

# 基于多角度偏振相机的城市典型地物双向反射特性研究\*

谢东海<sup>1)2)</sup> 顾行发<sup>1)</sup> 程天海<sup>1)†</sup> 余涛<sup>1)</sup> 李正强<sup>1)</sup> 陈兴峰<sup>1)</sup> 陈好<sup>1)2)</sup> 郭婧<sup>1)2)</sup>

1) (遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011年4月12日收到; 2011年7月25日收到修改稿)

基于高空间分辨率多角度偏振相机 (directional polarimetric camera, DPC) 获取的中国珠江三角地区典型地表多角度航空数据, 在航空尺度上反演得到城市区域四种典型地物的三种半经验双向反射率 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 模型的参数, 并对模型精度进行分析. 结果表明, 三种半经验 BRDF 模型对多角度反射率数据都有较好的拟合能力, 其中, Ross-Li 模型对森林类型的拟合误差最小, Ross-Roujean 模型对裸土类型的拟合误差最小, RPV 模型对城市和灌木类型的拟合误差最小. 在此基础上, 重点分析了四种城市典型地物高空间分辨率的双向反射特性, 研究发现, 不同地物的反射率存在差别, 但整体趋势都随着散射角的变大而变大. 城市区域典型地物类型双向反射特性的研究, 将为基于遥感数据探测地表和大气物理光学参数提供理论支持.

**关键词:** 多角度偏振相机, 双向反射率分布函数, 定量遥感, 核函数

**PACS:** 78.20.Ci

## 1 引言

地球表面物体对太阳短波辐射的反射和散射是属于非朗伯体性质, 并非各向同性, 而是具有明显的方向性, 可以用双向反射率分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 来精确定义. 在定量遥感中, 传统的气溶胶遥感往往将地表反射假设为朗伯体, 导致气溶胶反演误差较大, 因此地表双向反射率是气溶胶反演的一个关键问题<sup>[1-6]</sup>. 此外, 地表双向反射率分布函数可以用来进行陆表类型的分类<sup>[7,8]</sup>, 叶面积指数和其他生物物理参数反演<sup>[9,10]</sup>, 地气耦合系统的大气纠正<sup>[11]</sup>等. 目前, 国际和国内已经研究了多种基于航空和卫星数据的 BRDF 模型. 总的说来可以分为三类: 物理模型, 经验模型和半经验模型, 其中半经验模型被广泛使用<sup>[12-16]</sup>. 在模型验证方面, Maigen<sup>[17]</sup>利用 POLDER 数据来详细比较了不同的 BRDF

模型对数据的拟合能力, 结果显示 Rahman-Pinty-Verstraete (RPV) 模型<sup>[13]</sup> 和 Ross-Li 模型<sup>[15,16]</sup> 都可以很好地反映 POLDER 获取的多角度反射率数据. 但 Maigen 在分析中忽略了气溶胶的影响, 气溶胶被当作伪噪声会在拟合中对 BRDF 模型参数造成影响, 因此其分析结果难以在气溶胶反演中得到应用. Litvinov<sup>[18]</sup> 利用 RSP 获得的多角度反射率数据重点研究了常用半经验 BRDF 模型对植被和裸土数据的模拟能力, 并分析了地表 BRDF 的模型误差对气溶胶反演精度的影响. 但 RSP 尚未获得任何中国地区的地表反射率数据, NASA 的 Glory 计划搭载的 APS<sup>[19]</sup> 传感器原型来自 RSP, 但由于各种原因至今尚未成功发射升空.

到目前为止, 针对中国地区典型地物进行航空飞行来获取高分辨率多角度反射率数据的实验较少, BRDF 模型研究大多集中在对理论模型的改进, 模型验证使用的数据主要依靠地面辐射计测量或

\* 国家重点基础研究发展计划 (“973 计划”) (批准号: 2010CB950800) 和国家自然科学基金 (批准号: 41001207) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KZCX2-EW-QN311) 资助的课题.

