

单叶片偏振 BRDF 建模及参数反演

谢东辉¹, 王培娟², 朱启疆¹, 周红敏¹

1. 北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室,
北京师范大学环境遥感与数字城市北京市重点实验室,
北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875
2. 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 利用长春光机所研制的多角度观测装置测量了玉米嫩叶、玉米成熟叶和一品红叶表面的二向偏振反射率分布,发现叶片表面反射具有明显的非朗伯性。通过借鉴 Cook-Torrance 光照模型的形式,将不同偏振态的菲涅尔因子耦合到模型中,推导得到用于叶片表面偏振的二向性反射分布函数模型(pBRDF-polarimetric bidirectional reflectance distribution function)。将建立的 pBRDF 模型与实测数据拟合,利用遗传算法进行参数反演,获得叶片漫反射率、等效折射率和表面粗糙度。通过实测值和模拟值的比较,发现该 pBRDF 模型可以用于叶片表面方向偏振反射特性的模拟。同时,该模型还有助于对植物叶片生理生态特性的定量分析。

关键词 叶片;二向性反射分布函数;偏振;玉米;表面粗糙度

中图分类号: S127 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)12-3324-05

引言

叶片是植被冠层中的主要生理器官,对植物的生长发育起着重要的作用。叶片的光学特性则是影响整个植被冠层场景反射率的主要因素之一。因此,对单叶反射特性定性和定量分析是研究冠层反射特性的基础^[1,2]。

单叶片的光学特性与叶片表面和内部结构以及入射和观测方向的几何位置等因素有关。叶片的反射和透射率谱的研究相对较多^[3],在实验室利用装有积分球的光谱探测器,可以方便地测得方向-半球反/透射率谱。随着单叶片光学特性测量的不断发展,各种模拟叶片反射和透射光谱的模型相继建立起来^[4-6]。

随入射观测几何角度不同,叶片的反射和透射还具有一定的方向性,它可以用二向性反射分布函数(BSDF)来表示,包括叶片的二向性反射分布函数(BRDF)和二向性透射分布函数(BTDF)^[7]。随着多角度观测仪器的出现和发展,单叶片的二向性反/透射分布数据逐渐增加^[7-10]。实验数据表明,叶片的反射一般是非朗伯性的,而透射则接近朗伯特性^[11]。

一直以来,能够模拟叶片二向性、反射特性的模型相对

较少。一方面是由于实验测量数据的缺乏^[8],另一方面,则是因为叶片二向性反射特性的复杂性,以至于难以用简单的公式来表达^[12]。

随着对叶片生理结构和光学特性的深入研究,一些学者根据对实验数据的推断得出结论:叶片反射的朗伯性(漫反射)主要是由叶内部的多次散射引起的;而叶片反射的非朗伯性(镜面反射)则是由叶表面结构引起的,即与表皮层下的组织无关^[13]。因此,叶片的 BRDF 可以用漫反射分量和镜面反射分量之和来表示^[13]。此外,人们通过测量发现叶片的漫反射分量是无偏的,而镜面反射光具有偏振特性^[11]。且其偏振度与植物生理状态和生长阶段紧密相关^[10,13,14],但是该研究大多还停留在定性分析或建立统计关系阶段,其定量关系还未见有相关文献报道。随着科学家对目标偏振特性的不断研究,偏振遥感逐渐成为遥感界一个十分重要的领域。而建立单叶片二向性反射分布模型将为人们利用偏振测量获取更多有用的植被信息铺平道路^[5]。因此叶片偏振反射特性研究和建模将为发展偏振遥感,改进植被遥感物理模型,以及精确解释遥感数据都具有重要的理论研究价值。

本文测量了几种植物单叶片的偏振多角度反射分布,在原有 Cook-Torrance 物理模型基础上,建立了叶片偏振 BRDF 模型。通过与实测数据的拟合,反演获得叶片漫反射

收稿日期: 2010-01-22, 修订日期: 2010-04-26

基金项目: 国家(973计划)项目(2007CB714402), 国家自然科学基金项目(40601060, 40901170), 国家(863计划)项目(2006AA10Z213)和长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0409)资助

