

叶面积指数间接测量方法分析

熊万彩^{1,2}, 邱权^{2*}, 陈天华¹, 郑文刚² (1. 北京工商大学, 北京 100048; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要 叶面积指数(LAI)被定义为植物所有叶片表面积总和与植株所占的土地面积的比值,是表征植物生长趋势的重要参数。总结了当前LAI间接测量研究中的2个重要分支:遥感定量法和LIDAR测量法;详细地介绍了这2个分支下的3种方法:统计模型法、光学模型法、LIDAR测量法,阐述了各自的原理和研究进展;在此基础上,讨论了3种方法的优缺点及未来的发展趋势。

关键词 LAI;统计模型;光学模型;LIDAR

中图分类号 S126;Q945 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2013)15-07022-03

Analysis of LAI Indirect Measurement Method

XIONG Wan-cai et al (Beijing Technology and Business University, Beijing 100048)

Abstract Leaf area index (LAI) is defined as the ratio of the total blade surface area of the plant and the area occupied by the plant. It is an important parameter for describing the growth situation of plants. Two dominating branches of the indirect LAI measuring methods were summarized: remote sensing quantitative analysis and LIDAR measurements, and three methods under the two branches were introduced in detail: statistical model method, optical model method and LIDAR measurement, the principle and research progress were elaborated. On the basis of this, the advantages and disadvantages and development trends of LAI measurement methods were discussed.

Key words Leaf area index (LAI); Statistical model; Optical model; LIDAR

生物学研究表明,叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是衡量植物生长状态的一个重要因素。近年来,已经在植物光合作用、蒸腾作用、水分利用以及植物群体和群落生长分析研究方面得到了广泛应用^[1-2]。因此,获取植物的叶面积指数对于发展农业生产和保护生态环境等都具有十分重大的现实意义。由于采用直接方法测量植物的LAI不仅费时费力,而且对植物本身具有一定的破坏性^[3-4]。因此,目前学术界主要倾向于LAI的间接测量法。为此,笔者主要分析并讨论间接测量体系下的两大重要分支:遥感定量法与LIDAR测量法。

1 LAI 遥感定量方法

用遥感数据估算LAI为大区域LAI研究提供了有效途径,为连续LAI制图提供了唯一可行的选择^[5]。目前,国内外开展了诸多采用遥感技术来估算LAI的研究,这些遥感方法具体可以分为采用统计模型的LAI反演法和采用光学模型的LAI反演法。

1.1 统计模型反演法 遥感反演LAI的统计模型建立的理论依据是植被冠层的光谱特征。大量生物学试验表明,植物叶片中的叶绿素在光照条件下大量吸收可见光中的红光部分,而对其他波段的光吸收较弱。因此,可以认为植物红光波段的反射率与植物叶片信息之间有很大的相关性^[6]。植被冠层的这种光谱特性与土壤等地表其他因素的光谱特性有很大差别,这种差别也为遥感统计模型的建立提供了条件。

方法是建立植物不同波段反射率与植物叶片信息之间的方程。通常,将LAI(反映植物叶片信息的因子)作为方程

中的因变量,而把植被指数(包含不同波段的反射率)作为方程的自变量,即 $LAI = f(v)$ 形式。其中, v 为植被指数。针对不同的研究对象,函数 $f(x)$ 的形式往往不太相似,在统计模型反演过程中经常使用的一些函数形式如式(1)~(4)所示:

$$LAI = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (1)$$

$$LAI = a + bx^c \quad (2)$$

$$LAI = -1/2a \ln(1-x) \quad (3)$$

$$LAI = \ln \left[\frac{VI - VI_{\infty}}{VI_g - VI_{\infty}} \right] K_{VI} \quad (4)$$

式中, x 为光谱反射率或植被指数, a 、 b 、 c 为系数; VI_{∞} 为植被指数的渐进无穷值,在 $LAI > 8.0$ 时,总能达到此限; VI_g 是相应裸土的植被指数; K_{VI} 是一个消光系数^[7]。

当前常用的植被指数有归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(SR)、增强型植被指数(EVI)、垂直植被指数(PVI)、土壤调节植被指数(SAVI)、大气阻抗植被指数(AVRI)、修正的归一化差值植被指数(MNDVI)等。其各自定义参考表1所示。

