

文章编号: 1001-9014(2009)02-0151-05

垂直观测时水平粗糙地表偏振反射作用研究

吴太夏¹, 晏磊¹, 相云^{1,3}, 施健¹, 赵云升²

(1. 北京大学 空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;

2. 东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024;

3. 河北省气象科学研究所 河北省生态环境监测实验室, 河北 石家庄 050021)

摘要: 在利用偏振遥感对地表目标或大气进行研究时, 由于大气散射光相对地表反射具有更强的偏振特性, 故常认为经地气系统反射回空间的太阳辐射偏振信息主要来源于大气, 而在遥感反演时常忽略地表的偏振反射作用. 这个结论是基于地面目标为漫反射体的假定, 但事实上, 在绝大多数情况下, 地表并非朗伯体, 在某些时候这种非朗伯体的地表偏振作用甚至超过大气的影响. 本文从推导地表的偏振反射作用机理及偏振光谱解译模型出发, 首次利用偏振成像光谱实验, 证明了地表的偏振度在某些情况下甚至达到 50% 以上, 说明地表的偏振作用对传感器的信号有时会有很大影响. 该作用是进行定量遥感研究时不容忽视的一个重要因素.

关键词: 遥感; 偏振; 成像光谱; 定量遥感

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

POLARIZATION REFLECTION EFFECT OF PLANE ROUGH SURFACE UNDER VERTICAL OBSERVATION

WU Tai-Xia¹, YAN Lei¹, XIANG Yun^{1,3}, SHI Jian¹, ZHAO Yun-Sheng²

(1. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration & 3S Engineering Applications, Peking University, Beijing 100871, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

3. Hebei Eco-environmental Monitoring Laboratory, Hebei Meteorological Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: When utilizing polarization remote sensing for earth observation, or atmosphere scattering, the polarization effect of atmosphere is always higher than the land surface's. It is usually believed that the polarization effect of the atmosphere is the main information resource of the remote sensing sensor. Thus the land surface's polarization is often ignored in remote sensing retrieval. This conclusion is based on the assumption that the reflection of land objects is diffuse reflection. However, in most cases, land objects are not standard Lambertian. Sometimes the polarization effect of those objects is stronger than the atmosphere's. In this study, the reflection mechanism of the land surface and the interpretation model of polarization spectrum were deduced. Our results show that the imaging spectrum experiment has the land surface polarization effect which can even reach to 50% or more in some cases. The polarization signal of sensor will be greatly affected by the land surface. So the polarization effect of land surface is an important factor which can not be ignored during the study of quantitative remote sensing.

Key words: remote sensing; polarization; imaging spectra; quantitative remote sensing

引言

在偏振遥感对地探测中, 特别是在可见光波段, 大气散射光具有很强的偏振特性, 相比而言, 地物的偏振度比较小. 这是因为当探测器垂直向下进行图像获取时, 近似地认为地表面是一个朗伯体, 地物反

射光偏振度相比大气散射偏振可以忽略不计, 可以利用地物反射光与大气散射偏振特性的差别进行大气散射校正^[1,2]. 但事实上, 地物与电磁波的相互作用在大多数情况下具有明显的方向性. 随着太阳高度角及观测角度的变化, 地物的反射、辐射特征及地物瞬时所表现出的空间结构特征都会随着变化. 这

收稿日期: 2008-05-20, 修回日期: 2008-10-17

Received date: 2008-05-20, revised date: 2008-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(40572167, 40771153)资助项目

作者简介: 吴太夏(1979-), 男, 安徽桐城人, 在读博士生, 研究方向: 偏振遥感. E-mail: wutaixia@126.com.

通讯作者: 晏磊(1956-), 男, 湖北武汉人, 教授, 主要从事遥感研究. E-mail: liyan@pku.edu.cn.