† E-mail: cyhy@irsa.ac.cn

者国外的卫星数据. 高空间分辨率多角度偏振相机 (directional polarimetric camera, DPC) 是国内首个自主研发和设计的高分辨率宽幅 (图像分辨率为  $1024 \times 1024$ , 在 4000 m 航空高度, 地面分辨率为 4 m) 航空多角度偏振相机, DPC 包括三个用来测量偏振的波段 (490 nm, 665 nm, 865 nm) 和一个全色波段. DPC 的设计目的是可以从多个角度和多个波段来获得大气、地表的非偏和偏振信息, 从而更准确地反演大气的光学属性和地表的方向反射特性. 本文基于 DPC 获取的珠三角地区 (广东省中山市) 的多种典型地物的高分辨率多角度反射数据, 评价了三种常用半经验 BRDF 模型对多角度数据的模拟能力, 在此基础上分析了典型地物多角度反射率的特点. 其研究对象不仅包括植被和裸土, 还扩展到城市建筑和灌木, 本文的研究可以为将来高分辨率多角度数据更广泛的应用提供理论依据和数据支持.

## 2 半经验 BRDF 模型

地表反射的本质属性可以用二向反射矩阵  $\mathbf{R}$  (bidirectional reflection matrix, BRM) 来描述, 二向反射矩阵提供了入射的辐射场与散射的斯托克斯参数 (Stokes parameters) 之间的联系 [6]:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{\pi} \mathbf{R}(\lambda, \theta_v, \theta_0, \phi) \mathbf{I}_0(\lambda) \cos \theta_0, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{I} = [I, Q, U, V]^T$  是散射后的斯托克斯参数,  $\mathbf{I}_0 = [I_0, Q_0, U_0, V_0]^T$  总的入射辐照度.  $\lambda$  为入射与散射的波长,  $\phi$  为相对方位角:  $\phi = \varphi_v - \varphi_0$ ,  $\varphi_0, \varphi_v$  分别为太阳与观测方位角.  $\theta_0, \theta_v$  分别为太阳与观测天顶角. 当入射光线为非偏振光时,  $\mathbf{R}$  矩阵中的元素  $R_{11}$  代表了总的反射率 (常用  $R_I$  来代替),  $R_{21}$  和  $R_{31}$  代表了偏振反射率 ( $R_p$ ):

$$I = \frac{1}{\pi} R_I(\lambda, \theta_v, \theta_0, \phi) F_0(\lambda) \cos \theta_0, \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{\pi} R_{21}(\lambda, \theta_v, \theta_0, \phi) F_0(\lambda) \cos \theta_0, \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{\pi} R_{31}(\lambda, \theta_v, \theta_0, \phi) F_0(\lambda) \cos \theta_0, \quad (4)$$

$$R_p(\lambda, \theta_v, \theta_0, \phi) = \sqrt{R_{21}^2 + R_{31}^2}, \quad (5)$$

式中的  $F_0$  代表了垂直与入射光线方向单位面积上的入射通量. 上述反射率与偏振反射率定义被广泛使用 [14,20].

在 MISR(multi-angle imaging spectroradiometer), MODIS (moderate resolution imaging spectro-radiometer), POLDER (polarization and directionality of earth's reflectances) 传感器的地表反射率处理中, Rahman-Pinty-Verstraete (RPV) 模型, Ross-Li 模型和 Ross-Roujean 模型三种 BRDF 模型常被使用. RPV 模型是一个非线性的 BRDF 模型 [13], 公式为

$$R_I(\lambda, \theta_v, \theta_0, \phi) = \frac{(\cos \theta_0 \cos \theta_v)^{k-1}}{(\cos \theta_0 + \cos \theta_v)^{1-k}} \rho_0(\lambda) F(\gamma) \times (1 + R(G)), \quad (6)$$

$$F(\gamma) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \gamma)^{1.5}}, \quad (7)$$

$$1 + R(G) = 1 + \frac{1 - \rho_0}{1 + G}, \quad (8)$$

$$G = \sqrt{\tan^2 \theta_0 + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_0 \tan |\theta_v| \cos \phi}, \quad (9)$$

式中,  $\rho_0, g$  和  $k$  为模型的参数,  $\gamma$  为散射角.  $F(\lambda)$  为 Henyey-Greenstein 相函数,  $(1 + R(G))$  用来模拟热点效应. RPV 模型参数和地表散射的物理参数之间并没有直接联系, 并满足互易性, 即将  $\theta_0, \theta_v$  交换后模型值不会改变.

