

# 一种用于叶片散射光分布测定的新型装置及性能评价

劳彩莲<sup>1,2</sup>, 李保国<sup>1</sup>, 郭焱<sup>1</sup>, 严泰来<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100094;

2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100094)

**摘要:** 采用微功率激光管作为光源, 围绕被测样品旋转的硅光电池作为检测器, 研制了一种可以测定植物单个叶片反射和透射光在入射面上分布的装置。分别在650 nm 和830 nm 波长光照条件下, 测定了标准白板(参比样)的反射光和大叶黄杨树叶的反射和透射在入射面上的光强分布。测定结果表明该装置有很好的重现性。所研制的装置可用于植物冠层光辐射传输机理研究。

**关键词:** 透射光; 反射光; 散射光分布; 叶片; 光辐射传输

**中图分类号:** S126

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)09-0085-05

劳彩莲, 李保国, 郭焱, 等 一种用于叶片散射光分布测定的新型装置及性能评价[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 85- 89

Lao Cailian, Li Baoguo, Guo Yan, et al Design and evaluation of a new device for measuring scattering light distribution of leaf[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 85- 89. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

叶片作为植物冠层的主要组成元素, 其光学特性特别是反射和透射光的分布特性的精确描述对于很多方面的研究都具有十分重要的意义。如在植物冠层的光分布研究和遥感冠层光谱定量分析中, 需要基于叶片光学特性采用光辐射传输模型来模拟太阳光辐射在植物群体内的传输过程<sup>[1-4]</sup>。在虚拟植物研究和自然景观设计中, 植物的真实感显示是一项重要的研究课题<sup>[5-6]</sup>, 而植物器官特别是叶片的反射光分布的精确描述, 是植物真实感显示的重要基础。

常规的积分球测定方法可用于测定叶片的半球面反射率和透射率, 但不容易得到叶片的反射光和透射光的空间分布。因此, 在植物冠层的辐射传输模型研究中, 一般都假定叶片为bi-lambertian表面<sup>[7]</sup>。但是, 真实叶片的反射光中包括漫反射和镜面反射两种分量, 并且镜面反射分量随着入射角的增大而增加<sup>[8]</sup>。为了精确的模拟叶片的散射光在植物冠层内的传输和分布, 很有必要对叶片的散射光(包括反射和透射)分布进行实际测量。

现有的表面散射光分布测量方法可以归纳为两大类, 它们的主要区别在于分布光强的检测方法不同。一类是基于图像处理的测量方法<sup>[9-11]</sup>, 主要用于可视化研究。这类方法采用图像采集方式获得散射光分布, 由于不需要角度扫描, 测量时间短, 因而光源光强的变化对其测量结果的影响小, 测定结果比较稳定。但是, 用于图像采集的CCD阵列的波长相应区间只在可见光范围

内, 感光灵敏度也较低。因此, 只能用于反射光较强的可见光的散射分布测定, 对于一些在某些波段具有强选择性吸收的样品, 如叶片在可见光的蓝光、红光波段吸收很强<sup>[8]</sup>, 则无法测出这些样品在这些波段的反射光强分布。

另一类是直接测量方法, 用独立的硅光电检测器检测光强, 通过硅光电检测器与被测物体二维的相对运动, 测定物体反射或透射光强的分布<sup>[12]</sup>。这类方法采用专用的光电传感器检测散射光强, 检测器的响应波段区间宽, 检测灵敏度高。因此, 研究人员通常用这类测量系统测量叶片的散射光分布。但是, 由于这类系统通过检测器在物体表面的反射半球和透射半球二维扫描采集散射光的分布光强时, 扫描时间长达几个小时, 因而测定结果容易受光源强度波动的影响, 重复性较差。

本文拟通过对直接测量方法进行改进, 设计一个能在较短的时间内(数分钟)完成单个叶片的反射光和透射光在入射面上的光强分布测定的实验室测量装置。并通过应用此装置对叶片在特征吸收波段和非特征吸收波段的散射光分布特征的测定, 评价该装置的性能。

