

文章编号: 1007 4619(2006) 03 0294 05

# 水面溢油的多角度偏振与二向性 反射定量关系研究

赵云升, 吴太夏, 罗杨洁, 赵丽丽, 周启超

(东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

**摘要:** 水面溢油是最常见的水体污染源之一, 在反射、散射和透射电磁辐射的过程中, 将表现与它们自身性质有关的偏振特性。因此, 对水面溢油的多角度偏振信息探测成为水体定量遥感的一种新手段。偏振反射是伴随目标的二向性反射而产生的, 在探测目标地物的二向性反射的同时, 可以通过起偏器获得目标地物偏振态的三维空间分布。本文从多角度偏振遥感机理的角度出发, 研究了水面溢油的多角度偏振反射与二向性反射之间存在的定量关系, 并从实验上验证了其二向性反射、 $45^\circ$ 偏振、偏振均值三者在此  $2\pi$  空间的相应方位角、天顶角、探测角以及通道上的反射比均相等。

**关键词:** 偏振反射; 二向性反射; 多角度; 定量遥感; 溢油污染

**中图分类号:** TP701      **文献标识码:** A

## Research on Quantitative Relation between Polarized Bidirectional Reflectance and Bidirectional Reflectance of Water-surface Oil Spill

ZHAO Yun-sheng WU Tai-xia LUO Yang-jie ZHAO Li-li ZHOU Qi-chao

(College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Jilin Changchun 130024 China)

**Abstract** Water surface Oil Spill is one of the most popular pollution of water. In the process of reflecting scattering and transmitting electromagnetic wave, it can produce polarized characteristics which are related to the nature themselves; therefore detecting Water surface Oil Spill multi-angle polarization information becomes a new method of quantitative remote sensing. For polarized reflectance always goes with bidirectional reflectance, we can attain the polarized three-dimensional spatial distribution of the targets by a polarimeter when detecting its bidirectional reflectance. From the point of view of multi-angle polarized remote sensing mechanism, this paper studied the quantitative relation between polarized BRDF and BRDF of Water surface Oil Spill, and from the experimentations testified its equality of the reflectance of bidirectional reflect, polarized reflect of  $45^\circ$  degree and polarized reflect of mean value in the corresponding azimuth angle, zenith angle, detection angle and detection channels in  $2\pi$  space.

**Key words** polarized reflect; bidirectional reflect; multi-angle; quantitative remote sensing; oil spill pollution

收稿日期: 2004-11-19 修订日期: 2005-05-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-338-1)和国家自然科学基金(49771057)。

作者简介: 赵云升(1948—), 男, 教授, 1975年毕业于东北师范大学数学系。现主要从事遥感基础理论及偏振光遥感研究。已发表论文 40 余篇, 出版专著 1 部, 教材 2 部, 参编专著多部。

## 1 引言

水面溢油污染的遥感监测是一个讨论了很长时间的论题。国外学者已由 20 世纪 80 年代的可见光和红外研究转向 90 年代的微波遥感监测海洋溢油灾害。其中主要是因为可见光和红外光监测溢油受到气候、时相等原因的限制。中国自“六五”以来,相继开展了一些海面溢油航空遥感监测方法研究,取得了许多可喜的成果。但就总体而言,研究程度仍局限在常规的垂直收集目标信息。为此,需要进一步探讨各类油品泄漏到海洋后的漂移、扩散、溶解、蒸发后的各个过程的多角度偏振光谱响应,为识别溢油范围,正确划分油膜厚度,进而为正确估算油量提供技术支持<sup>[1-3]</sup>。

在来自目标地物的辐射中,除了光通量、方向、相位,还有一个重要的物理参量,即物质的偏振性,尚未得到足够的重视和充分的利用。光是电磁波,而且是横波,因此光具有偏振性。自然界存在各种各样的反射起偏器,如水体表面、冰雪、沙漠、云等,经反射后的光具有一定程度的偏振性,太阳光入射到大气层,产生散射,这种散射光也具有一定程度的偏振性。太阳光或经过大气层的天空光照射到地物,被地物反射、折射或散射的电磁辐射也都会变成具有一定偏振态的光波,它们的特性主要表现为:在垂直于光线的那个平面上,光在各个方向上能量分布不均匀,会发生极化现象。地表或大气中的目标地物,在反射、散射和透射电磁辐射的过程中,会产生由它们自身性质决定的偏振特征。偏振光正在为遥感目标识别提供新的手段。美国曾多次进行航天飞机平台上的对地偏振实验,证实了偏振信息在土壤植被分类、大气中气溶胶探测及海水表面状态研究方面所具有的优越性<sup>[4-5]</sup>。偏振光是伴随目标二向性反射而产生的,换言之,目标的偏振反射与二向性反射是一对孪生姊妹<sup>[6]</sup>。多角度偏振反射与二向性反射之间存在着许多共性。