核驱动模型可以表达为  $f_{\text{iso}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{geom}}$  三个核函数的线性组合, 三个核分别代表各向同性散射, 体散射和几何光学散射 [14,16]

$$\begin{aligned} R_I(\lambda, \theta_v, \theta_0, \phi) &= f_{\text{iso}}(\lambda) + k_1(\lambda) f_{\text{geom}}(\theta_v, \theta_0, \phi) \\ &+ k_2(\lambda) f_{\text{vol}}(\theta_v, \theta_0, \phi). \end{aligned} \quad (10)$$

在基于航空和卫星数据的 BRDF 研究中, Ross-thick 核常用作体散射核  $f_{\text{vol}}(\theta_v, \theta_0, \phi)$  [14,16], 这个核的推导来自辐射传输理论的单次散射模拟, 模拟中假设每层的朝向是无序的, 每层包含了许多随机分布的反射率和透过率相同的小片. 多次散射经常被看作各向同性散射, 可以用核  $f_{\text{iso}}$  来描述.  $f_{\text{vol}}(\theta_v, \theta_0, \phi)$  可以写为

$$f_{\text{vol}}(\theta_v, \theta_0, \phi) = \frac{(\pi/2 - \gamma) \cos \gamma + \sin \gamma}{\cos \theta_v + \cos \theta_0} - \frac{\pi}{4}. \quad (11)$$

Ross-Roujean 和 Ross-Li 模型的区别在于几何光学散射核  $f_{\text{geom}}$  的描述不同, Roujean 的几何散射核没有包含其他的模型参数, 依赖于光照和观测几何,

可以写为

$$f_{\text{geom}}^{\text{Rouj}}(\theta_v, \theta_0, \phi) = \frac{1}{2\pi}[(\pi - \phi') \cos \phi' + \sin \phi']$$

$$\tan \theta_0 \tan |\theta_v| - \frac{1}{\pi}(\tan \theta_0 + \tan |\theta_v| + G), \quad (12)$$

式中  $\phi' = |\varphi_v - \varphi_0|$ , 取值范围为  $0 \leq \phi' \leq \pi$ . Ross-thick 的体散射与 Roujean 的几何核满足互易性, 因此 Ross-Roujean 模型也满足互易性.  $G$  的定义与 (9) 式相同.

在几何核描述中, Li-dense 核 ( $f_{\text{geom}}^{\text{LiDen}}$ ) 与 Li-sparse 核 ( $f_{\text{geom}}^{\text{LiSp}}$ ) 经常被使用 [16], 其描述为

$$f_{\text{geom}}^{\text{LiSp}}(\theta_v, \theta_0, \phi)$$

$$= O(\theta_v, \theta_0, \phi) - \sec \theta'_v - \sec \theta'_0$$

$$+ \frac{1}{2}(1 - \cos \theta') \sec \theta'_v \sec \theta'_0, \quad (13)$$

$$f_{\text{geom}}^{\text{LiDen}}(\theta_v, \theta_0, \phi)$$

$$= \frac{(1 - \cos \theta') \sec \theta'_v \sec \theta'_0}{\sec \theta'_v + \sec \theta'_0 - O(\theta_v, \theta_0, \phi)}, \quad (14)$$

$$O = \frac{1}{\pi}(t - \sin t \cos t)(\sec \theta'_v + \sec \theta'_0), \quad (15)$$

$$\cos t = \frac{h \sqrt{D^2 + (\tan \theta'_0 \tan \theta'_v \sin \phi)^2}}{b \sec \theta'_v + \sec \theta'_0}, \quad (16)$$

$$D = \sqrt{\tan^2 \theta'_0 + \tan^2 \theta'_v - 2 \tan \theta'_0 \tan \theta'_v \cos \phi}, \quad (17)$$

$$\cos \theta' = -\cos \theta'_0 \cos \theta'_v - \sin \theta'_0 \sin \theta'_v \cos \phi, \quad (18)$$

