(x, y, z) ds_{\theta}, \quad (1)$$

则被测物体的密度分布可以根据计算机断层成像理论重建。式(1)中, $f(x, y, z)$ 为被测物体体密度的三维分布函数, P_{θ} 为检测信号,通常称作投影。利用投影数据计算物体体密度的分布,即由投影重建图像,可以用反投影法,卷积法及其他变换算法实现。

式(1)建立了被测物体和检测信号之间关系的数学模型。类似的描述沿穿过树冠的射线方向上,单位立体角内射线穿透冠层的概率的典型模型表示为:

$$P_{g\theta}(\theta) = e^{-LK(\theta)S}. \quad (2)$$

其中 L 为单位体积元中单面叶面积和, $K(\theta)$ 为该体积元叶面积在给定射线方向上的投影系数, S 为射线穿过树冠内的路径长度, θ 为射线方向的天顶角^[4]。由式(2)得到,

$$\ln P_{gap}(\theta) = - \int_{R_{xy}(\theta)} L(x, y, z) K(\theta) ds. \quad (3)$$

对比式(3)和(1)可见, 从树冠间隙概率的测量数据重构树冠内叶面积体密度的空间分布问题, 与典型的 CT 图像重建问题十分相似。因而可将 CT 理论和算法用于对树冠层内叶面积体密度 (FAVD) 的空间分布的估值。再根据 FAVD 的分布和叶面积指数 (LAI) 间简单的数学关系, 便能计算全树冠的叶面积指数, 以实现树冠 FAVD 和 LAI 的无损测量。

反向投影法是断层成像的基本算法之一。采用反向投影进行树冠的断层成像重构的基本步骤为:

1. 对地面摄影图像选择适当的分辨率, 以识别每一像元为叶冠, 枝干或天空。视枝干与叶冠为一类, 天空为一类, 作二值反向投影, 重构树冠的基本外形。

2. 对图像做低通滤波, 经低通滤波后的图像像元的灰度, 即射线穿过冠层的透射的对数与射线穿过冠层内的路径长度有很好的线性相关^[5]。视树枝干像元为噪声, 并置不用, 在树冠基本外形之内, 用“叶冠层”像元作反向投影, 即: 将每一“叶冠层”像元对应的叶面积总量, 均匀分布在其所代表的立体角与树冠基本外形的重叠部分之内(这里假定在射线穿过叶冠层的路径上, 冠层内叶面积近似均匀分布)。对所有“叶冠层”像元投影完毕之后, 对树冠内每一点取投影交叉次数的平均值, 获得冠层内任一体积元的叶面积体密度。

由式(3), 冠层内任一体积元的叶面积体密度为:

$$L(x, y, z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{-\ln P_{gap}(\theta_i)}{K(\theta_i)S(\theta_i)} \quad (4)$$

逐一计算出树冠内每一体积元的叶面积体密度, 即可获得树冠内叶面积体密度的空间分布。

这一分布在植物测量和植被冠层反射模型的研究中, 都具有重要意义。它定义了树冠内单位体积中叶面积的总量。叶面积体密度沿高度的积分为叶面积指数。对每个给定高度在水平面上积分, 可得单一树冠的叶面积的垂直分布。对叶面积的垂直分布再沿高度积分, 就得到全部树冠的叶面积总量。叶面积总量与树冠在水平面投影总面积之比为该树冠的平均叶面积指数。

3 野外观测数据的获取

我们先后进行了两次野外观测。对观测数据, 应用上述的方法进行了树冠的断层成像重构实验。

第一个数据集获取于 1991 年 9 月, 观测目标为美国亚利桑那州遥感实验场的山胡桃果树, 实验中选择日出前和日落后天空明亮时从地面不同给定点对样树向上拍摄了广角黑白照片, 由于当时获取数据的目的是验证 Li—Strahler 间隙率模型, 摄影数据包括对四棵样树的 300 余张黑白全色照片, 但对每一样树, 摄影仅覆盖半棵树, 因此基于这些数

据所做的树冠断层成像也仅重构了半棵树的外形。仅采用计算机模拟产生了对称的另外半棵树进行了 *FAVD* 及 *LAI* 的估值实验^[6]。

第二个数据集的获取是在第一次实验的基础上,完全针对断层成像重构而设计进行的。1993年9月24日,野外观测在北京师范大学校园内进行,观测目标选定为一棵正常生长的核桃树。观测内容主要包括对树冠的多角度摄影和对树冠结构的几何形状和生物参数的测量。多角度摄影数据用作树冠的断层重构和对其构造参数的估值,重构和估值的结果采用测量数据检验。