作者简介: 谢东辉, 1976年生, 北京师范大学地理学与遥感科学学院讲师 e-mail: xiedonghui@bnu.edu.cn

©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率, 及叶片的等效折射率和表面粗糙度。为进一步分析叶片生理生化参数与其偏振特性之间的定量关系提供有力工具。

1 多角度偏振反射分布实验测量与数据分析

利用中科院长春光学精密机械研究所研制的多角度观测装置^[16]可以方便地测得植物单叶多角度偏振反射分布数据。该仪器将入射光源和探测器分别布置在两个可以沿轴心转动的半圆弧上。其中, 光源入射角的变化范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$, 间隔 10° ; 7 个探测器分别固定在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 观测天顶角范围内(间隔 10°), 并可沿方位角旋转($0 \sim 350^\circ$, 间隔 10°)。

测量时分 A 和 B 两个波段, A 波段波长为 $630 \sim 690$ nm, B 波段波长为 $760 \sim 1100$ nm。同时, 该仪器还可以加装偏振片, 测量 0° 偏振和 90° 偏振两种状态。 0° 偏振是指偏振光透光轴方向, 而 90° 偏振是指消光轴方向。对于植物叶片, A 波段刚好在其吸收谷附近, 其信号比较弱。因此, 本研究主要利用 B 波段(近红外)的测量数据进行研究。

我们选择了玉米嫩叶(第一片全展叶), 玉米成熟叶(从上向下第七片全展叶)和一品红叶进行测量。其中, 玉米嫩叶黄绿色, 叶片薄, 表面叶毛较多; 玉米成熟叶深绿色, 叶片厚, 表面比较光滑; 而一品红叶为红色, 表面凸凹不平, 比较粗糙。

在相同入射角条件下, 对上述叶片分别测量无偏, 0° 偏振和 90° 偏振三种状态的半球空间反射强度分布, 则叶片的方向反射率因子 $BRDF^{leaf}$ 可以通过下式计算

$$BRDF^{leaf} = \frac{I^{leaf}}{I_{sample}} BRDF^{sample} \quad (1)$$

其中, I^{leaf} 和 I_{sample} 分别代表叶片和朗伯白板测量到的相应位置处的反射强度。 $BRDF^{sample} = \rho_0/\pi$, 为朗伯白板($BaSO_4$)的 BRDF 值, ρ_0 为朗伯白板的漫反射率, 在计算过程中近似为 1.0。

根据前人对叶片方向反射率分布的测量和分析, 叶片表面(特别是玉米叶片)反射的非朗伯性非常明显, 其镜面反射峰值随着入射角度的增加而增大^[10, 11, 13, 14]。

2 叶片表面 pBRDF 物理模型

叶片的 BRDF 可以用漫反射分量和镜面反射分量之和来表示^[14], 即

$$BRDF^{leaf} = BRDF_{diff}^{leaf} + BRDF_{spec}^{leaf} \quad (2)$$

其中, 漫反射分量可以用朗伯模型解释和计算, 即 $BRDF_{diff}^{leaf} = k/\pi$ 。其中称 k 为朗伯系数, 与入射角度无关, 可以通过积分球测量, 或利用 PROSPECT 模型等单叶光谱模拟模型计算^[7]。模拟叶片镜面反射分量则相对复杂。Bousquet 等提出了一个基于 Cook-Torrance 光照模型的物理模型, 考虑了叶片表面的粗糙度和等效折射率对镜面反射分量的影响, 并成功的模拟了月桂树、山毛榉、榛树叶片的 BRDF^[7]。在此我们继续沿用该模型的形式, 通过在模型中耦合偏振的菲涅尔因子, 将模型延伸到模拟偏振反射区域。