种变化记录在遥感图像上,则将可能产生同一地物反射、辐射信息的很大差异. ADEOS(Advanced Earth Observation Satellite)卫星上的 POLDER(Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance) 遥感器获取的偏振影像上的海洋线等地表目标在偏振影像上往往都清晰可见,说明该区域地表偏振反射对遥感器的影响超过大气的影响. 因此,关于“经大多数地表反射回空间的太阳辐射是弱偏振(little polarized),经地气系统反射回空间的太阳辐射偏振信息主要来源于大气”的结论需要具体分析^[3-5].

由于大气的偏振效应比较明显,在偏振遥感中如果对地物偏振光谱没有仔细研究,要高精度地将大气与地物的偏振效应分开也是很困难的. 因此,开展地物偏振特性及其对传感器贡献的研究很有必要. 本文从数学和物理的基础上,推导了地表的偏振与光线入射角度、探测角度的关系,分析地表的偏振反射机理,并于国内外首次利用偏振高光谱成像手段,进行了偏振成像光谱实验,得出地物的偏振度光谱影像,分析了在垂直探测时平面粗糙地表对遥感图像的影响. 研究地气系统中太阳辐射的偏振特性,探索利用其偏振信息反演地表、气溶胶参数对气候变化及遥感领域都具有重要的意义^[6,7].

1 地表的偏振反射机理

偏振是各种矢量波的一种基本性质,狭义上是指光波在垂直于其传播方向的平面内的不同方向上的振幅不等的现象. 当光倾斜地入射到地物表面上时,一部分将发生反射;另一部分将折射入地物内部. 设 α 为入射角, β 为折射角. 入射光的电矢量可以分解为垂直于入射面的分量 $E_{10\perp}$ 和平行于入射面的分量 $E_{10\parallel}$, 设相应的反射光电矢量的分量为 $E'_{10\perp}$ 和 $E'_{10\parallel}$.

当一束自然光在两种介质界面上反射和折射时,反射光和折射光的传播方向虽由反射和折射定律决定,但这两束光的振动取向,即偏振态,则须根据光的电磁理论,由电磁场的边界条件来决定. 由菲涅耳公式,电矢量的平行分量和垂直分量的振幅反射强度分别为

$$E'_{10\perp} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} E_{10\perp}, \quad (1)$$

$$E'_{10\parallel} = \frac{\text{tg}(\alpha - \beta)}{\text{tg}(\alpha + \beta)} E_{10\parallel}. \quad (2)$$

如果不考虑方向,则有

$$\frac{E'_{10\parallel}}{E_{10\parallel}} = \frac{\text{tg}(\alpha - \beta)}{\text{tg}(\alpha + \beta)} = \frac{E'_{10\perp}}{E_{10\perp}} \cdot \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos(\alpha - \beta)}, \quad (3)$$

当 $\alpha = 0^\circ$ 时,可得

$$\frac{E'_{10\parallel}}{E_{10\parallel}} = \frac{E'_{10\perp}}{E_{10\perp}}. \quad (4)$$

我们已经知道 $E_{10\perp} = E_{10\parallel}$, 则反射光中电矢量的平行分量 $E'_{10\parallel}$ 值和垂直分量 $E'_{10\perp}$ 值相等. 但这两个分量是不相干的,合成后的反射光仍然是自然光. 所以当入射光垂直入射到地物时,其反射光不存在偏振性.

当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时均有 $|\cos(\alpha + \beta)| < \cos(\alpha - \beta)$, 此时

$$\frac{E'_{10\parallel}}{E_{10\parallel}} < \frac{E'_{10\perp}}{E_{10\perp}}. \quad (5)$$

考核式(1)和式(2),交界面对于入射光的2个分量($E_{10\perp}$ 和 $E_{10\parallel}$)的物理作用并不相同. 不论入射光的偏振状态如何,由于交界面总是把它的垂直分量 $E_{10\perp}$ 按式(1)反射,而把它的平行分量 $E_{10\parallel}$ 按式(2)反射,式(5)表明反射光中电矢量的平行分量的值总是小于垂直分量的值,从内部结构来看,这两个分量是不同方向上的、振幅大小不等的大量偏振光的电矢量在这两个方向上投影的矢量和,因此这两个分量仍然是不相干的,不能合成为一个矢量,是部分偏振光,因此其偏振状态就与入射光的偏振状态不同了,也就是说当入射光为自然光(非偏振光)时,入射光经地物表面一次反射后,其反射存在偏振现象^[8,9].