每种植被指数都有其各自的适用背景和条件,其中NDVI应用最广泛,它是植物生长状态及植被空间分布密度的最佳指示因子,与植物分布密度呈线性关系,因此又可称之为生物量指标。当然,NDVI也有不足,它对高植被区具有较低的灵敏度。使用植被指数和LAI的统计经验关系方法来获取LAI的方法简单,易于计算,在局部区域和特定条件下,能得到比较准确的解,但是LAI的经验统计模型形式易受植被类型、生长阶段、立地环境等多种因子影响,普适性较差。

1.2 光学模型法 LAI光学模型建立的基础是植被的非朗伯体特性,即植被对太阳光短波辐射的散射具有各向异性,从遥感上看就是从地表反射回天空的太阳辐射和卫星观测的结果依赖于太阳角和卫星观测角的关系,可以用双向反射率分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function,

基金项目 国家高技术研究发展计划(2013AA102406);北京市自然科学基金项目(4123097)。

作者简介 熊万彩(1987-),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向:农作物信息采集。*通讯作者,助理研究员,博士,从事机器人环境建模与自主导航、农业机器人系统、农业无线传感网络、植物工厂等研究, E-mail: wancaixiong@126.com。

收稿日期 2013-04-14

BRDF)来定量表示,它是建立在辐射传输模型基础上的一种模型^[8-9]。

表 1 常用植被指数

植被指数	公式	参数意义
归一化植被指数 (NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r}$	ρ_{ir} 为近红外波段反射率; ρ_r 为红光波段反射率
比值植被指数 (SR)	$RVI = \frac{\rho_{ir}}{\rho_r}$	ρ_{ir} 为近红外波段反射率; ρ_r 为红光波段反射率
增强型植被指数 (EVI)	$EVI = \frac{(\rho_{ir} - \rho_r)}{\rho_{ir} - C_1\rho_r - C_2\rho_{blue} + L}$	ρ_{blue} 为蓝光反射率, C_1 为大气修正红光校正系数, 其值为 6.0, C_2 为大气修正蓝光校正系数, 其值为 7.5, L 为树冠背景亮度校正系数, 其值为 1.0
垂直植被指数 (PVI)	$PVI = (\rho_{ir} - a\rho_r - b) / \sqrt{a^2 + 1}$	ρ_{ir} 为近红外波段反射率; ρ_r 为红光波段反射率
土壤调节植被指数 (SAVI)	$SAVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r + L} (1 + L)$	ρ_{ir} 为近红外波段反射率; ρ_r 为红光波段反射率; L 为土壤影响因子, 一般取值 0.5
大气阻抗植被指数 (AVRI)	$AVRI = \frac{\rho_{ir}^* - \rho_{blue}^*}{\rho_{ir}^* + \rho_{blue}^*}$ $\rho_{blue}^* = \rho_r^* - \gamma(\rho_{blue} - \rho_r^*)$	ρ^* 为预先经过了分子散射和臭氧修正的反射率, γ 为大气调节参数
修正的归一化差值植被指数 (MNDVI)	$MNDVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r} [1 - \frac{\rho_s - \rho_{smin}}{\rho_{smax} - \rho_{smin}}]$	ρ_{ir} 为近红外波段反射率; ρ_r 为红光波段反射率; ρ_s 为短波近红外反射率

辐射传输模型是模拟光辐射在一定介质(如大气和植被)中的传输过程,最初用于研究光辐射在大气中传输的规律,其一般的辐射传输模型为:

$$S = F(\lambda, \theta_s, \Psi_s, \theta_o, \Psi_o, C)$$

式中, S 为叶子或冠层的反射率或透射率; λ 为波长; θ_s 和 Ψ_s 分别为太阳天顶角和方位角; θ_o 和 Ψ_o 分别为观测天顶角和方位角; C 为一组关于植被冠层的物理特性参数,例如植被 LAI、叶面指向和分布、植被生长姿态等。

一般辐射传输模型以 LAI 等生化参数为输入值,得到的输出值是 S 。要求得 LAI, 只需得到上述函数的反函数,以 S 为自变量即可得到 LAI 等一系列参数,这就是光学模型反演 LAI 的基本原理^[10]。用于反演 LAI 的光学模型比较多,如 PROSPECT 模型、SAIL 模型、冠层反射率模型、两层冠层双向反射率模型、Li-Strahler 几何光学模型等,其中当前研究和应用较多的是 PROSPECT + SAIL 模型^[11]。