## 2 偏振反射反算二向性反射的机理

二向性反射是自然界中物体对电磁波反射的基本宏观现象,即反射不仅具有方向性,这种方向性还依赖于入射的方向。物体的反射、辐射、发射与物体的表面结构特征及物体的物质组成有密切关系,不同物体表面将入射的电磁波向四面八方(除吸收外)辐

射,形成散射通量不同的空间分布,反射的方向性是其材料波谱特征和空间结构特征的函数。它可以用二向性反射分布函数(BRDF)来描述。在以下的讨论中,不加偏振片(无偏)时即为二向性反射。

多角度偏振遥感是利用地球表面和大气中的目标地物,在反射、散射和透射电磁辐射的过程中,产生特征偏振信息,作为偏振化二向性反射的遥感信息源。其理论依据是定量描述偏振信息的 Stokes 矢量法<sup>[7-8]</sup>。对于来自被探测目标的任一准单色平面波,其偏振状态可以用 4 个 Stokes 参数  $I, Q, U, V$  来表征。

$$S = \begin{bmatrix} I = I_0^\circ + I_{90^\circ} \\ Q = I_{90^\circ} - I_0^\circ \\ U = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ V = I_r - I_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $I$  为非偏振光强,  $Q, U$  分别代表两个方向上的线偏振光强,  $V$  代表圆偏振光强,  $I_0^\circ, I_{90^\circ}, I_{+45^\circ}, I_{-45^\circ}, I_r$  和  $I_l$  分别表示置放在光传播路径上一理想偏振片在  $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ$  方向上的线偏振光以及左旋( $l$ )和右旋( $r$ )圆偏振光强。

光源的出射光为非偏振光,经地物一次反射后,根据菲涅耳公式,其反射存在偏振现象,这时地物实际上是起偏器。光的偏振态有 5 种:自然光、线偏振光、部分偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。到达传感器的光通常是这 5 种偏振态光中的一种或若干种的混合。由于自然光和线偏振光是部分偏振光的特例,圆偏振光是椭圆偏振光的特例。根据 Stokes 矢量,文中主要讨论部分偏振光和椭圆偏振光这两种偏振态光在通过偏振遥感系统后的变化情况。

首先讨论部分偏振光的情况。部分偏振光是自然光与线偏振光的混合,是介于二者之间的一种偏振态,从内部结构看,其振动虽也是各方向都有,但不同方向的振幅大小不同。

根据马吕斯定律,强度为  $I_0$  的线偏振光,通过检偏器后,透射光的强度(在不考虑吸收的情况下)为:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为检偏器的偏振化方向与入射偏振光的偏振化方向之间的夹角。即当检偏器以入射光为轴转动时,透射光强度将有所变化,其 Stokes 矢量满足关系式  $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ 。

马吕斯定律是对偏振光的无吸收而言的,对于非偏振光(自然光)并不成立。可以把非偏振光分解为两束等幅的、振动方向互相垂直的、不相干的线

偏振光, 即  $I_x = I_y = I_0/2$  这就是非偏振光的线偏振表示, 其 Stokes 矢量有  $Q = U = V = 0$ 。当非偏振光通过起偏器时, 与偏振片的透光轴方向平行的线偏振光完全透过, 而与偏振片的消光轴方向平行的线偏振光则不能透过。偏振片在这里实际上起着起偏器的作用。因此非偏振光经过偏振片后, 它的光强是原来的一半, 并且光矢量的振动方向与偏振片的透光轴方向一致。