模型假设叶片表面由很多朝向不同的、类似镜面的小面

元组成。根据几何光学原理, 叶片的镜面反射分布的 BRDF 模型可以表示为几何衰减因子 G , 菲涅尔因子 F , 概率密度函数 D 三个部分的乘积, 具体形式为

$$BRDF_{spec}^{leaf}(\theta_i, \theta_v, \phi_v) = \frac{F(n, \theta_a) G(\theta_i, \theta_v, \phi_v)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_v} \quad (3)$$

$$D(\alpha, \phi) \propto \frac{S_f N_f}{S}$$

其中, S 是叶片表面的光照面积, N_f 是小面元的个数; S_f 表示小面元的面积; (α, ϕ) 表示小面元相对于叶片表面的天顶角和方位角, $(\theta_i, \theta_v, \phi_v)$ 分别表示入射天顶角, 观测天顶角, 和相对方位角。

为了将该 BRDF 模型拓展到偏振域, 目前有两种方法, 一种是利用模型中菲涅尔因子的偏振形式; 另一种是利用 Mueller 矩阵将标量的 BRDF 转换为矢量形式。根据测量数据和叶片的特性, 我们选择第一种方法进行 pBRDF 建模。

下面分别给出镜面反射模型中的几何衰减因子、菲涅尔因子和概率密度函数的形式。几何衰减因子 G 与入射和观测方向有关, 具体形式如下

$$G(\theta_i, \theta_v, \phi_v) = \min(1, E_1, E_2)$$

$$\text{其中} \begin{cases} E_1 = \frac{2 \cos \alpha \cos \theta_i}{\cos \theta_a} \\ E_2 = \frac{2 \cos \alpha \cos \theta_v}{\cos \theta_a} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\cos \alpha = (\cos \theta_i + \cos \theta_v)/2 \cos \theta_a$, $\cos 2\theta_a = \cos \theta_i \cos \theta_v + \sin \theta_i \sin \theta_v \cos \phi_v$ 。

菲涅尔因子 F 决定叶片表面光反射的比率, 取决于入射角和介质的折射率的性质。根据麦克斯韦方程组和边界条件推出的菲涅尔公式给出如下(0 和 90° 分别表示平行和垂直于入射面的偏振状态)

$$F_{0^\circ} = \left[\frac{n \cdot \cos \theta - \cos \theta_t}{n \cdot \cos \theta + \cos \theta_t} \right]^2 = \frac{\tan^2(\theta - \theta_t)}{\tan^2(\theta + \theta_t)}$$

$$F_{90^\circ} = \left[\frac{\cos \theta - n \cdot \cos \theta_t}{\cos \theta + n \cdot \cos \theta_t} \right]^2 = \frac{\sin^2(\theta - \theta_t)}{\sin^2(\theta + \theta_t)} \quad (5)$$

θ 表示入射光的本地入射角, θ_t 表示折射角, 由 Snell 定律有 $\sin \theta_t = \sin \theta / n$ 。

无偏的菲涅尔反射函数公式如下

$$F(n, \theta) = (F_{0^\circ} + F_{90^\circ})/2 \quad (6)$$

归一化的概率密度函数 D 表示小面元的法线方向在 (α, ϕ) 的概率。在单位立体角 $d\Omega$ 内, 具有 (α, ϕ) 方向的小面元的概率为 $D(\alpha, \phi) d\Omega$ 。它与叶片表面光照面积之间的关系如下

$$S = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \alpha N_f D(\alpha, \phi) \sin \alpha d\alpha d\phi$$

若表面粗糙度为高斯分布, 则概率密度函数 D 以及 $S_f N_f / S$ 因子相乘可以表示为如下形式

$$D(\alpha, \phi) \times \frac{S_f N_f}{S} = \frac{\exp\left[-\frac{\tan^2 \alpha}{\sigma^2}\right]}{\sigma^2 \cos^4 \alpha} \quad (7)$$

其中, σ 为表面粗糙度。为了表述方便, 将上式结果用 $D(\alpha, \phi)$ 来表示。

最终的叶片镜面反射率模型形式为

$$BRDF_{spec}^{leaf}(\theta_i, \theta_v, \phi_v, n, \sigma) = \frac{F(n, \theta_a) G(\theta_i, \theta_v, \phi_v) D(\alpha, \phi)}{2\pi^2 \cos \theta_i \cos \theta_v} \quad (8)$$