从上述的推导我们可以看出,只有在光线垂直入射,传感器垂直观测时,水平光滑地表的反射才没有偏振,在实际的遥感探测中,卫星一般是垂直地对地观测,一方面由于卫星的过境时间和当地的地理位置的原因,太阳入射光一般不会是垂直入射;另一方面,真正的朗伯地表在自然界中几乎是不存在的,粗糙地表、坡地、水面波浪、植被冠层等地表都会有比较强的偏振反射. 故遥感器接收到的信号中会有大量的地表反射的偏振信息. 本研究的实验就是从水平粗糙的地表观测来说明地表偏振反射作用的问题.

2 偏振成像光谱实验与分析

本实验采用的偏振成像仪器为美国 CRI 公司的 Nuance 高光谱成像仪,光谱范围 650 ~ 1050nm,半波带宽 10nm,共 46 个波段. 采用 52mm 镜头成像. 成像时,采用在镜头前放置偏振器,然后改变偏振片的透光轴与参考轴的角度,获取 0° 、 45° 和 90° 3 个角度下的数据,来解求 Stokes 参数,进而对偏振信息进行分析研究. 参考法国 POLDER 偏振卫星传感器的参数,选择其带偏振的两个通道 670nm 和

860nm 作为本文的研究波段^[10].

2.1 偏振光谱解译模型

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,作为偏振遥感信息源.其理论依据是定量描述偏振信息的 Stokes 矢量法.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.

$$S = (I, Q, U, V)^T, \quad (6)$$

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,由于地物反射的圆偏振分量较小且测量较麻烦,故本文暂不考虑.

当入射光通过一理想起偏器时,与参考方向成 θ 角的理想起偏器的米勒矩阵为

$$M_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则出射光的 Stokes 参数 S_{out} 为

$$S_{out} = S' = M_P \cdot S, \quad (8)$$

可得出透射光的强度表达式为

$$I(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot (I + Q \cdot \cos 2\alpha + U \cdot \sin 2\alpha). \quad (9)$$

只要测出 3 个不同角度的线偏振光的光强 $I(\alpha_i)$, 就可以推演出待测目标的完整的偏振信息.

相应的偏振度 P 和偏振方位角 θ 为^[9]

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \quad (10)$$

2.2 偏振成像光谱分析

实验的研究对象是 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ 大小的大理石石板,板面未打磨,较粗糙,水平放置在地面上, Nuance 高光谱成像仪垂直向下分别获取 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 的偏振影像.采集的时间约为中午 12 h.

我们采用的偏振器是直径 55mm 的线偏振片.该线偏振片通过光谱仪测定,适用于 380nm ~ 900nm 的波段测量,对大于 900nm 的红外波段衰减作用明显,并不适用.由于偏振度的值为无量纲的比值,是归一化后的数据,在适用的波段范围内,其对光的衰减作用可不考虑.

图 1 所示的是选取的 670nm 的 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 的偏振影像,图 2 是 670nm 的偏振度图像,图 3 为 860nm 的偏振度图像.

将图 2 和图 3 的偏振度图像分别进行灰度分级,分为十级,分别统计每级别的区间内像元个数,如表 1 所列.将表 1 的数据绘制成直方图的形式,如图 4,5 所示,横坐标为偏振度的分级区间,纵坐标为每级别像元所占总像元的比例.

从图中可以看出,大理石板的大部分点的偏振度集中在 $0 \sim 30\%$ 之间,符合地表偏振度较低的特性,但偏振度大于 40% 的点在 670nm 和 860nm 波段图像上仍分别占到 33% 和 18%,而且有相当数量的点的偏振度大于 80%.