设部分偏振光的总强度为  $I_0$ , 其中非偏振光成分的强度为  $I_n$ , 偏振光成分的强度为  $I_l$ , 则有  $I_0 = I_n + I_l$ , 这时在传感器前使用检偏器, 就可以测定光束通过检偏器后的光强变化。让光束垂直入射, 设转动检偏器与透光轴方向平行 (透光方向) 的光强为  $I_{0^\circ}$  和与透光轴方向垂直 (消光方向) 光强为  $I_{90^\circ}$ , 显然有

$$\begin{aligned} I_{0^\circ} &= I_l + \frac{1}{2}I_n \\ I_{90^\circ} &= \frac{1}{2}I_n \end{aligned} \quad (3)$$

故

$$\frac{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}}{2} = \frac{I_0}{2} \quad (4)$$

即透光方向与消光方向的光强的算术平均数 (暂称为偏振均值) 为入射前光强的一半。

通过检偏器后的非偏振光成分的强度变为原来的一半, 如果通过检偏器后的偏振光成分也为原来的一半, 就可以建立二向性反射光强与偏振化二向性反射光强之间的一个等量关系。

当  $\theta = \pm\pi/4$  时, 部分偏振光通过起偏器的光强为:

$$I(45^\circ) = \frac{1}{2}I_n + I_l \cos^2(\pm\pi/4) = \frac{I_0}{2} \quad (5)$$

即到达传感器的光是入射前的一半。

现在讨论当出射光为椭圆偏振光时的情况。椭圆偏振光是电矢量的端点在波面内描绘的轨迹为一个椭圆的光<sup>[9]</sup>。椭圆运动可看作是二个相互垂直的简谐振动的合成, 只是它们的振幅不等, 或相差不等于  $\pm\pi/2$ 。将椭圆偏振光按设定的  $xy$  坐标分解为  $x$ 、 $y$  方向上的两个振动, 其间的相位差为  $\delta$  椭圆偏振光两个分量的表达式可写成:

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (6)$$

透过偏振器的振动是  $xy$  分量在偏振器透光轴  $N$  方向的投影的叠加, 参与叠加的两个投影的振幅与  $N$  和  $x$  轴 (或  $y$  轴) 间的夹角  $\theta$  有关, 其间的相位

差仍为  $\delta$  于是经偏振器后振动的振幅即光强  $I$  可知, 显然它是  $\theta$  的函数, 表为  $I(\theta)$ , 当  $I = I_{90^\circ}$  时, 相应  $\theta$  表示椭圆偏振光的长轴方向, 同样, 相应于  $I_{0^\circ}$  的  $\theta$  则表示短轴方向。即:

$$\begin{aligned} I_{90^\circ} &= E_y^2 \\ I_{0^\circ} &= E_x^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$I_0 = E_x^2 + E_y^2 \quad (8)$$

故

$$\frac{I_{90^\circ} + I_{0^\circ}}{2} = \frac{E_y^2 + E_x^2}{2} = \frac{I_0}{2} \quad (9)$$

此结论与部分偏振光时相同。当  $\theta$  为任意角度时, 上述两振动透过偏振器后在  $N$  方向的投影为:

$$\begin{cases} E_x' = E_x \cos \theta \\ E_y' = E_y \sin \theta \end{cases} \quad (10)$$

故通过偏振器后的光强为:

$$I(\theta) = E_x'^2 + E_y'^2 = E_x^2 \cos^2 \theta + E_y^2 \sin^2 \theta \quad (11)$$

当  $\alpha = \pm\pi/4$  时,

$$I(45^\circ) = E_x^2 + E_y^2 = \frac{1}{2}(E_x^2 + E_y^2) = \frac{I_0}{2} \quad (12)$$

圆偏振光是椭圆偏振光的一个特例, 椭圆偏振光退化为圆偏振光的条件是:  $A_x = A_y$  和  $\delta = \pm\pi/2$  故椭圆偏振光的上述特性同样适用于圆偏振光。

由于制造偏振片的材料自身对光有一定的吸收, 故这里用反射比来阐述。只要探测器足够灵敏, 入射前与入射后的光强相差一半, 即二向性反射 (无偏时) 的反射强度是  $\alpha = \pm\pi/4$  时的反射强度的 2 倍, 相同条件下各自与白板的反射比, 理论上应该相等。综合以上两种情况的讨论, 可以得出

$$\frac{I_b}{I_b'} = \frac{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}}{2I_{45^\circ}} = \frac{I_{45^\circ}}{I_{45^\circ}} \quad (13)$$