3.1 对树冠的多角度摄影

对树冠的多角度摄影是以实现树冠的断层重构为第一目的的。为此首先围绕选定树的主干选择若干个摄影视点,视点分布在以主干为中心,放射状向六个方向延伸的六条路径上,每两条路径间的夹角为 60° 。在每条路径上,自距主干0.5m处为该路径的第一个视点,而后沿路径向树外方向每增加1.0m确定一个视点,直到树冠外沿,每个视点的位置用罗盘和皮尺测定。

摄影采用 Widelex 35-mm 广角狭缝相机,拍摄时相机镜头向上平放于地面,相机的狭缝方向与路径延伸方向平行。该相机具有曲聚焦面,在曝光时狭缝连续运动,扫描过的角度约为 130° ,因此当镜头向上放置拍摄时,就可以获取到狭缝扫描方向上 $\pm 65.0^\circ$,在与之垂直的路径方向上 $\pm 25.6^\circ$ 天顶角视角内的树冠图像。考虑到相机拍摄时的放置姿态直接关系到重构精度,拍摄时用水准仪测定以保证相机的水平放置,并使狭缝与路径方向保持一致。

在采用反投影法重建断层图像中,用到了间隙率模型的基本概念,要求摄取图像要足够清晰,既能区分开间隙和叶、枝干,又能反映光穿透叶面辐射透过率的变化。为了得到可用的图像,我们首先于1993年7月分别选用了黑白全色、彩色、黑白红外和彩色红外胶片进行了广角摄影实验。拍摄基本在无直射阳光的条件下进行,根据光照情况选择不同的曝光时间和光圈,从对拍摄结果的比较中得到:

(1) 全色胶片在正常曝光情况下可以保证间隙和枝叶间足够的反差,但很难区分枝干和叶丛。

(2) 彩色胶片可以色调的不同区别枝干和叶,但显然数据处理量要增加。

(3) 用黑白红外(加红色滤色片)和彩色红外胶片拍摄时,分别选用了 F4、F5.6、F8、F11 四种光圈,曝光速度 1/250,拍摄时阴、间雨。结果是:黑白红外胶片在曝光量小时(F11)较好,可以区分间隙和枝叶,也可区分枝干和叶。相同条件下彩色红外胶片在曝光量大时(F4)较好。

综合考虑拍摄质量、胶片冲洗、数字化及数据处理的因素,选择黑白红外胶片一次摄取了样树周围6条路径共30余个视点的60余张照片。拍摄自24日16:30既将日落时开始,到18:00完成。

3.2 树冠构造参数的测量

为检验树冠断层成像重构的准确性,于获取摄影数据的同日,对样树的构造参数进行

了同步测量。测量内容包括：树的外形尺寸，树冠层内选定水平截面上选定样点的叶面积和叶倾角，枝干的位置和横截面积。

3.2.1 样树外形尺寸的测量

如图1所示,对样树外形尺寸的测量项目及结果有:

树高: $h_1 = 7.6\text{m}$;

枝下高: $h_2 = 1.5\text{m}$;

树主干高度: $h_3 = 1.8\text{m}$;

树冠最大纵向“厚度”: $2b = 6.1\text{m}$

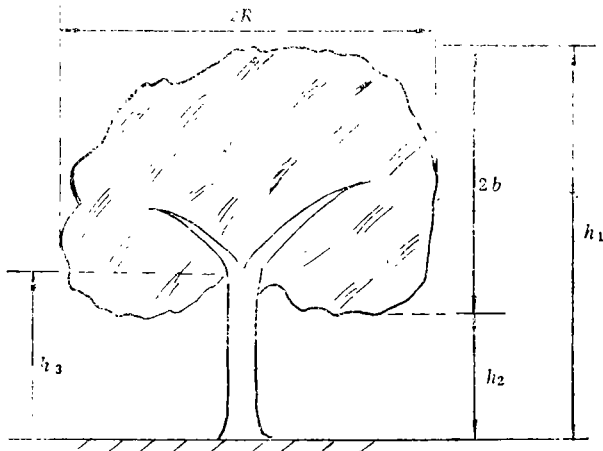


图1 样树外形尺寸的测量参数示意图

Fig. 1 Measurement parameters of tree size

表1 树冠幅在地面投影的测量值
Table 1 Measurement data
of tree crown size projected
on the ground