以上是 670nm 和 860nm 2 个波段的统计情况,那么在其他波段的情况如何呢?图 6(a) 是在 670nm (图中红色直线所示波段位置)偏振度图像上选取的 10 个较亮(偏振度较大)点的光谱曲线的叠加图,横坐标为波长范围,纵坐标为偏振度大小,每条不同颜色的曲线分别代表一个点的波谱.图 6(b) 为 860nm 的光谱叠加曲线.

从图 6 可以看出,在 670nm 和 860nm 2 个波段的偏振度图像上偏振度较大的点在其他波段的偏振度也相对较大,虽然观测波段不同,地表的偏振特性也各不相同,显现出波谱的特性,但其他波段也存在着如图 4,5 所示的偏振度分布的类似规律.

为了验证垂直观测时其他地物是否具有类似的规律,我们分析了不同地物以及不同粗糙度的同一地物的偏振影像.实验的时间为 2008 年 9 月 17 日 15:30h 左右,实验采用的图像采集设备是尼康 D200 相机和偏振片,垂直对地观测获取可见光波段的 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 的偏振影像,然后计算得偏振度图像.图 7 是表面粗糙的大理石灰度影像(左)及其偏振度图像(右),其粗糙表面是由光滑大理石表面打磨而成,其粗糙度比以上实验所用到的大理石粗糙度要小.其中黑色表示偏振度大小为 $0 \sim 0.4$,白色表示偏振度大小为 $0.4 \sim 1$.从图 7 的偏振度图像可以看出,图像有为数不少的白色斑点,也就是偏振度大于 40% 的点,但这些白色斑点要比以上实验用到的更粗糙的大理石表面的点要少,至于这种偏振度与表

表 1 670nm 和 860nm 波段偏振度图像的偏振度分级统计表

Table 1 The pixel number statistics of degree of polarization density separation image at band 670nm and 860nm

	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1
670nm	17726	24591	18899	13647	9022	4831	1969	548	160	58
860nm	19177	34599	20590	11049	4479	1228	272	54	22	9

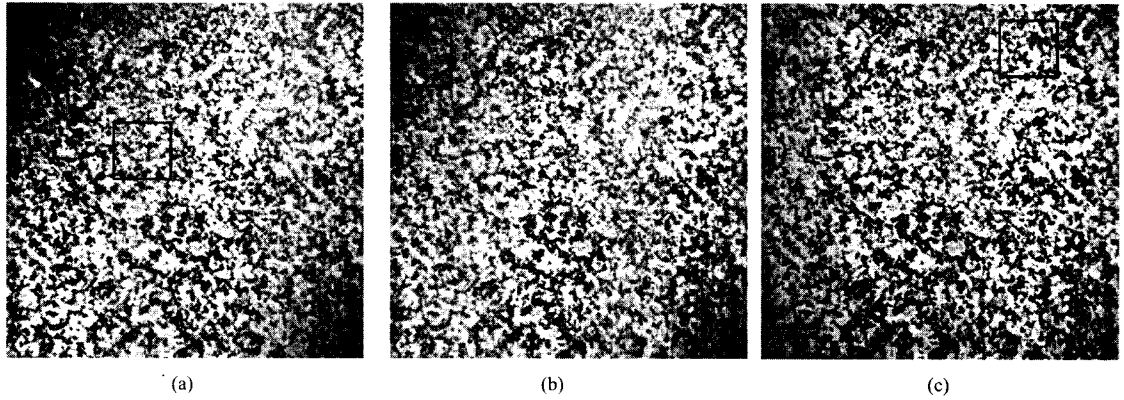


图1 670nm 0°(a)、45°(b)和90°(c)的大理石板偏振影像
 Fig. 1 Marble images of three different polarization states: 0°(a)、45°(b) and 90°(c), at band 670nm