## 1 原理

### 1.1 反射和透射光的散射特性

物体表面的反射可以分为镜面反射、方向反射和漫反射三种类型。只有理想的光滑表面(如玻璃、金属表面)会产生完全的镜面反射, 相对于纳米级的波长来说一般物体表面都可以看作粗糙表面。粗糙表面的反射光呈现散射分布的特征, 它是方向反射和漫反射两种分量的线性组合。

方向反射是由粗糙表面上的微面元的镜面反射产生的, 其主要特征表现在反射光集中在镜面反射方向周围的一个较小的角度范围内。当入射角较小时, 反射峰出现在镜面反射方向。随着入射角的增大, 反射峰强度也增大。当入射角接近90°掠入角时, 反射峰强度陡增并

收稿日期: 2005-04-18 修订日期: 2005-05-26

基金项目: 国家863高技术研究发展计划资助项目(2003AA 209020)

作者简介: 劳彩莲(1966-), 女, 浙江慈溪人, 副教授, 主要从事生物物理研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。

Email: wancf@263.net

通讯作者: 李保国(1964-), 男, 教授, 从事资源环境信息技术研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。

Email: libg@cau.edu.cn

且反射峰出现的方向偏离镜面反射方向。而漫反射是由粗糙表面对反射光的多级散射和射入物体表面的光被物体内部颗粒的多次散射产生的,具有各向同性的特点<sup>[13,14]</sup>。物体的透射光可分为透明物体的规则透射和非透明物体的漫透射两种类型。规则透射表现出折射的特征,漫透射光是由物体内部颗粒对入射光的多级散射产生的,和漫反射光类似,具有各向同性的特点。

### 1.2 反射和透射光空间分布的描述

光强的三维空间分布通常描述为球坐标下的高度角( $\theta$ )和方位角( $\varphi$ )的分布函数,物体的反射光或透射光的光强分布可用反射半球和透射半球来描述。图1显示了入射角( $\theta, \varphi$ )和反射角( $\theta, \varphi$ )的几何意义。图1中的上半球代表反射半球,下半球代表透射半球。透射角( $\theta, \varphi$ )的几何意义和反射角相同。

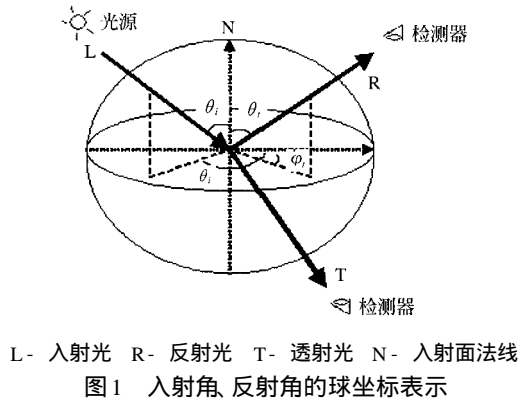


图1 入射角、反射角的球坐标表示  
Fig. 1 Representation of incidence and reflectance angle in sphere coordinates

### 1.3 反射和透射分布光强的检测原理

检测反射光和透射光的分布,实质上是检测反射半球和透射半球上的各个方向的光强。本文中用检测角描述检测方向。当检测到反射半球时,反射角为检测角;反之,当检测到透射半球时,透射角为检测角。

采用直接测量的方法测量光强空间分布,需要通过检测器与样品之间径向和纵向的相对转动来改变检测角。入射角的调整同样需要光源与样品之间的二维转动。

本研究只测定反射光(或透射光)在入射面上的分布,因此入射角和检测角的 $\varphi$ 角为 $0^\circ$ ;只需要调整入射角 $\theta$ ,检测角 $\theta$ (或 $\theta$ )。为提高测量可靠性能,我们将光源固定,由样品做 $\theta$ 方向的旋转改变入射角 $\theta$ 。入射角 $\theta$ 设置以后,检测器围绕样品在入射面上做一维转动,即可以测得入射面上各个反射(或透射光)方向的反射光(或透射光)分布。