2 LAI 数的 LIDAR 测量法

随着现代农业的发展,如何快速准确地获得叶面指数已经成为许多科研工作者关注的重点,出现了一些实用的新方法、新技术。其中, LIDAR 测量法就是一种建立局部激光反射点数目与 LAI 之间的联系,通过回归方程反演得出叶面积指数的新方法^[12-15]。

其具体方法如 Ricardo、Jordi 等在用激光测距仪来估算果树叶面积指数一文中所述:在测量之前,先对被测果树的树冠采用分层处理,具体操作如图 1 所示^[13,16],将每颗果树树冠在垂直方向划分 6 个区域,在水平方向以树干为轴分为 2 个区域。

测量装置由 SICK LMS-221 30206 型激光测距仪、装有金属横梁的小车、工控机和牵引拖拉机组成,如图 2 所示。

使用该装置来完成对果树树冠的扫描,其中激光测距仪的安装高度依据待测果树的树冠高度而定。单次扫描只能得到某一行果树的单边点云图像,为了获得完整的扫描图像,必须对果树的另一侧进行相同的测量。把获得的果树两

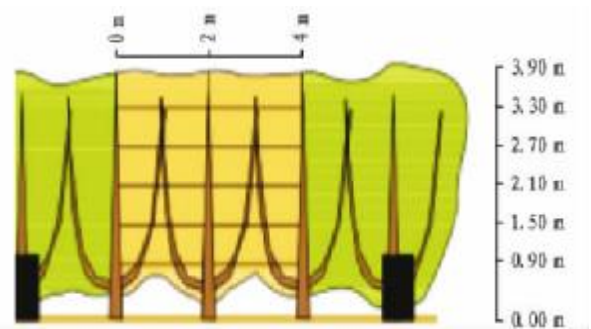


图 1 被测果树的树冠分层



图 2 激光测量装置

边的点云数据合成为一个完整的果树三维点云图像数据。将果树树冠各个区域的点云数目与实测的叶面积指数做相关性分析,各个区域两者的相关性都达到了 70% 以上。因此,建立点云数目和 LAI 之间的回归模型理论上是可行的^[16-19]。回归方程为:

$$y = ax$$

式中, y 代表 LAI, x 代表像点数目。图 3 给出了像点数目与

LAI 之间的一元线性拟合模型。

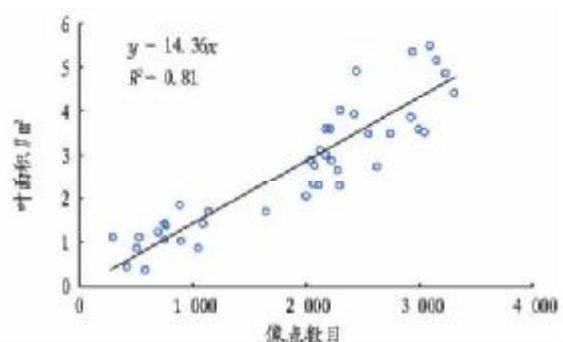


图3 LAI 与像点数目的拟合曲线

这种方法另辟蹊径,建立了像点数目与 LAI 的一元线性回归模型。由像点数目能很好地反演出 LAI,并且拟合的相关程度也在 80% 以上^[20]。

3 分析与讨论

近几年来,遥感定量分析法与 LIDAR 测量法是 LAI 间接测量的两个主要方向。广大科技工作者采用这两个间接测量方法分支解决了 LAI 的测量问题,取得了很好的试验效果,但也存在着各自的不足。

(1) 统计模型法形式简洁,计算简单易行,因而在很长一段时间内都是 LAI 遥感定量估算的主要方法。但是,这种统计模型的函数形式、系数不确定,因为不可能给出通用的统计分析模型,所以这种方法很难用于包含多种植被类型的大尺度遥感影像分析。另外,其所使用植被指数易受诸如地形、土壤背景、大气状况和表面双向性等非植被因素的影响,使得反演精度大打折扣。

(2) 光学模型法是依据物理模型建立起来的一种方法,不受植被类型影响,适应不同植被类型的 LAI 反演。然而由于所建模型过于复杂,反演非常耗时,对于大区域的遥感图像处理尤其不利;并且在反演估算 LAI 过程中有些函数并不总是收敛的,很有可能造成错误的反演结果。

(3) LIDAR 测量法能很好地反演被测植物的 LAI,由于与统计模型相似,该方法同样没有固定的物理模型基础,对于不同植被类型的普适性较差。并且,由于该方法测量步骤繁琐,对试验条件要求苛刻,限制了其应用的场所。

4 发展趋势预测

随着遥感技术的迅猛发展,尤其是多光谱、高光谱技术的出现,遥感定量分析的光学模型法将会引起人们的持续重视。改进和发展现有模型,提高计算能力,对提高 LAI 测量精度具有重大帮助;LIDAR 测量法的出现,为测量 LAI 提供了一个新思路、新方法,相信随着研究的不断深入,将会被越来越多的人所重视。

(上接第 7019 页)

并可缩短犁体曲面的设计周期、以及降低制造成本,也为其它农机产品的设计制造提供了一种值得借鉴的办法。

参考文献

[1] 北京农业工程大学. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,1994:62-134.