$$\theta'_v = \tan^{-1} \left( \frac{b}{r} \tan |\theta_v| \right),$$

$$\theta'_0 = \tan^{-1} \left( \frac{b}{r} \tan \theta_0 \right). \quad (19)$$

如果  $|\cos t| > 1$  那么就置为 0.  $f_{\text{geom}}^{\text{LiSp}}$  与  $f_{\text{geom}}^{\text{LiDen}}$  都包含两个参数  $h/b$  和  $b/r$ , 这两个参数在线性模型中常常被设为定值. 比如 MODIS 的 BRDF 提取算法中使用了  $f_{\text{geom}}^{\text{LiSp}}$ , 并设  $h/b = 2$ ,  $b/r = 1$ . 本文的 Ross-Li 模型中的  $h/b$  与  $b/r$  分别设置为 2 和 1, 与 MODIS 的 BRDF 提取算法中的参数一致.

### 3 数据描述和处理

将 DPC 相机安装在飞机上面, 在珠三角地区 (广东中山市) 进行了两次飞行试验. DPC 相机与 POS 系统连接, 不仅可以准确控制航拍重叠度, 还能够实时获得每张相片的相机姿态和位置信息. 配合航飞拍摄, 地面实验用 CE318 太阳光度计来对大气进行观测, 以获得飞行时刻的大气气溶胶光学厚度, 气溶胶粒子谱分布, 复折射指数等信息. 太阳光度计架设在中山市莫泰酒店的顶楼, 经度:  $113^\circ 22' 59.63140''$ , 纬度:  $22^\circ 30' 57.46574''$ . 具体的飞行数据见表 1.

表 1 飞行数据

飞行编号	飞行时间 (UTC)	气溶胶光学厚度 (865 nm)	飞行高度 /km	观测几何
1	03/12/2009	0.41	4.0	$\theta_0 = 46.5^\circ(\pm 1^\circ)$ , $0^\circ \leq \theta_v \leq 40^\circ$
	03:00-04:00			$0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ , $95^\circ \leq \Theta \leq 175^\circ$
2	04/12/2009	0.43	4.0	$\theta_0 = 61^\circ(\pm 1^\circ)$ , $0^\circ \leq \theta_v \leq 40^\circ$
	06:25-07:45			$0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ , $80^\circ \leq \Theta \leq 160^\circ$

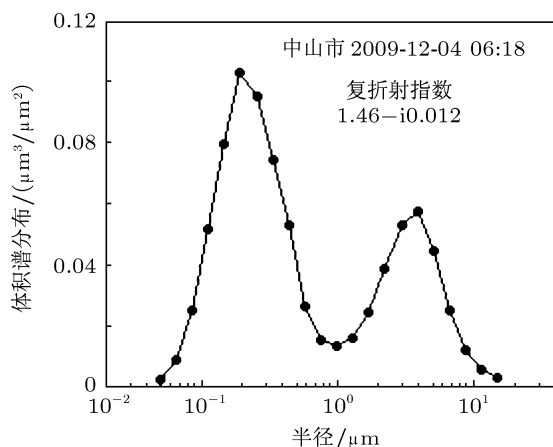


图 1 CE318 在中山市反演得到的粒子谱分布和复折射指数

根据几何信息以及 CE318 测量的气溶胶信息, 可以建立查找表并结合 POS 提供的几何信息对 DPC 数据进行大气纠正, 从而获得同一地物在不同航拍位置的反射率数据. 大气纠正的原理为

$$R_\lambda^{\text{Meas}}(z, \theta_0, \theta_v, \phi) = R_\lambda^{\text{Atm}}(z, \theta_0, \theta_v, \phi)$$

$$+ R_\lambda^{\text{Surf}}(\theta_0, \theta_v, \phi) \cdot T_\lambda^\downarrow(\theta_0) T_\lambda^\uparrow(\theta_v), \quad (20)$$

其中,  $R_\lambda^{\text{Atm}}(z, \theta_0, \theta_v, \phi)$  代表黑体上空的大气贡献 (即程辐射反射率),  $R_\lambda^{\text{Surf}}(\theta_0, \theta_v, \phi)$  为地表二向反射率, 即 BRDF,  $\lambda$  代表波长.  $T_\lambda^\downarrow(\theta_s)$  和  $T_\lambda^\uparrow(\theta_v)$  分别代表了向下和向上的透过率. 可以通过下面的方