## 2 测量装置结构与工作流程

测量装置主要部件包括样品架、光源、检测器和电路单元等组件,图2显示了整个装置的结构示意图。整套装置(PC机除外)放置在一个封闭的暗箱里。

考虑到叶片散射光强较弱,需尽可能增加入射光强,以提高检测到的信号强度。因此,选用单色性好的微

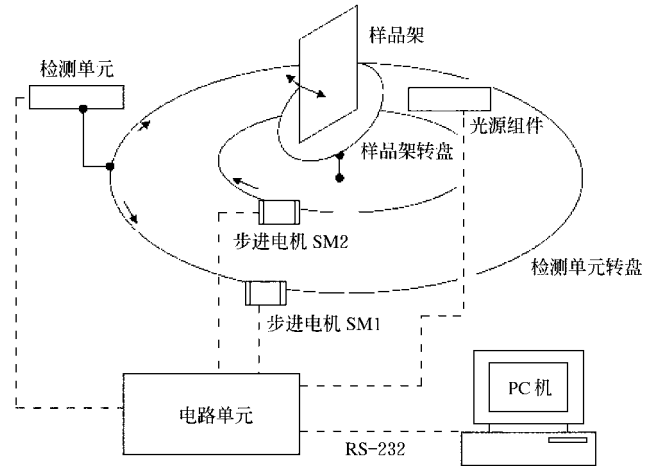


图2 叶片散射光分布测量装置结构图  
Fig. 2 Schematic representation of the device for the scattering light measurements of leaf

功率半导体激光管作为光源。光源的安装采用组件式设计,可以根据实验需更换不同波长的激光二极管作为光源。

处于中心位置的样品架可做径向 $360^\circ$ 旋转,由步进电机SM2驱动。根据角度调整需要,可对样品架进行径向的 $45^\circ$ 角范围内的调整。

检测单元主要由光电检测器、聚光镜和狭缝组成,固定安装在一个内外壁经过发黑处理的金属光管中(称为接收光管)。接收光管由步进电机SM1驱动,可围绕样品径向旋转 $360^\circ$ 。进光狭缝安装在接收光管的前端,狭缝尺寸可以调整,以改变检测角的分辨率。检测波段范围为 $350\sim 1100\text{ nm}$ ,可根据测量要求通过更换激光管以改变光源波长。聚光镜和检测器安装在接收光管的末端,聚光镜的焦平面落在检测器的检测面上。检测器采用硅光电池,可受光面积为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 。

控制电路单元以微处理器为核心,控制光源的驱动和强度调节,光电检测器输出信号的采集和步进单机的驱动转动,以实现反射和透射分布光强的自动扫描测量。图3显示了进行一次扫描测量的控制流程。为便于操作,编制了在PC机上运行的图形界面操作程序。该程序的主要功能是通过与微处理器相连的RS-232口发送测量参数以及系统校正、扫描测量命令,并对扫描的光强角度分布数据进行动态显示和存贮。

## 3 测定结果与分析

叶片中的叶绿素在红光波段具有强烈的吸收,而在近红外波段基本不吸收。本研究中分别选用了红光波段中的 $650\text{ nm}$ 和红外波段 $830\text{ nm}$ 波长的光作为入射光,测量叶片在这两个波长的反射和透射特征。

在以下的测量中,每个样品分别以 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 入射角下重复测量三次。测量一次反射(或透射)分布光强的检测角扫描范围为 $180^\circ$ ;扫描间隔为 $1^\circ$ ;测量时间为 $4\sim 2\text{ min}$ 。