参考文献

- [1] MARTENS S N,USTIN S L,ROUSSEAU R A. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis [J]. Forest Ecology and Management,2004,61:91-108.
- [2] CHEN J M,CHEN X Y,JU W M,et al. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs [J]. Journal of Hydrology,2005,305(1/4):15-39.
- [3] CUTINI A,MATTEUCCI G,MUGNOZZA G S. Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests [J]. Forest Ecology and Management,1998,105(1/3):55-65.
- [4] ISHIIHARA M I,HIURA T. Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2011,151:1016-1022.
- [5] RUNNING S W,NENANI R R. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulate photosynthesis and transpiration of forests in different climates [J]. Remote Sensing of Environment,1988,24:347-367.
- [6] 张晓阳,李劲峰. 利用垂直植被指数推算作物叶面积系数的理论模式[J]. 遥感技术与应用,1995,10(3):13-18.
- [7] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [8] 杨贵军,赵春江,邢著荣,等. 基于 PROBA/CHRIS 遥感数据和 PRO-SAIL 模型的春小麦 LAI 反演[J]. 农业工程学报,2011,27(10):88-94.
- [9] 陈雪洋,吴炳方,朱建军. 基于环境星 CCD 数据的冬小麦叶面积指数遥感监测模型研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [10] 方秀琴,张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感,2003,14(3):58-62.
- [11] 薛云,陈水森,夏丽华,等. 几个典型的叶片冠层模型[J]. 西部林业科学,2005,34(1):70-73.
- [12] COTE J,WIDLOWSKI J,FOURNIER R,et al. The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar [J]. Remote Sens Environ,2009,113:1067-1081.
- [13] THIES M,PFEIFER N,WINTERHALDER D,et al. Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper,sweep and lean based on laser scanning of standing trees[J]. Scand J Forest Res,2004,19:571-581.
- [14] ZANDE D V D,STUCKENS J,VERSTRAETEN W W,et al. Assessment of light environment variability in broadleaved forest canopies using terrestrial laser scanning[J]. Remote Sens,2010,2:1564-1574.
- [15] KEIGHTLEY K,BAWDEN G. 3D volumetric modeling of grapevine biomass using tripod LIDAR [J]. Comput Electron Agr,2010,74:305-312.
- [16] HOSOI F,NAKABAYASHI K,OMASA K. 3-D Modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information [J]. Sensors,2011,11:2166-2174.
- [17] MOORTHY I,MILLER J,HU B,et al. Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidar data [J]. Can J Rem Sens,2008,34:320-332.
- [18] LEE K,EHSANI R. A laser scanner based measurement system for quantification of citrus tree geometric characteristics [J]. Appl Eng Agr,2009,25:777-788.
- [19] ZHENG G,MOSKAL L M. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing:Theories,methods and sensors [J]. Sensors,2009,9:2719-2745.
- [20] SANZ R,LLORENS J,ROSELL J R,et al. Characterisation of the LMS200 laser beam under the influence of blockage surfaces. Influence on 3D scanning of tree orchards [J]. Sensors,2011,11:2751-2772.
- [21] 祁漫宇,朱维斌. 叶面积指数主要测定方法和设备[J]. 安徽农业科学,2012,40(31):15097-15099.
- [22] 兰小中,王超,关法春,等. 波棱瓜叶面积数学图像测定方法的研究[J]. 西南农业学报,2011(3):1222-1224.

[2] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2005:9-348.

[3] 赵永满,梅卫江. 铧式犁犁体曲面设计研究现状与分析[J]. 农机化研究,2010(5):232-235.

[4] 丛静华,何瑞银,杨忠,等. 铧式犁犁体曲面设计的现状与研究[J]. 林业机械与木工设备,2005(2):18-20.

[5] 杨胜群. UG NX4 数控加工实用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2006:49-98.