程来计算:

$$T_{\lambda}^{\downarrow}(\theta_0) = \exp \left[ - \left( \frac{\psi \delta_{0,\lambda}^m + \zeta \delta_{0,\lambda}^a}{\mu_s} \right) \right], \quad (21)$$

$$T_{\lambda}^{\uparrow}(z, \theta_v) = \exp \left[ - \left( \frac{\psi \delta_{\lambda}^m(z) + \zeta \delta_{\lambda}^a(z)}{\mu_v} \right) \right], \quad (22)$$

方程中的  $\mu_v$  是观测天顶角的余弦值,  $\mu_s$  是太阳天顶角的余弦值. 上标  $m$  和  $a$  分别代表分子和气溶胶.  $\delta_{0,\lambda}^m$  和  $\delta_{0,\lambda}^a$  为整层分子与气溶胶的光学厚度,  $\delta_{\lambda}^m(z)$  和  $\delta_{\lambda}^a(z)$  为高度  $z$  下方的分子和气溶胶的光学厚度. 方程 (21) 和 (22) 没有考虑地表和大气之间的多次散射, 而是用两个经验系数  $\psi$  和  $\zeta$  来描述多次散射的影响.  $\psi$  等于 0.9,  $\zeta$  可以由一个经验公式 [21,22] 来计算, 即

$$\zeta = 0.3658 + 0.1023\alpha^* + 0.0080\alpha^{*2}. \quad (23)$$

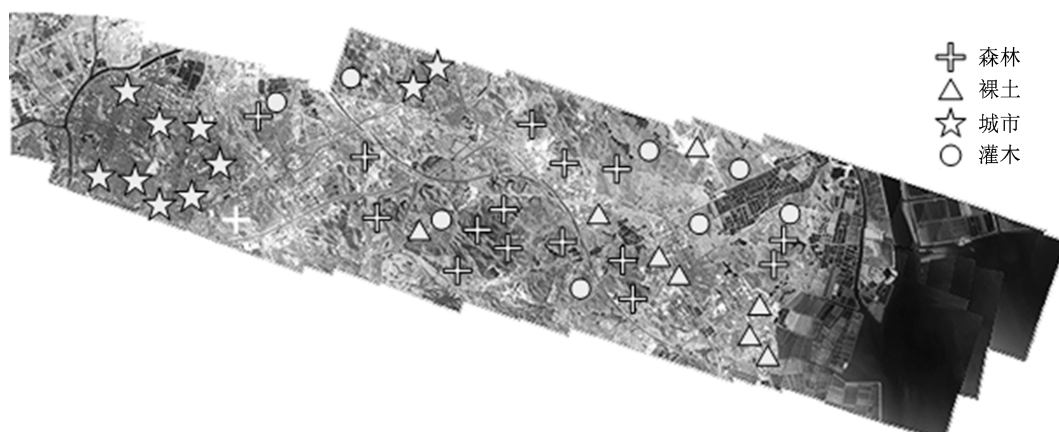


图2 三个航带的正射影像拼接效果

为了尽可能多的获得同一类地物在不同方向的观测数据, 从图 2 中多个位置搜集了同一种地物的反射率数据, 每个位置代表了一个地物在所有观测方向的反射率数据, 可以看作一个数据样本. 图 2 中的 + 代表森林,  $\Delta$  代表裸土,  $\star$  代表城市,  $\circ$  代表灌木. DPC 相机像幅宽, 因此可以采集足够多的覆盖多个观测角度的数据样本来进行 BRDF 模型反演. 表 2 是根据所有角度的数据样本分别用三种 BRDF 模型反演所得结果.

图 4 显示了原始的观测数据和三种模型的模

$R_{\lambda}^{\text{Atm}}(z, \theta_s, \theta_v, \varphi_r)$  可以利用矢量辐射传输方程来准确计算, 常用的矢量辐射传输软件有基于 SOS 的 6SV, 以及基于倍加累加思想的 RT3.

#### 4 结果与分析

12/04/2009 下午飞行时的太阳天顶角较大, 散射角的分布范围比较合理, 本文的实验使用该天的数据. 图 2 为 12/04/2009 飞行时三个航带的数据经过处理后的正射影像拼接效果, 从图中可以看出飞行区域内分布了森林, 裸土, 城市建筑以及灌木等地物类型. 由于 865 nm 波段受大气影响较小, 本文在分析地表的 BRDF 特性时, 使用该波段的反射率数据.