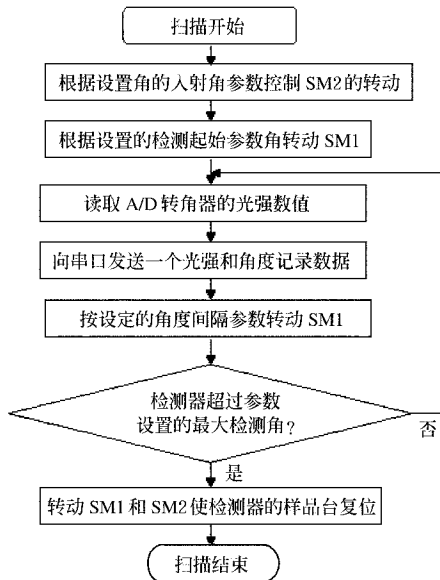


图3 一次扫描测量的控制流程

Fig 3 Flow chart of a complete scan of recordings

### 3.1 参比样的反射光分布测定

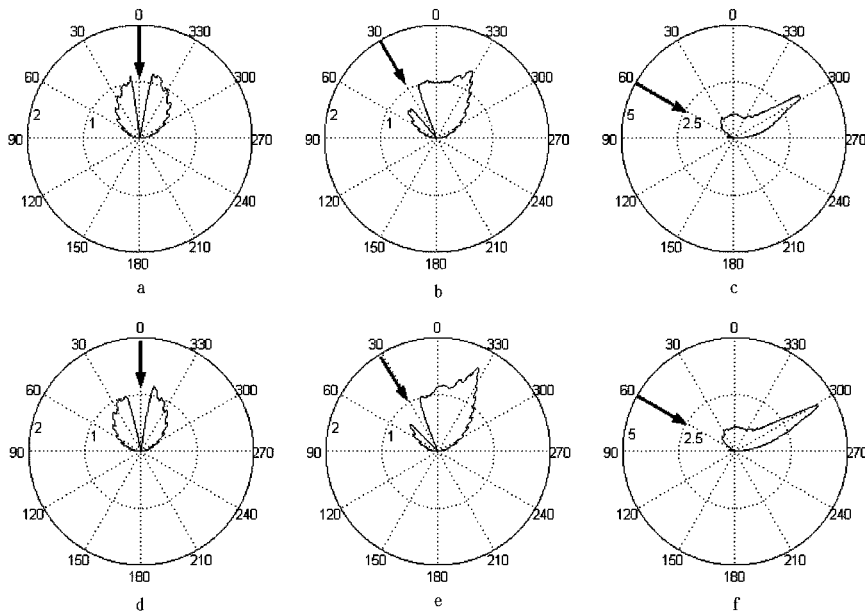
在反射光测定中, 通常使用一种没有特征吸收的中性标准物质作为参比, 以消除光源等测量系统的波动对测量结果的影响。本文中采用了由中国计量研究院研制

的陶瓷材质的标准白板作为参比样, 分别测定了它在 650 nm 和 830 nm 的反射光强分布。该标准白板在这两个波长的球面反射率分别为 0.893 和 0.895。考虑到由实验装置记录的散射光强是经过光电检测器的光电转换并经过线性放大和模数转换后的数字化量, 而不是绝对光强。本文中样品表面的散射光强由测定得到的数字化值与参比样在相同光照条件和某一特定的检测角 (10°) 下测定得到的数字化值的比值表示, 本文称为相对光强 ( $R_s$ ), 是一个无量纲量。计算公式如下:

$$R_s(\theta, \theta) = \frac{I_s(\theta, \theta)}{I_{ref}(\theta, 10^\circ)} \quad (1)$$

式中  $R_s$ ——相对光强;  $I_s, I_{ref}$ ——分别为测试样和参比样的散射光强的数字化值。( $\theta, \theta$ ) 中的  $\theta$  代表入射角,  $\theta$  代表检测角。