序号	冠幅外沿到树干中心的距离 (m)	方位角 (度)
1	6.0	265
2	5.0	295
3	3.8	345
4	4.8	20
5	3.5	72
6	1.9	113
7	3.7	165
8	4.6	200
9	4.6	225

树冠最大冠幅 $2R$ 的测量是通过树冠在地面的垂直投影的测量进行的。围绕树冠分别从9个方向,测定了树冠幅外沿到树干中心的距离及方位角,由此可估算树冠地面投影面积和最大冠幅。测量数据见表1。

对树干和枝的测量内容包括:杆下端距地面的高度,枝的长度,方位角(指枝生长方向在水平面投影的方位角),枝生长方向的天顶角,枝干横截面的平均周长。

3.2.2 树冠层内水平截面上选定样点的叶面积和叶倾角的测量

选定在树高2.5m和4.0m两个高度的水平截面上,每个截面选择了叶面积密度不同的样点,详细测量了每一片叶子的叶面积和叶面倾角。在2.5m高度选了7个样点,在4.0m高度选了5个样点。对样点测量的具体方法是:首先采用一个20cm边长的正立方体框架,用框架可插入叶丛,以确定样点内的叶片。将位于框架内的叶片逐一做好标记,再逐一测量叶面积和叶倾角。做叶面积测量时,假设核桃树叶面为椭圆,分别测量长短轴长度,叶面的天顶角用罗盘测得。在4.0m高平面上的测量数据见表2。

在两个水平截面上,分别测量了截面截到的枝干距树中心的距离、方位角、横截面直径或周长,从而可以确定被测杆干的位置和截面积,测量时选择枝以横截面直径大于2cm为准。如此在2.5m截面共测枝干7个,在4.0m截面共测枝8个。

4 观测数据处理及树冠断层成像算法的实现

4.1 树冠外形的断层成像重构

树冠的多角度摄影数据(黑白红外底片)经 C4500 扫描数字化仪数字化形成 8 位数字图像,数字化扫描分辨率为 100μ , 每张底片数字化后的图像尺寸为 550×240 像元,图像在像元方向上相邻像元间天顶角增量约为 0.24° , 在图像行方向上相邻像元间天顶角增量约为 0.23° , 图像获取到的测量数据的最大天顶角在像元方向上为 $\pm 65^\circ$, 在行方向上约为 $\pm 25.6^\circ$ 。

在距地面 4.0m 高度的水平面, 每幅地面摄影图像的覆盖范围约为 $17.16 \times 3.82\text{m}^2$, 在拍摄路径方向每两幅图像的重叠约为 75%, 在相邻路径间也有一定的重叠。经计算,对整个树冠而言,最少重叠量为 6, 这是重构时的参考数据之一。显然,当重构高度降低,重叠量减小;反之,重叠量增加。因而在较低的重构平面,与 CT 成像要求相比,数据量偏少。

图像数据的天顶角覆盖也是必须考虑的因素。我们重构所采用的反投影法,是利用通过重构点的所有射线和累加来估算该点的密度值,前提条件是要取得重构点若干个不同角度的投影。在现取的实验中,我们希望用多点摄影满足反投影的数据要求。但是由于尚未实现对相机姿态的有效控制,暂时将相机平放于地面,树冠顶部和底部的重构所需要的大天顶角数据还不能获取,这些部位的重构是有误差的。

树冠形状重构的算法为:

(1) 确定冠层中重构水平断层平面的高度,逐一计算摄取图像在该平面的投影,并判定每个投影点的重构特征。

(2) 依据图像重建的反投影算法,综合 30 幅摄取图像在重构平面上的投影结果,对于有足够的投影重叠的区域,重构该高度的水平断层图像。

表 2 4.0m 水平断面样点测量数据与重构值的比较

Table 2 Comparison between reconstructed and measured FAVD on 4m plane

序号	测 量 值					重 构 值			
	样点位置		测量总 叶片数	总叶面积 (cm^2)	平均叶倾角 (度)	FAVD (1/m)	样点位置		FAVD (1/m)
	距树干距离 (m)	方位角 (度)					距树干距离 (m)	方位角 (度)	
1	2.8	20	9	373.38	61.8	4.667	2.8	20	2.196
2	3.8	340	19	792.07	44.5	9.901	3.82	340	3.153
3	2.0	338	3	232.08	36.0	2.901	2.0	348	0.742
4	3.8	280	14	704.11	45.4	8.801	4.26	280	2.198
5	3.2	272	5	291.11	57.4	3.639	3.72	272	0.970