拟数据与散射角的关系, 可以看出三种 BRDF 模型都具有较好的模拟能力, 能够准确的反应不同地表类型在不同角度的反射率变化. 从表 3 可以看出: Ross-Li 模型对森林类型的拟合误差最小, Ross-Roujean 模型对裸土类型的拟合误差最小, RPV 模型对城市和灌木类型的拟合误差最小. 图 3 根据每种地表类型对应的最优 BRDF 模型来绘制出反射率与散射角的对应关系, 模拟的数据点全部位于主平面上 (即相对方位角为  $0^\circ$  或者  $180^\circ$ ).

表2 RPV, Ross-Li, Ross-Roujean 模型反演参数

$\lambda = 865 \text{ nm}$	RPV			Ross-Li			Ross-Roujean		
	$\rho_0(\lambda)$	$g$	$k$	$f_{\text{iso}}$	$k_1(\lambda)$	$k_2(\lambda)$	$f_{\text{iso}}$	$k_1(\lambda)$	$k_2(\lambda)$
森林	0.1925	-0.1164	0.6145	0.3783	0.0289	0.3581	0.3568	0.0199	0.3984
裸土	0.2091	-0.1515	0.5457	0.4279	0.0288	0.5793	0.4371	0.0467	0.5616
城市	0.1159	-0.1423	0.3327	0.2562	0.0133	0.4126	0.2457	0.0088	0.4311
灌木	0.1882	-0.1463	0.8604	0.4335	0.0851	0.2170	0.4140	0.0967	0.2373

表 3 三种 BRDF 模型对不同地表的模拟误差

	RPV	Ross-Li	Ross-Roujean
森林	0.24231745	0.23526941	0.23647379
裸土	0.27955663	0.27584798	0.27429131
城市	0.15695856	0.15853713	0.15901145
灌木	0.25567413	0.26552660	0.26328668

从反演的 BRDF 模型可知: 四种地物类型中, 裸土的地表反射率最高, 其次是植被和灌木, 城市建筑的地表反射率最低. 裸土的反射率变化较大, 原因是在采集裸土反射率数据样本时包括了郊区的一些目标, 与市区裸土相比郊区的裸土目标含水量较大, 而水对 865 nm 光线具有吸收性, 导致这些目标的反射率降低. 城区建筑物目标的地表反射率较低, 原因是城区建筑高低不同, 存在大量的阴影区域. 灌木类型由于同时包含了植被和土壤, 因此

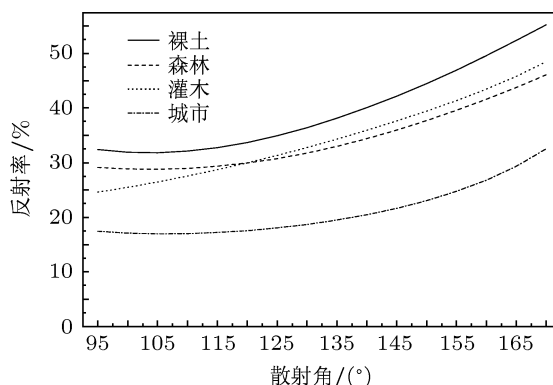


图 3 每种地表类型对应的最优 BRDF 模型

反射率变化也较大, 但是整体上的反射率要高于城市区域. 与其他三类地物不同, 城市目标在散射角变小时, 反射率首先降低, 在 80° 左右开始升高, 这说明城区目标的前向散射较强. 四种地物类型的地表反射率在后向散射方向都要大于前向散射.