图4显示了测定的标准白板在入射面上的反射光分布图, 图中显示的光强为相对光强。反射分布曲线显示, 反射角接近入射角处的曲线不连续, 这是由于检测器扫描检测过程中, 光源遮挡检测器的缘故。从反射分布曲线的形状可以看出, 该标准白板反射光中既有漫反射分量, 又有方向反射分量。在入射角较小时, 两个波长的光强分布很相近; 在入射角增大时 830 nm 处的方向光强略微大于 650 nm 的方向光强。这是由于 830 nm 波长下的表面相对粗糙度较 650 nm 下小的缘故。



a, b, c 分别是入射光波长为 650 nm 时 0°、30°、60° 入射角的反射分布  
d, e, f 分别是入射光波长为 830 nm 时 0°、30°、60° 入射角的反射分布  
极坐标图中的直线代表入射角方向, 0 线为表面法线方向,  
曲线上各点的极角代表反射角, 半径代表相对光强值(为无量纲量)

图4 测定得到的标准白板反射光在入射面上的分布图

Fig 4 Reflectance distribution of white board in incidence plane

因此, 用标准白板作为散射光分布测定的参比时, 不能忽视标准白板的自身散射光分布特性, 它并不是一个理想的完全漫反射表面。可以考虑在较小入射角下测定某一个确定方向的反射光作为参考光强, 反映测量系

统的稳定性。

用 650 nm 波长的垂直入射光照射标准白板, 在 10°、20°、30° 检测角下分别重复 200 次测定反射光强, 测定间隔为 5 s。图5显示了每个测定值相对于平均值的相

对误差,统计求得10°、20°、30°检测角下重复测定的相对标准差分别为0.16%、0.12%和0.24%,三组重复的平均相对标准差为0.20%。

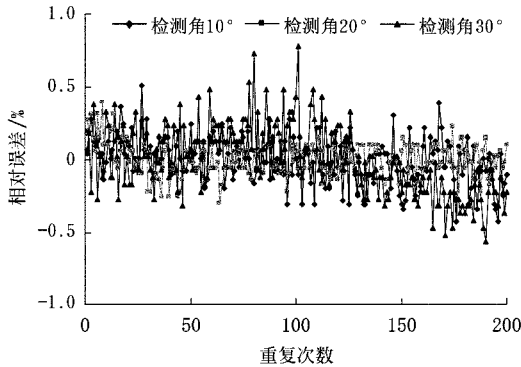


图5 重复测定的标准白板在650 nm 波长光垂直照射下的反射光强相对误差

Fig 5 Relative errors of repeated reflectance intensity recordings of white board under nadir illumination at 650 nm

### 3.2 大叶黄杨树叶的散射分布光强测定

在与标准白板测定完全相同的光照射条件下,测定了大叶黄杨树叶的反射和透射分布。叶片来自中国农业大学校园绿地生长正常的大叶黄杨树。在测定叶片散射分布特性之前,测定了叶片在830 nm 的垂直入射光照射下,60°检测角下的反射光强的重复性。重复测定了200次,测定间隔为5 s,图6显示了每个测定值相对于平均值的相对误差,统计求得200次重复的相对标准差