如果考虑偏振, 则完整的 0° 和 90° 偏振 BRDF 公式写为

$$pBRDF^0(\theta_i, \theta_v, \phi_v, k, n, \sigma) = \frac{k}{\pi} + \frac{F_0(n, \theta_a) G(\theta_i, \theta_v, \phi_v) D(\alpha, \sigma)}{2\pi^2 \cos\theta_i \cos\theta_v}$$

$$pBRDF^{90^\circ}(\theta_i, \theta_v, \phi_v, k, n, \sigma) = \frac{k}{\pi} + \frac{F_{90^\circ}(n, \theta_a) G(\theta_i, \theta_v, \phi_v) D(\alpha, \sigma)}{2\pi^2 \cos\theta_i \cos\theta_v}$$

(9)

对于任意偏振角度 $\times$, 根据马吕斯定律, 偏振 BRDF 公式可以表达为

$$pBRDF(\theta_i, \theta_v, \phi_v, k, n, \sigma, \times) =$$

$$\cos^2 \times \times BRDF^{0^\circ} + \sin^2 \times \times BRDF^{90^\circ} = \frac{k}{\pi} +$$

$$\min f(k, n, \sigma) = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_v} \sum_{\phi_v} \omega [pBRDF_m^s(\theta_i, \theta_v, \phi_v) - pBRDF^s((\theta_i, \theta_v, \phi_v, k, n, \sigma))]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_v} \sum_{\phi_v} \omega [pBRDF_m^s(\theta_i, \theta_v, \phi_v)]^2}$$

(11)

其中, $pBRDF_m^s(\theta_i, \theta_v, \phi_v)$ 为实验测量值, $pBRDF^s((\theta_i, \theta_v, \phi_v, k, n, \sigma))$ 为模型模拟值, 上脚标 s 表示偏振状态, ω 为权重因子。为了使模型在镜面反射峰附近拟合的更好, 我们选

$$\frac{(\cos^2 \times \times F_{90^\circ} + \sin^2 \times \times F_0) G(\theta_i, \theta_v, \phi_v) D(\alpha, \sigma)}{2\pi^2 \cos\theta_i \cos\theta_v}$$

(10)

这个表达式只是一个简化的叶片镜面反射率分布模型, 叶表面的叶毛、叶脉等表面特征都未考虑。

3 参数反演与结果分析

在该叶片 BRDF 模型中共有三个未知参数, 分别为朗伯系数 k , 等效折射率 n , 表面粗糙度 σ 。模型参数选择的最佳标准是模拟与实验数据的标准均方差最小。因此, 目标函数设为

择 $\cos(\theta_i - \theta_v)$ 作为权重因子参与优化反演。由于该目标函数是非线性的, 我们选择遗传算法进行参数反演, 反演的参数结果如表 1 所示。

Table 1 Parameters by model inversion

Sample	Diffuse reflectivity/ k	Refractive index/ n	Surface roughness/ σ	Error/($f \times 100\%$)
Zea mays L., young leaf	0.437 1	1.814 3	0.156 9	6.73
Zea mays L., mature leaf	0.490 2	1.793 7	0.133 9	6.66
E. palcherrima willd	0.149 1	1.610 0	0.170 6	4.26

从反演的参数可见, 玉米嫩叶的漫反射率略小于玉米成熟叶, 这与叶片内部结构和色素含量等有关。首先, 玉米嫩叶叶肉结构比较薄, 因此透过率相对比较高, 而反射率则一般要略低于玉米成熟叶。其次, 由于玉米嫩叶中叶绿素含量低于玉米成熟叶, 也导致了玉米嫩叶在近红外波段的反射率要低于玉米成熟叶。一品红叶内部缺乏叶绿素, 整个叶片呈红色, 因此在近红外波段的漫反射率远低于玉米叶片的漫反射率。叶片的等效折射率与叶片表皮组织结构和含水量等有关, 它主要决定叶片镜面反射峰值的大小。玉米嫩叶与玉米成熟叶属于同种植被, 因此其等效折射率基本相同, 与一品红叶的等效折射率差别则较大。表面粗糙度主要表征叶片表面的光滑程度, 它可以决定叶片表面镜向峰值的宽度范围。在三者中, 玉米嫩叶表面有细微绒毛, 因此, 其表面粗糙度