$I_b$ 、 $I_{90^\circ}$ 、 $I_{0^\circ}$ 、 $I_{\pm 45^\circ}$  分别为二向性反射 (无偏)、 $90^\circ$  偏振、 $0^\circ$  偏振以及  $45^\circ$  偏振的光强,  $I_b'$ 、 $I_{45^\circ}'$  分别为无偏与  $45^\circ$  偏振时相应白板的反射光光强。

讨论是在部分偏振光和椭圆偏振光两种情况下进行的, 由于非偏振光和线偏振光是部分偏振光的特例, 圆偏振光是椭圆偏振光的特例, 故以上公式对光的 5 种偏振态均适用, 也就是说不论到达传感器时它们是单一种的光还是它们相互间的混合光, 公式 (13) 总是适用的。

### 3 实验及比较

为了验证以上推论的正确性, 我们利用中国科学院长春光学精密机械研究所研制的二向反射光度

计<sup>[10]</sup>, 测量水面溢油的多角度偏振反射值及二向性反射值。

二向反射光度计由光源、二向反射光度计系统和控制系统组成。光度计的方位角为 0°—360°; 有 A (630—690nm), B (760—1100nm) 两个波段; 以镍钨灯作为光源, 在 0°—70° 范围内每隔 10° 为一个光源入射方位; 探测架上设有 7 个探头, 探头头的间隔为 10°, 其范围是 0°—60°; 同时该设备还配有偏振镜头, 能够任意角度旋转, 测量时不配偏振镜头时所测的数据就是地物的二向性反射值。把待测样本固定在载物台上测量其偏振数据, 每次测量完地物数据后紧接着测白板数据, 把二者的比值作为结果存入数据库。以同样的方式变更入射角、波段与偏振角逐个测量样本。

样品所用的原油采自大庆油田, 呈棕黑色, 比重较大, 约 0.9 为重质原油, 其硫含量低, 凝点高, 蜡含量高, 为低硫石蜡基。实验中先在样品杯中加入一定量的水, 然后滴入原油, 油膜厚度约为 1mm, 然后调节实验杯使原油表面与白板的表面保持在同一水平面上, 精确控制二者在同一水平面是本实验精度的重要保证之一。

图 1 所示的为水面溢油在入射角为 50°、A 波段, 方位角为 0°—360 时 7 个通道的 90° 偏振和 0° 偏振反射比波谱曲线。图 2 和图 3 是水面溢油在入射角为 50°、A 波段以及入射角为 60°、B 波段时, 方位角为 0°—360 时 7 个通道上的 45° 偏振反射比 (a)、二向性反射比 (b)、偏振均值反射比 (c) 的波谱曲线图。图 1 和图 2 是在直角坐标系下的表示, 横坐标为方位角, 纵坐标为反射比, 图 3 是在极坐标系下的表示。

从图 1—图 3 可以看出, 水体表面溢油表现为典型的非朗伯体特征, 在入射光所决定的主平面上, 与入射角相等的探测角上出现明显的峰值, 而不像植物单叶等地物在多个通道上有反射峰。故当光线入射角为 50°, 只有 50° 的探测角 (6 通道) 上出现峰值; 当入射角为 60° 时, 只有 60° 的探测角 (7 通道) 上出现峰值, 而其他通道的值都在 0 附近, 为平直的线, 表现为朗伯体特征。我们测量了多组水面溢油天顶角为 10°—60°, 90°, 0°, 45° 偏振反射及二向性反射数据。从实验数据的分析结果看, 二向反射比、45° 偏振反射比、偏振均值反射比三者的曲线无论从形态、各通道的位置顺序还是反射比强度都非常接近, 与公式 (13) 的结论完全吻合。