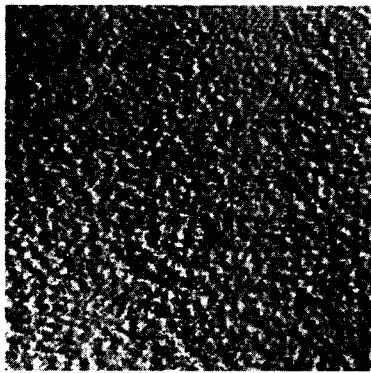


图2 670nm 偏振度图像
 Fig. 2 Image of polarization degree at band 670nm

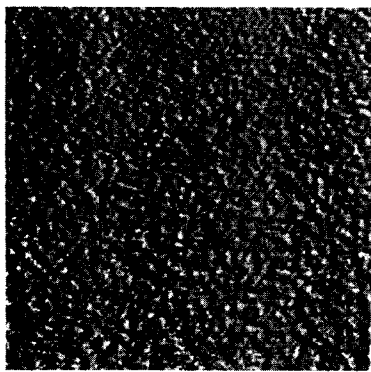


图3 860nm 偏振度图像
 Fig. 3 Image of polarization degree at band 860nm

面粗糙度之间的是否具有一定的定量关系还有待进一步研究,本实验说明了垂直观测时同一地物在不同粗糙度的状态下其反射存在着不同程度的偏振现象.另外,我们对水平的沥青路面和草地进行了同样的测量与处理,结果同样也说明水平粗糙的地表在垂直观测时均有一定比例的偏振度较大的点,在垂直偏振观测时出现这些点是普遍现象^[11].

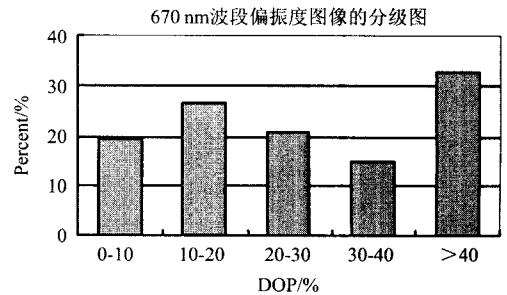


图4 670nm 波段偏振影像的分级图
 Fig. 4 Polarization density separation image at band 670nm separately

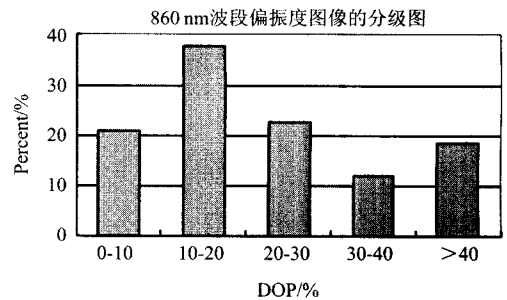


图5 860nm 波段偏振影像的分级图
 Fig. 5 Polarization density separation image at band 860nm separately

3 讨论与结语

本研究所采用的水平大理石板之所以有较强烈的偏振点出现,主要是由于粗糙的石板表面上会有很多的小反射面,即在阳光下肉眼能够看到石板上的小亮点,这些小反射面与探测器构成了一定的角度,符合了式(5)的条件,从而其反射光产生了偏振现象.这种非水平的反射面在地表上很常见,如坡地、水面波浪、植被冠层、人工建筑等,它们都会有比较强的偏振反射.一般水平均匀地表的偏振度常小