大于玉米成熟叶。从表观来看, 玉米成熟叶的表面比玉米嫩叶要光滑, 这可以很好解释为什么玉米成熟叶的镜面反射更明显。一品红叶表面有很多突起, 因此表面粗糙度最大。

图 1 给出了利用三种叶片表面反演参数进行模拟的方向反射比值与实测值在主平面的比较, 由于在主平面向后测量中有遮挡, 因此只选择了前向测量数据的比较。图中从上至下分别表示入射天顶角为 30° , 40° 和 50° 。从图中可见, 模拟值与实测值拟合的还是比较好的, 特别是在小观测天顶角方向。在大观测天顶角方向上, 特别是当入射天顶角较大时, 在大于镜面反射方向观测到的值一般都大于模拟值。这主要是由于角度偏移, 即当入射天顶角较大时, 对于一定粗糙表面, 其镜向峰值通常会向大角度方向偏移^[17]。例如, 图 1 中 0° 和 50° 入射时, 在 60° 观测结果都明显大于模拟值, 甚至有

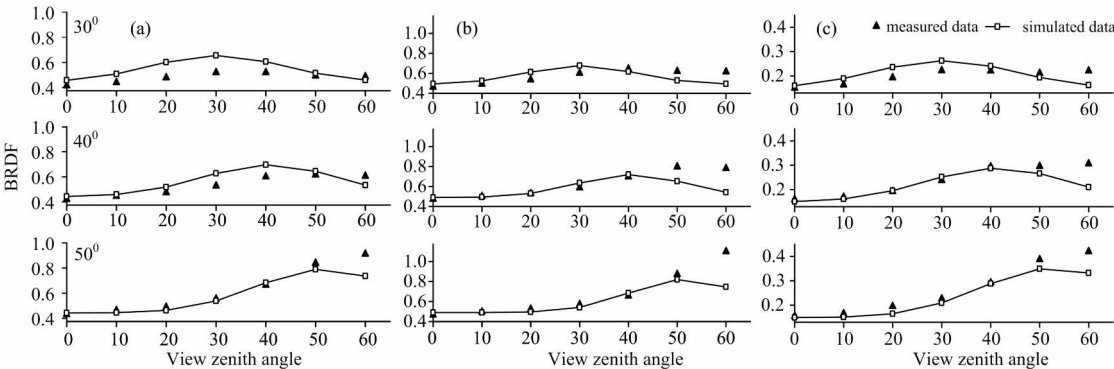


Fig 1 Comparison between simulated and measured unpolarized reflectance

(a): Zea mays L., young leaf; (b): Zea mays L., mature leaf; (c): E. palcherrima willd

些值还要大于镜面反射峰值。一方面是由于角度偏移, 另一方面, 也不能排除我们测量中引入的误差扩大了这种现象。如果要提高模拟精度, 还有待对使用的模型做进一步的改进。

限于篇幅, 我们在此仅给出了部分主平面向偏的方向反射率结果比较。实际上, 除了在镜面反射峰值和前向大观测角度处的偏差较大, 其他观测方向的模拟值与实测值符合的更好。而 0° 和 90° 偏振的测量值与模拟值的比较结果与此类似, 在此不再一一列出。

4 结 论

本文利用偏振的菲涅尔因子, 将 Cook Torrance 模型拓展为偏振的方向反射率模型, 并用于模拟叶片表面的偏振反

射分布。该模型主要由入射角度、观测角度、漫反射率、等效折射率和表面粗糙度, 以及偏振方向五个参数决定[式(10)]。根据测量的玉米叶片和一品红叶片表面的偏振反射率分布数据, 利用建立的 pBRDF 模型进行了参数反演, 得到了近红外波段叶片漫反射率和叶片表面等效折射率和表面粗糙度。通过模拟值与实测值的比较发现, 该 pBRDF 模型可以较好地模拟植被叶片的偏振反射分布特征。