为1.31%。

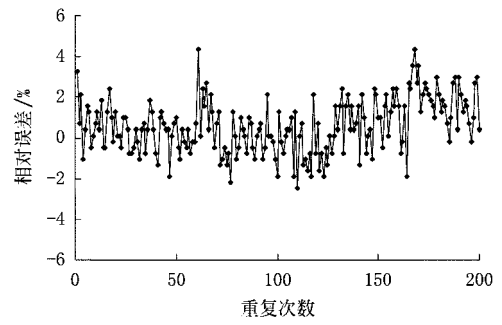
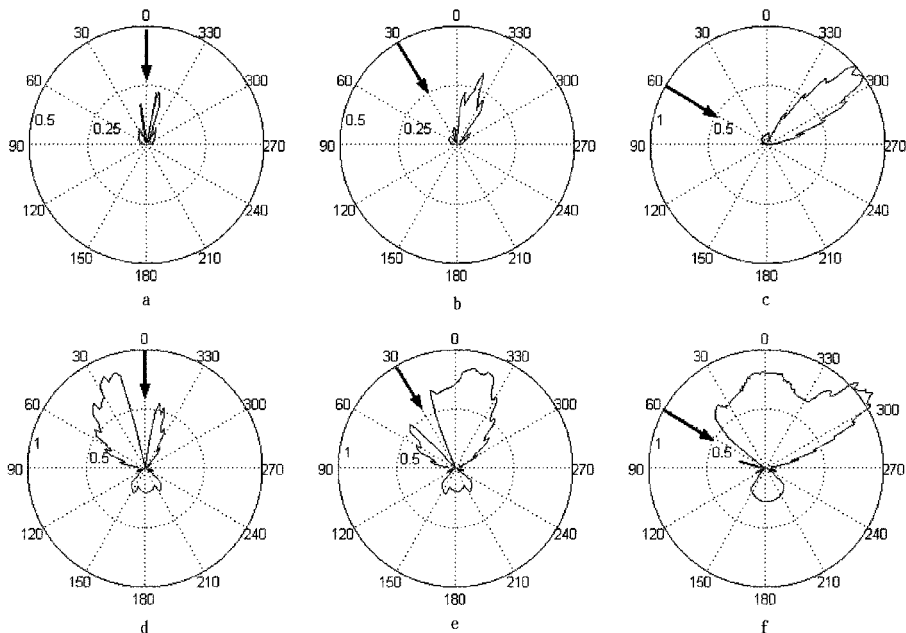


图6 在60°检测角下重复测定大叶黄杨叶片在830 nm 波长光垂直照射下的反射光强相对误差

Fig 6 Relative errors of repeated reflectance recordings of an evergreen euonymus leaf at 60° view angles under nadir illumination at 830 nm

图7显示了测定大叶黄杨叶片得到的散射光分布曲线极坐标图,比较叶片在650 nm 和830 nm 的反射分布曲线图,可以发现它们的反射分布曲线形状差异很大。

叶片在650 nm 的反射光以方向反射为主,说明其反射光主要来自于叶片粗糙表面的反射。叶片表面反射光会出现高光现象,就是方向反射引起的。叶片在650 nm 的漫反射分量极小,说明射入叶片内部的650 nm 波长的光基本上已被叶片内部组分如叶绿素吸收。叶片在650 nm 处的透射光非常微弱,也进一步说明射入叶片内部的光基本上已被叶片吸收。



图解说明参见图4

图7 测定得到的大叶黄杨树叶在入射面上的散射光(反射和透射)分布图

Fig 7 Distribution of scattering light (reflectance and transmittance) in incidence plane of an evergreen euonymus leaf

叶片在830 nm 波长的反射光中漫反射分量比例较大,考虑到830 nm 的波长较650 nm 长,在这个波长下

叶片表面相对粗糙度应小于650 nm 下的粗糙度,因此,可以推定漫反射分量增加的主要原因不是表面反射光

的多级散射,而是由入射到叶片内部的光被叶片内部颗粒散射引起的。说明叶片内部组分对这个波长的光吸收较少。叶片在830 nm处的透射光呈现出漫透射的特征,这也是由于射入叶片内部的一部分光被内部颗粒散射引起的。

#### 4 结 论

研制的测量装置可用于测定植物叶片在特征吸收和非特征吸收波段下的反射和透射光在入射面上的光强分布。系统可以对入射角进行两个方向独立调整和进行360°的检测角扫描,检测角的分辨率由进光狭缝调整。检测波段范围为350~1100 nm,可根据测量要求通过更换激光管以改变光源波长。当检测角的扫描间隔为1时,扫描一次反射(或)透射光强分布的时间为4.2 min。