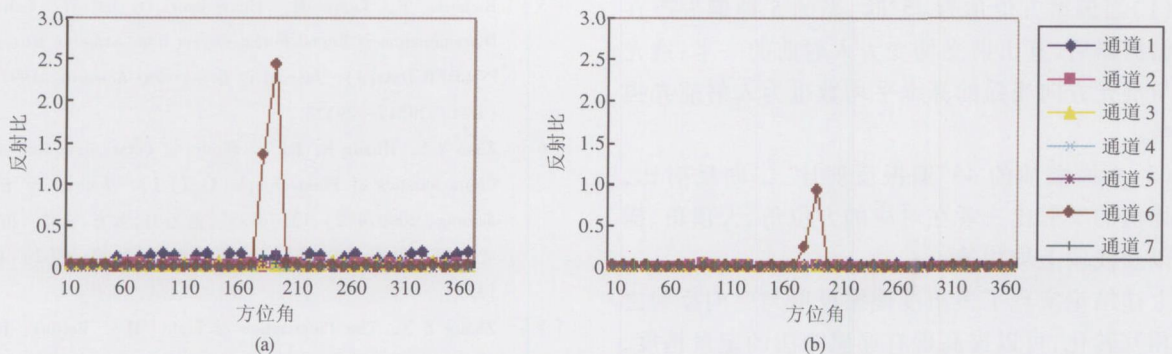


图 1 入射角为 50°、A 波段, 90° 偏振反射比(a)与 0° 偏振反射比(b)的水面溢油波谱曲线图  
Fig.1 Spectrum curves of oil spill at 90° (a) and 0° (b) polarimeter at incidence angle=50°, A band

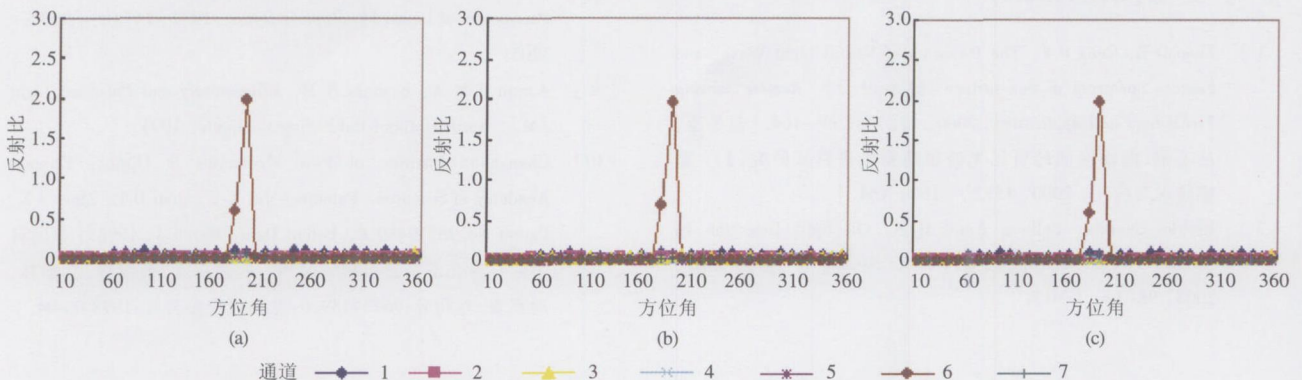


图 2 入射角为 50°、A 波段, 45° 偏振反射比(a)、二向性反射比(b)、偏振均值反射比(c)的水面溢油波谱曲线图  
Fig.2 Spectrum curves of oil spill at 45° polarimeter (a), no polarimeter (b) and polarization mean value (c) at incidence angle=50°, A band