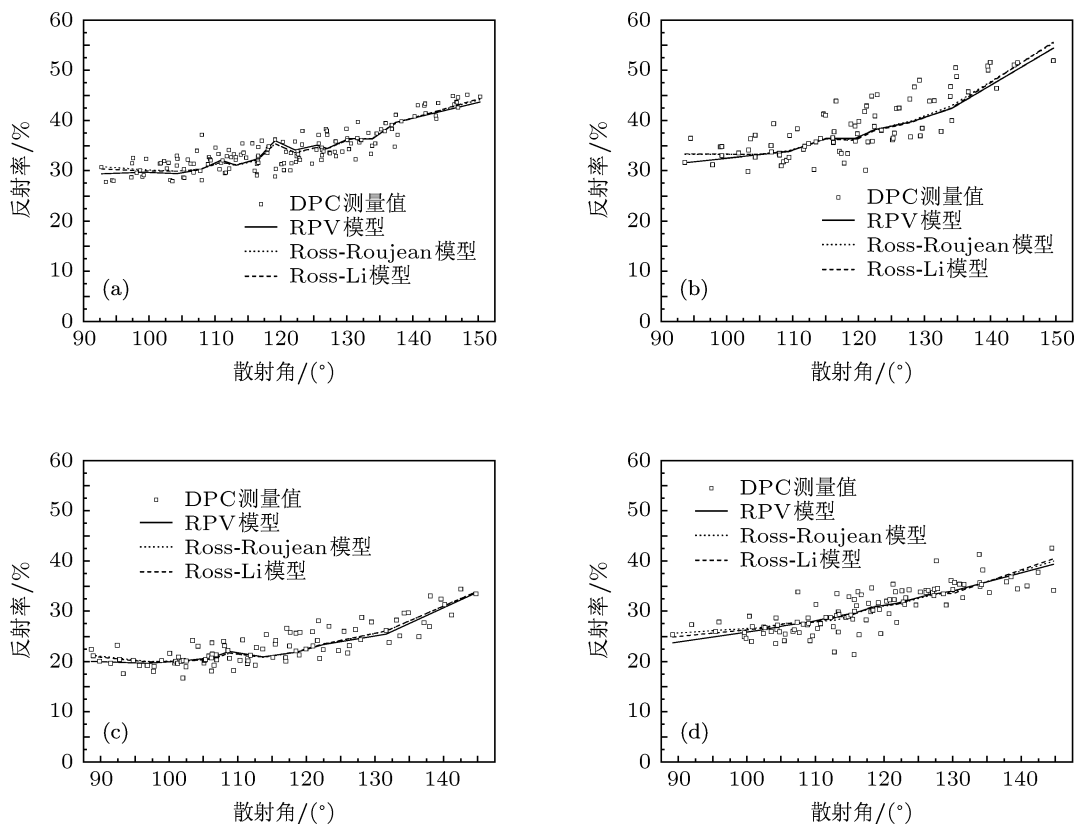


图 4 反射率与散射角关系 (a) 森林; (b) 裸土; (c) 城市; (d) 灌木

## 5 结论

本文对 DPC 航空飞行的观测数据进行大气

纠正得到地表的多角度反射率数据, 反演得到了中国南方地区典型地物的近红外波段 (865 nm) 的 BRDF 模型. 结果表明, RPV 模型, Ross-Li 模

型和 Ross-Roujean 模型都可以较好的模拟四种地表类型 (森林, 裸土, 城市, 灌木) 的多角度反射率数据, 但没有任何一种模型可以在所有地表类型拟合中都保持误差最小. Ross-Li 模型对森林类型的拟合误差最小, Ross-Roujean 模型对裸土类型的拟合误差最小, RPV 模型对城市和灌木类型的拟合误差最小. 相比非线性的 RPV 模型, 线性核驱动模型 (Ross-Li 模型和 Ross-Roujean 模型) 的参数反演过程更加简单和稳定. 四种地物类型中, 裸土的反射率最高, 森林和灌木次之, 城市地区的地表反射率整体偏低. 裸土由于含水量的不

同, 反射率会有波动. 灌木由于包含了植被和土壤, 反射率也不如浓密植被 (如森林) 稳定. 城市区域的阴影会降低反射率, 其反射率随散射角的变化规律与其他三种类型不同, 当散射角变小时首先降低, 然后开始升高. DPC 观测得到的四种地物类型的反射率数据在后向散射方向的反射率都较高, 但由于观测条件限制, 本文的数据未能反映出热点效应. 本文对四种典型地物的多角度反射率数据以及 BRDF 模型的研究, 将为后续高分辨率多角度传感器的应用提供理论验证和数据支持.