分别用标准白板作为参比样和大叶黄杨叶片作为被测样品,对系统的稳定性进行测试。标准白板在650 nm垂直入射光照下,在10°、20°、30°检测角下重复测定的相对标准差分别为0.16%、0.12%和0.24%,三组重复的平均相对标准差为0.20%,说明测量系统有较好的稳定性。由于不同检测角下的反射光强的差异,重复性相对标准差也有较为细微的差异。虽然叶片的散射光强较弱,其光强重复性测定相对标准差能达到1.31%。

所研制的测量装置为植物叶片的表面散射特性定量描述提供了有效的测试手段。用传统的积分球测量方法可以测定叶片的半球面反射率和透射率,但无法测定各个反射和透射方向的反射光或透射光的分布。通过该装置可测定的叶片散射光在主平面上的分布,并可以进一步用于建立叶片表面反射和透射模型,确立双向反射和透射分布函数,实现叶片的散射光学特征的定量化研究,从而为植物冠层对太阳辐射能有效利用的模拟研究提供依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] Cooper K D, Smith J A, Pitts D. Reflectance of a vegetation canopy using the adding method[J]. *Appl Opt*, 1982, 21(4): 4112- 4118
- [2] Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B, et al. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT SA L models on sugar beet canopy reflectance data: Application to TM and AV R IS sensors [J]. *Remote Sens Environ*, 1995, 52: 163- 172
- [3] Gastellu-Etchegorry J P, Demarez V, Pinel V, et al. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies[J]. *Remote Sens Environ*, 1996, 58: 131- 156
- [4] Demarez V, Gastellu-Etchegorry J P. A modeling approach for studying forest chlorophyll content [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, 71: 226- 238
- [5] 郭 焱,李保国. 虚拟植物的研究进展[J]. *科学通报*, 2001, 46(4): 273- 280
- [6] Muhar A. Three-dimensional modeling and visualization of vegetation for landscape simulation[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 54: 5- 17
- [7] Myneni R, Ross J, Arar G. A review on the theory of photo transport in leaf canopies[J]. *Agric For Meteorol*, 1989, 45: 1- 153
- [8] Grant L. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance [J]. *Remote Sens Environ*, 1987, 22: 309- 322
- [9] Ward G. Measuring and modeling anisotropic reflection [J]. *Computer Graphics*, 1992, 26(2): 265- 272
- [10] Karner K F, Mayer H. and Gervautz M. An image based measurement system for anisotropic reflection [J]. *Eurographics*, 1996, 15(3): 119- 128
- [11] Dana K J, Wang J. Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional reflectance[J]. *J Opt Soc Am*, 2004, 21(1): 1- 11
- [12] Walter-Shea E A, Norman J M, Blad B L. Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean [J]. *Remote Sens Environ*, 1989, 29: 161- 174
- [13] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *J Opt Soc Am*, 1967, 57: 1105- 1114
- [14] He X D. A comprehensive physical model for light reflection[J]. *Computer Graphics*, 1991, 25(4): 175- 186

## Design and evaluation of a new device for measuring scattering light distribution of leaf

Lao Cailian<sup>1,2</sup>, Li Baoguo<sup>1</sup>, Guo Yan<sup>1</sup>, Yan Taili<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Plant-Soil Interaction of Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A device for measuring bidirectional reflectance and transmittance distribution of a leaf in the plane of incidence was designed with a micro-powered laser diode for illuminating and a silicon photocell detector rotating around sample for recording scattering light intensity from the sample. Illuminating by light source with wavelength of 650 nm and 830 nm, bidirectional reflectance from a white board (taken as reference) and bidirectional scattering (in reflectance and transmittance) from a leaf of evergreen euonymus (*Euonymus japonicus Thunb.*) in the plane of incidence were measured separately. The results showed that the device gave good measurement reproducibility. This device can be used in the research of radiant transfer of plant canopy.

**Key words:** transmitted light; reflected light; scattering light distribution; leaf; radiative transfer