(3) 选定重构精度要求的重构水平断层数目,对每一断层重复(1)、(2)。根据所有断层图像重构结果,实现对树冠三维形状的重构。这一重构结果,包括树冠的外形尺寸和树冠内部枝叶及间隙的分布。

我们利用两组摄影数据和上述算法初步实现了对两种树种的树冠重构。第一组数据为美国亚利桑那州的山胡桃果园中每一样树的多角度摄影数据,由于获取数据仅覆盖半棵树,因而重构树冠也仅半个树冠^[6]。第二次数据采集主要为进行整个树冠的重构方法研究,数据获取包含了与摄影同步的树冠尺寸等测量,因而可用实测数据来检验重构结果。

对重构结果的检验以重构 4.0m 高度平面为例,主要对树冠最大冠幅的测量如前所述,即围绕树冠做最大边沿的垂直投影点的位置测量,未同时测量冠幅边沿的高度,而 4.0m 高度基本上为冠层水平截面最大平面,并且被选定做了若干样点的叶面积和叶倾角的详测。冠幅的重构结果与测量数据的比较如表 3。

表 3 4.0m 高水平面冠幅重构与测量数据的比较
Table 3 Crown size measurements and reconstruction on 4m plane

序 号	测 量 值		重 构 计 算 值	
	方位角(度)	冠幅半径(m)	方位角(度)	冠幅半径 (m)
1	20	4.8	19.8	5.19
2	72	3.5	71.6	3.54
3	113	1.9	113.3	3.22
4	200	4.6	202.9	4.30
5	295	5.0	295.5	4.92

从表 3 所示的数据可见,对树冠外形尺寸的断层成像重构基本上是正确的,在有足够摄影数据覆盖的区域,则重构的误差较小。

在此基础上,我们就用上述算法重构了冠层自 2.5m 高度到 8.0m 高度 12 个水平截面的图像,重构图像间的高度间隔为 0.5m。结果显示,重构的树冠总形状是正确的。测量时选择的核桃树的南面(方位角 180°)有高层建筑遮挡阳光,东面(方位角 90°)有其他树,因而样树树冠明显向西北方向光照条件好的方向倾斜,重构的结果与之完全一致。从表 3 中可见 4.0m 水平截面上的重构误差,尤以方位角 113° 的误差很大,这主要是由于广角摄影数据的缺损造成的。实验中采用广角摄影,从曝光到红外底片的冲洗,数字化生成图像数据,整个过程十分繁杂,很难控制数据获取质量。尽管我们在正式采集数据前进行了两次实验取得了一些经验,仍有 5 张底片根本无法使用,包括 30° 路径缺少 2 张,90°、150°、330° 路径各缺一张,这与重构结果 90° 路径附近的误差较大是对应的。另一个原因是由于日落后天空变暗的速度很快,而摄影的工作量很大,于是摄影自即将日落时开始,这时向阳的叶面仍有很强的镜面反射,造成处理中难于区分叶丛和天空,这也是需要解决的问题。

对比重构树冠的高度和测量高度,在 7.0m 以上和 3.0m 以下高度的重构结果与测量值明显有别。3.0m 以下的重构误差主要是由于如前所述的数据重叠量的不足,不能满足反投影算法的假定条件造成的。而在 7.0m 以上的误差主要是由于缺乏大天顶角的数据,这些误差产生的原因均与广角摄影实验中采用 Widelex 相机的限制有关,是需要改进的。

4.2 树冠层内叶面积体密度分布和叶面积指数的估值

如前所述,对冠层叶面积指数和冠层内叶面积体密度 ($FAVD$) 的估值,依据为式(2)、(3)、(4),所用数据有树冠的摄影数据,以及树冠三维形状的重构结果。

对冠层内叶面积体密度的估值步骤为:

① 对摄影图像做低通滤波,使其在沿射线方向上叶丛体密度的衰减基本呈线性。

② 对每一图像点 $P(x, y)$ 计算获取天顶角,确定射线的路径方向 $\theta_i(x, y)$ 计算 $P_{gsr}(\theta_i, x, y)$ 。

③ 根据①算得的路径方向,在形状重构的每一断面上计算射线穿过的位置,并对所有叶像元计算该射线穿过叶丛的路径长度 $S(\theta_i, x, y)$ 。

④ 在给定高度 z_L 的 $FAVD$ 重构平面上计算该射线穿过的位置 (x_L, y_L) 。并计算该射线对 (x_L, y_L) 的 $FAVD$ 的贡献:

$$L(X_L, Y_L, Z_L) = -\ln(P_{gsr})/KS(\theta_i) \quad (5)$$

由于我们尚无对 LAD 的较为满意的估值结果,据已有的测量数据,样树的叶倾角近似于球面均匀分布,即叶面法线方向在各立体角内均匀分布,因此,取 $K(\theta_i) = 0.5$ 。当获得 LAD 的估值结果时,则:

$$KS(\theta_i) = \int_{R_{\theta_i}} K(\theta_i) dS_{\theta_i} \quad (6)$$

⑤ 对所有高度为 z_L (重构平面)上点,利用所有摄影图像重复①—④,再对每一点的 $L(x_L, y_L, z_L)$ 累加求平均值,得到该重构点的体密度值 $L(x_L, y_L, z_L)$,进而得到该平面的 $FAVD$ 的分布。

⑥ 对各个重构断层重复①—⑤,实现对叶冠层中各体积元叶面积体密度的重构。实验中重构断层间隔为 0.5m,共完成 3.0—7.5m 10 个断层的重构。

根据 $FAVD$,如前所述便很容易计算全树冠的叶面积指数,对冠层内所有体积元计算叶面积,总叶面积为 A_L 。通常叶面积指数 (LAI) 定义为单位的地面面积上方,从地面到树冠层顶的叶面积,即:

$$LAI = \frac{A_L}{A_G} \quad (7)$$

获得 $FAVD$ 的重构结果后,将 4.0m 平面的重构结果与测量数据进行了比较,结果见表 2,其中测量 $FAVD$ 值按样点内的总叶面积与样点体积之比计算,单位为 $1/m_c$ 。

基于 3.0—7.5m 高度 10 个水平截面重构的 $FAVD$ 的结果,计算全树冠的平均叶面积指数 $LAI = 3.616$ 。由于在重构 $FAVD$ 时采用的经过低通滤波后的黑白红外图像,凡质量好的均可以区分枝干和叶丛,在处理中除掉了所有被枝干拦截的射线,因而上述 LAI 中不包含枝干,已不同于 $TPAI$ (全植被指数)。

重构的结果从总体上看,在树冠的水平截面上,边缘的叶面密度明显高于中心区域,这与树冠的基本构造,即树冠外层的叶丛密度比中间高,树冠中间则以枝为主是一致的。将 $FAVD$ 的测量值与重构结果比较,可见两者之间具有较强的相关性。

对于重构结果与观测数据的统计结果之间的绝对差别,目前考虑有以下几个方面的

影响。

首先,如前节讨论树冠形状的重构结果时所述,摄影数据的缺损,造成了形状重构的误差,这些误差即表现在冠幅上,又表现在树冠高度上,由此,在进行叶面体密度重构时,先行舍弃了重构形状误差较大的水平截面(3.0m 以下和 7.5m 以上)。而实际上,树冠距地面的最近高度仅 1.5m,可见这种舍弃是不合理的,在此仅出于不得已。对于树冠上部的重构,由于缺乏大天顶角的观测数据,树高重构偏高,这直接造成了对射线穿过冠层的路径长度计算的误差。

第二,在进行 *FAVD* 的重构中,必须考虑的因素之一是叶面倾角的分布 (*LAD*),由于这一分布直接影响射线的透过,而在实验中目前仅简单地假定 *LAD* 球面均匀分布。在测量中,仅对叶面的天顶角用罗盘做了粗略的测量,在对样点 *FAVD* 的计算统计中,也仅考虑叶面积,未计算叶倾角的影响。目前对 *LAD* 的测量和估值两方面都还是亟待解决的问题。