- 
- [1] Hasekamp O P, Landgraf J 2007 *Appl. Opti.* **46** 3332
- [2] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, Carlson B E, Chowdhary J, Laci A A, Liu Li, Rossow W B, Travis L D 2007 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **106** 325
- [3] Chowdhary J, Cairns B, Mishchenko M I, Hobbs P, Cota G, Redemann J, Rutledge K, Holben B N, Russel E 2005 *Journal of Atmospheric Sciences* **62** 1093
- [4] Hasekamp O P, Landgraf J 2005 *J. Geophys. Res.* **110** D20207
- [5] Mishchenko M I, Travis L D 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 16989
- [6] Tanre D, Kaufman Y J, Herman M, Mattoo S 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 971
- [7] Hyman A H, Barnsley M J 1997 *Int. J. Remote Sens.* **18** 2471
- [8] Zhang Y, Tian Y, Myneni R B, Knyazikhin Y, Woodcock C E 2002 *Remote Sens. Environ.* **80** 418
- [9] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Diner D J, Myneni R B, Verstraete M M, Pinty B, Gobron N 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 32239
- [10] Bicheron, P, Leroy M 1999 *Remote Sens. Environ.* **67** 251
- [11] Vermote E F, Saleous N E, Justice C O, Kaufman Y J, Privette Y J, Remer L, Roger J C, Tanré D 1997 *J. Geophys. Res.* **102**(D14) 17,131
- [12] Hapke B 1981 *J. Geophys. Res.* **86**(B4) 3039
- [13] Rahman H, Pinty B, Verstraete M M 1993 *J. Geophys. Res.* **98**(D11) 20791
- [14] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y 1992 *J. Geophys. Res.* **97**(D18) 20455
- [15] Li X, Strahler A H 1992 *IEEE T. Geosci. Remote* **30** 276
- [16] Wanner W, Li X, Strahler A H 1995 *J. Geophys. Res.* **100**(D10) 21077
- [17] Maignan F, Breon F M, Lacaze R 2004 *Remote Sens. Environ.* **90** 210
- [18] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B 2011 *Remote Sens. Environ.* **115** 781
- [19] Mishchenko M, Cairns B, Kopp G, Schueler G, Fafaul C, Hansen J 2007 *B. Am. Meteorol. Soc.* **88** 677
- [20] Maignan F, Breon F M, Fedele E, Bouvier M 2009 *Remote Sens. Environ.* **113** 2642
- [21] Waquet F, Leon J F, Cairns B 2009 *Appl. Optics* **48** 1228
- [22] Lafrance B 1997 *Ph. D.* (France: Université des Sciences et Techniques de Lille)

# Research on the bidirectional reflectance of typical urban surface types measured by the directional polarimetric camera\*

Xie Dong-Hai<sup>1)2)</sup> Gu Xing-Fa<sup>1)</sup> Cheng Tian-Hai<sup>1)†</sup> Yu Tao<sup>1)</sup> Li Zheng-Qiang<sup>1)</sup>  
Chen Xing-Feng<sup>1)2)</sup> Chen Hao<sup>1)2)</sup> Guo Jing<sup>1)2)</sup>

1) (State Key Laboratory of Remote Sensing, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

2) (Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 12 April 2011; revised manuscript received 25 July 2011)

## Abstract

This paper deals with the retrieving of the bidirectional reflectance distribution functions (BRDFs) of the distinct urban cover in the Pearl River Delta (PRD) region employing the high-spatial-resolution multi-angle polarized measurements made by the directional polarimetric camera (DPC). The results show that three BRDF models (RPV, Ross-Roujean and Ross-Li) describe the DPC measurements well. Forest is best fitted by Ross-Li and bare soil is best fitted by Ross-Roujean. Urban and shrub are best fitted by RPV. The results demonstrate that the reflectances of different types of surfaces are different and increase with the increase of scattering angle. The basic theory of investigating surface properties using multi-angle measurements is proposed.

**Keywords:** DPC, BRDF, quantitative remote sensing, kernel function

**PACS:** 78.20.Ci

---

\* Project supported by the National Basic Research and Development Programs of China (973 Program) (Grant No. 2010CB950800), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41001207), and the Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (Grant No. KZCX2-EW-QN311).

† E-mail: cyhy@irsa.ac.cn