该 pBRDF 模型具有一定物理含义, 因此模型中的参数与植物叶片的生理生态特性相关, 利用叶片表面的 pBRDF 模型进一步定量分析叶片表面方向偏振特性, 将偏振特性与植物叶片生理生态参数建立定量关系是我们下一步的工作。

致谢: 感谢东北师范大学赵云升教授和杜嘉同学在实验方面给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Hong, ZHU Qi-jiang(张红, 朱启疆). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1997, 1(Supp. 1): 36.
- [2] Jacquemoud S, Ustin S L. Proc. 8th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing, Aussois (France), 2001. 223.
- [3] Ustin S L, Jacquemoud S, Govaerts Y. Plant Cell Environment, 2001, 24: 1095.
- [4] Jacquemoud S, Baret F. Remote Sens. Environ., 1990, 34: 75.
- [5] Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, et al. Remote Sens. Environ., 1996, 56: 194.
- [6] Dawson T P, Curran P J, Plummer S E. Remote Sens. Environ., 1998, 65: 50.
- [7] Bousquet L, Lachérade S, Jacquemoud S, et al. Remote Sens. Environ., 2005, 98: 201.
- [8] Brakke T W, Smith J A, Harnden J M. Remote Sens. Environ., 1989, 29: 185.
- [9] Walter Shea E A, Norman J M, Blad B L. Remote Sens. Environ., 1989, 29: 161.
- [10] SONG Kai-shan, ZHAO Yun-sheng, JIN Lun(宋开山, 赵云升, 金伦). Journal of Northeast Normal University(Natural Science)(东北师范大学学报·自然科学版), 2000, 32(4): 112.
- [11] Grant L, Daughtry C S T, Vanderbilt V C. Purdue Univ., LARS Tech. Rep. 081583, 1983.
- [12] Govaerts Y M, Jacquemoud S, Verstraete M M, et al. Appl. Optics, 1996, 35(33): 6585.
- [13] Grant L. Remote Sens. Environ., 1987, 22: 309.
- [14] ZHAO Yun-sheng, HUANG Fang, JIN Lun, et al(赵云升, 黄方, 金伦, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2000, 4(2): 131.
- [15] XU Xi-ru(徐希孺). Physics of Remote Sensing(遥感物理). Beijing: Peking University Press(北京: 北京大学出版社), 2005.
- [16] JIN Xi-feng, QIAO De-lin, ZHOU Si-xiang(金锡峰, 乔德林, 周素香). The Measuring Device for Bidirectional Polarized Reflectance, Patent No. 96239489.0(地物偏振二向性反射比测量装置, 专利号: 96239489.0), 1998.
- [17] Torrance K E, Sparrow E M. J. Heat Transfer C, 1966, 88: 223.

Modeling Polarimetric BRDF of Leaves Surfaces

XIE Dong hui¹, WANG Pei-juan², ZHU Qi-jiang¹, ZHOU Hong-min¹

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences 100081, China

Abstract The purpose of the present paper is to model a physical polarimetric bidirectional reflectance distribution function (pBRDF), which can character not only the non-Lambertian but also the polarized features in order that the pBRDF can be applied to analyze the relationship between the degree of polarization and the physiological and biochemical parameters of leaves

quantitatively later. Firstly, the bidirectional polarized reflectance distributions from several leaves surfaces were measured by the polarized goniometer developed by Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. The samples of leaves include two pieces of *zea mays* L. leaves (young leaf and mature leaf) and a piece of *E. palcherrima* wild leaf. Non Lambertian characteristics of directional reflectance from the surfaces of these three leaves are obvious. A Cook-Torrance model was modified by coupling the polarized Fresnel equations to simulate the bidirectional polarized reflectance properties of leaves surfaces. The three parameters in the modified pBRDF model, such as diffuse reflectivity, refractive index and roughness of leaf surface were inversed with genetic algorithm (GA). It was found that the pBRDF model can fit with the measured data well. In addition, these parameters in the model are related with both the physiological and biochemical properties and the polarized characteristics of leaves, therefore it is possible to build the relationships between them later.

Keywords Leaf; BRDF; Polarization; *Zea mays* L.; Roughness

(Received Jan. 22, 2010; accepted Apr. 26, 2010)