5 讨论与结论

目前,对离散冠层的叶面积指数叶面倾角分布的测量仍为世界性难题,但又在研究光辐射与冠层之间的相互作用中所必不可少的。我们应用计算机断层成像的原理和冠层摄影数据,重构树冠的外形并进而对其 *FAVD* 进行估值的方法,虽然目前仅取得了初步结果,但从方法的可行性和重构结果的总体特征上看,已有的结果是令人鼓舞的,所用的方法是可行的。对于实验中尚未解决的问题及我们的改造设想,讨论如下:

1. 鉴于获取数据的现有方法不能满足反投影重构对数据重复度的要求,并且以摄影为基础,必需经过从拍摄到冲洗、数字化的繁杂过程,而过程每一步骤的质量难以保证。因此拟以摄像机加数字化器构成现场的数据采集系统,以实现采集数据质量的现场评估,并可以及时补充数据量的不足,以保证重构的可靠性,对摄像机姿态的控制亦在考虑之列。

2. 在前两次实验中,分别采用黑白胶片和黑白红外胶片,实验表明采用黑白红外胶片时,叶子与枝干的透射率有明显的区别,可以满足对枝叶的区分。因此,在摄像方案中准备沿用这一方法,并计划以 $0.75\text{--}1.10\mu\text{m}$ 波段的滤色镜加于超广角摄像镜头前来实现。

3. 对叶面倾角的分布 (*LAD*) 的测量和估值与对 *LAI* 的工作相比更有相当的难度,又由于在对冠层与光辐射之间关系的描述中,*LAI* 和 *LAD* 时常以相乘的关系出现,使得对它们的同时反演难于进行。项月琴等曾用 *HVL* 型透光模式推算 5 种模式冠层的叶面积指数和视平均叶倾角^[4],做了有意义的尝试。我们曾计划在实现对重构水平面上的枝叶区分的基础上,对所有叶体积元,根据穿过射线的方向角和该体积元在不同方向上所表现的间隙率的不同来推算平均 $K(\theta)$ 值,该工作正在进之中。

4. 在对树冠基本外形尺寸和样点的参数的测量上,已有的实验已反映出一些问题,如对冠幅尺寸的测量未同时测定高度;冠层内选择样点进行对面积和叶倾角测量时对样点位置、类型和特征的选择,样点尺寸的选择等都需考虑到多方面的因素。假如样点选择合理,则可考虑应用少数样点的测量数据做为辅助数据,校正重构中的误差,或可以作为参

考数据。另外对于叶面倾角的测量也有待于在方法上的改进,以求在其测量,描述,和估值方法上都更为合理,获得可靠的数据。

参 考 文 献

- [1] Ross, J. The radiation regime and architecture of plant stands. Junk, The Hague. 1981.
- [2] Lang, A. R. G., 项月琴. 从太阳直接辐射透过率推算非连续冠层的叶面积指数. 农业生态环境研究. 北京: 气象出版社, 1989.
- [3] Herman, G. T. Image reconstruction from projections: The fundamentals of computerized Tomography. Academic Press Inc. 1980.
- [4] Li Xiaowen, Strahler, A. H. Modeling the gap probability of discontinuous vegetation canopy. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26: 161—170.
- [5] A. H. Strahler, X. Li, et al., Gap probability, Measurements and Models of a pecan orchard. IGARSS proceeding, 1992, 760—761.
- [6] X. Li, J. Wang, et al. Estimating Leaf—Area Index of a crown canopy in a pecan orchard. 13th ACRS proceeding, R—12. 1992.
- [7] 项月琴、周允华. 利用植冠层太阳直接辐射透过推算叶面积指数和视平均叶倾角. 农业生态环境研究. 北京: 气象出版社, 1989, 280—296.

An Indirect Estimating Method of Foliage Area Volume Density and Leaf-Area Index of Tree Crown

Wang Jindi Li Xiaowen

(*Institute of Remote Sensing Application, CAS*)

A. H. Strahler

(*Boston University, Center for Remote Sensing, USA*)

Abstract This paper presents an estimating method of Foliage Area Volume Density (*FAVD*) and Leaf-Area Index (*LAI*) of tree crown by combining computed tomography and vegetation gap probability model. The theory and method of Multi-viewing data acquisition, crown 3D shape reconstruction, and *FAVD* estimation are introduced. The measurement tree architectural data are used in validation.

Key words Tree crown, Computed tomography, *LAI*, *FAVD*