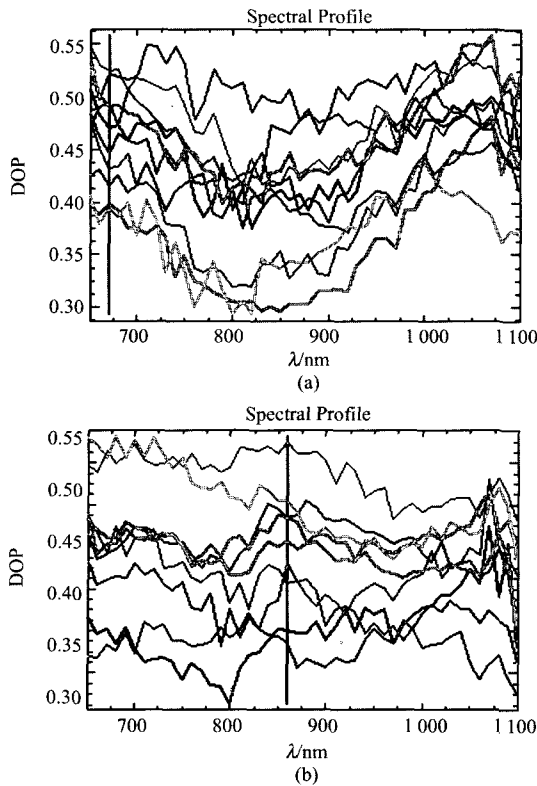


图6 670nm(a)和860nm(b)波段的大理石偏振度图像上10个点的光谱曲线叠加图(650~1100nm)

Fig.6 The marble spectrum curves adding figures of 10 pixels on images of polarization degree at band 670nm(a) and 860nm(b)



图7 粗糙度较小的大理石板的灰度影像(左)及偏振度图像(右)

Fig.7 Gray-scale image (left) and image of polarization degree(right) of marble at small roughness conditions

于20%,在做一些定性分析时,忽略其影响对反演简化有很大的好处,但在本例所讨论的相当一部分点的偏振度大于50%的事实情况下,这种简化就会给定量遥感研究结果带来很大的误差。

传感器的信号是由大气、地表两部分的信息组成,遥感器接收到的信号中就会不可避免地含有大量的地表反射的偏振信息。在本研究中,即使是在水

平地表、垂直探测这样的情况下,地表的偏振作用依然很大,对传感器的贡献有时甚至超过大气的影,所以在利用偏振信息建立地物和大气的反演模型时,需要充分考虑地表偏振的影响。下一步的工作将继续开展地物偏振特性研究,目的是解决大气与地物的偏振效应精确分离的问题,同时建立一种不忽视地表偏振影响,而从反射光的偏振信息中反演地表和大气等参数的方法和模型。

REFERENCES

- [1] YE Song, FANG Yong-Hua, SUN Xiao-Bing, *et al.* Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*(叶松, 方勇华, 孙晓兵, 等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正. *光学学报*), 2007, **27**(3): 999—1003.
- [2] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[J]. *Computer Vision & Pattern Recognition*, 2001, **1**: 325—332.
- [3] Leroy M, Bréon F M. Surface reflectance angular signatures from airborne POLDER data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **57**: 97—107.
- [4] YAN Bang-Hua. Research on the polarization characters of solar radiance in the ground-atmosphere system and its application in remote sensing[D]. Institute of Atmospheric physics Chinese Academy of Sciences. (阎邦华. 地气系统中太阳辐射的偏振特性及其在遥感中的应用研究. 中国科学院大气物理研究所). 1998.
- [5] Li X, Strahler A H. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1985, **GE-53**(5): 705—721.
- [6] Li Zhengqiang, Goloub P, Devaux C, *et al.* Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based spectral multi-angular, and polarized sun-photometer measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **101**: 519—533.
- [7] ZHAO Yun-Sheng, WU Tai-Xia, HU Xin-Li, *et al.* Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6): 441—444.
- [8] Itaru S. Optical thickness and Angstrom exponent of aerosols over the land and ocean from space-borne polarimetric data [J]. *Advances in Space Research*, 2004, **34**(4): 833—837.
- [9] Wu Taixia, Zhao Yunsheng, The bidirectional polarization reflectance model of soil[J]. *IEEE Transaction Geosciences and Remote Sensing*, 2005, **12**: 2854—2859.
- [10] Kawata Y, Izumiya T, Yamazaki A. The estimation of aerosol optical parameters from ADEOS/POLDER data [J]. *Appl. Math. Comp*, 2000, **116**: 197—215.
- [11] Melgani F, Bruzzone L. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(8): 1778—1790.