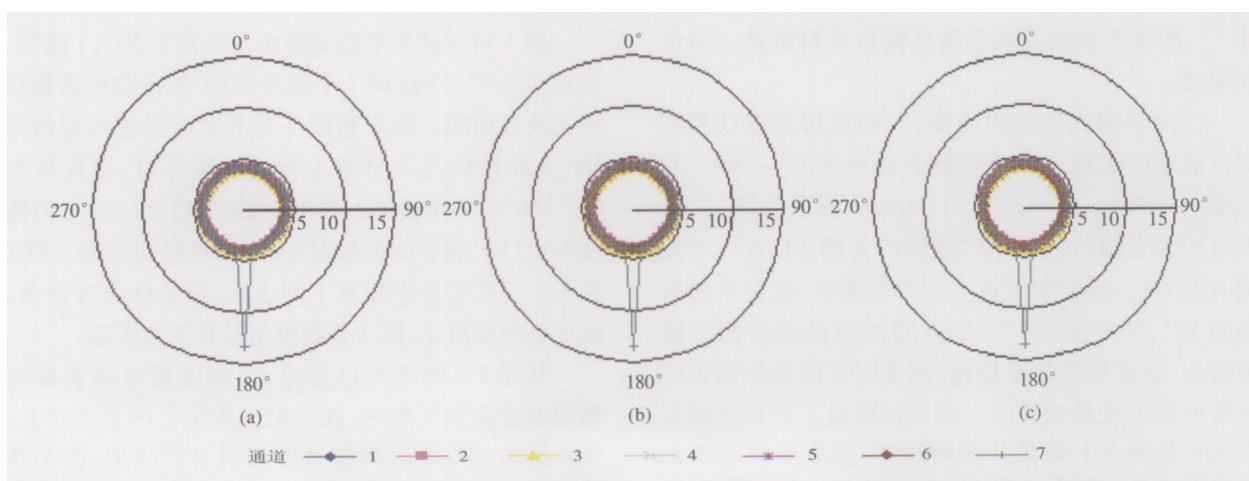


图 3 入射角为  $60^\circ$ 、B 波段,  $45^\circ$  偏振反射比 (a)、二向性反射比 (b)、偏振均值反射比 (c) 的水面溢油波谱曲线图

Fig 3 Spectrum curves of oil spill at  $45^\circ$  polarimeter (a), no polarimeter (b) and polarization mean value (c) at incidence angle =  $60^\circ$ , B band

## 4 结 论

综上, 我们可以得出水面溢油的多角度偏振反射与二向性反射之间存在的等量关系, 基本结论如下:

(1) 当偏振方位角为  $45^\circ$  时, 光的 5 种偏振态在通过偏振器后, 其出射光均变为入射前的一半; 透光方向与消光方向光强的算术平均数也为入射前光强的一半。

(2) 水面溢油的  $45^\circ$  偏振反射比, 二向反射比, 偏振均值的反射比三者在对应的方位角、天顶角、探测角以及波段上均相等。

上述结论实现了多角度偏振反射与二向反射之间的相互转化, 可以提高现有遥感方法的定量精度, 同时为水体溢油的参数反演开拓了新思路。

## 参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Zhao D Z, Cong P F. The Research of Visual Light Wave band Feature Spectrum of Sea surface Oil Spill[ J]. *Remote Sensing Technology and Application* 2000 15(3): 160-164 [赵冬至, 丛丕福. 海面溢油的可见光波段地物光谱特征研究[ J]. 遥感技术与应用, 2000 15(3): 160-164 ]

[ 2 ] Brekke Camilla, Solberg Anne H S. Oil Spill Detection by Satellite Remote Sensing[ J]. *Remote Sensing of Environment* 2005 95(1): 1-13

[ 3 ] Gade Martin, A Peters Wemer. Using ERS-2 SAR Images for Routine Observation of Marine Pollution in European Coastal Waters[ J]. *The Science of the Total Environment* 1999 237-238 441-448.

[ 4 ] Li X W, Strahler A H. Geometric Optical Modeling of a Coniferous Forest Canopy[ J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 1985 23: 207-221

[ 5 ] Bicheron B, Leroy M, Hauteceur O, et al. Enhanced Discrimination of Boreal Forest Covers from Airborne Directional POLDER Data[ J]. *Journal of Geophysical Research* 1997 102 (D24): 29517-29528.

[ 6 ] Zhao Y S, Huang F, Jin L. Study on Polarization Reflectance Characteristics of Plant Simple Leaf[ J]. *Journal of Remote Sensing* 2000 4(2): 131-135 [赵云升, 黄方, 金伦. 植物单叶偏振反射特征研究[ J]. 遥感学报, 2000 4(2): 131-135.]

[ 7 ] Zhang Z X. The Polarization of Light[ M]. Beijing: Higher Education Publishing House, 1985 [张之翔. 光的偏振[ M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.]

[ 8 ] Beny H G, Livingston A E. Measurement of the Stokes Parameters of Light[ J]. *Applied Optics* 1977 16(12): 3200-3205.

[ 9 ] Azzam R M A, Bashara N M. Ellipsometry and Polarized Light[ M]. North-Holland Publishing Company, 1997.

[ 10 ] Changchun Institute of Fine Mechanics & Optics, Chinese Academy of Sciences. Patentee: Jin X F, Qiao D L, Zhou S X. Patent No. 96239489.0 Patent Data: March 4, 1998. [中国科学院长春光学精密机械研究所. 专利权人: 金锡峰, 乔德林, 周素香. 专利号: 96239489.0 专利授权公告日: 1998.03.04.]