

水体的多角度偏振波谱特性及其在水色遥感中应用

吴太夏^{1,2}, 晏磊^{1*}, 相云^{1,3}, 赵云升⁴, 陈伟¹

1. 北京大学地球与空间科学学院空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871
2. Center for Remote Sensing and Mapping Science, the University of Georgia, Athens, Georgia 30602, USA
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
4. 东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024

摘要 清洁水体光谱在可见光和近红外波段的反射率比较低, 其光谱特征不明显, 在光学遥感图像上水体一般都表现为暗色调, 造成了利用光谱学手段进行水体遥感识别和水质参数反演的困难。在研究水体的偏振波谱时作者发现, 在对水体进行多角度观测时, 水体在可见光与近红外波段的偏振度波谱值要远大于其无偏的反射率, 表现在图像上即水体的偏振度图像的亮度要远大于其强度图像的亮度, 文章对这种现象和规律进行了物理学解释, 并利用法国 PARASOL 多角度偏振卫星遥感图像数据对这个规律进行了验证。该文首次揭示了利用多角度偏振遥感进行水体探测的优势, 该方法有效解决了在利用光学遥感进行水体探测时反射率低的难题, 大大提高水体的遥感识别能力和水质参数反演精度。

关键词 光谱; 偏振; 多角度; 遥感; 水色

中图分类号: TP701

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)02-0448-05

引言

清洁水体的光谱反射率低, 对光有较强的吸收能力, 反射主要在可见光中的蓝绿光波段, 在近红外和中红外波段的反射率更低, 几乎趋近于0。故在一般遥感影像上, 水体表现为暗色色调, 在红外波段上尤其明显^[1]。被动遥感监测主要是以地物反射光谱特征的差异作为研究基础的, 水体的这种光谱反射率低, 特征光谱不明显的特点造成了水体遥感识别和水质参数反演的困难^[2, 3]。

偏振是各种矢量波的一种基本性质。不同地物或同一地物不同状态产生不同的偏振态, 且与波长密切相关, 构成了偏振波谱, 探测目标地物偏振信息正成为遥感目标识别的新手段^[4]; 另外, 遥感探测器接收太阳反射能量的大小与入射角有密切的关系, 多角度对地观测能获得更为详细可靠的地面目标三维空间结构参数, 满足定量遥感反演参数个数的要求^[5, 6]。法国空间研究中心(CNES)在轨的 PARASOL 卫星上的 POLDER(Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)传感器可以通过全球观测, 从空间收集地气系统反射太阳辐射的偏振性和方向性数据, 是目前将多角度与

偏振结合得最好的例子之一^[7, 8]。

同非偏振测量相比, 偏振测量能得到更多易于区分目标的特征信息, 偏振遥感信息在表达暗目标(或低照度)方面有更丰富的内涵, 偏振遥感探测这种对反射率低的暗目标的识别优势, 为水体遥感提供了一种新的有效手段^[9, 10]。本文从水体表面的偏振特性入手, 分析其反射的偏振状态以及水体的多角度偏振波谱特性, 揭示利用偏振遥感进行水体探测的优势, 最后利用 POLDER 多角度偏振遥感卫星数据进行了验证。

1 水体表面反射的偏振特性

当光倾斜地入射到水体表面上时, 一部分将发生反射, 另一部分将折射入水体内部。设 α 为入射角, β 为折射角, 则包括入射光、反射光、折射光的平面构成入射面。不管入射光本身的振动方向怎样, 它的电矢量总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 $E'_{10\parallel}$ ^[11]。

当一束自然光在两种介质界面上反射和折射时, 这两束光的振动取向, 即偏振态, 由电磁场的边界条件来决定。如

收稿日期: 2009-02-25, 修订日期: 2009-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771153, 60808035)和北京市自然科学基金项目(1093016)资助

作者简介: 吴太夏, 1979年生, 北京大学在读博士生 e-mail: wutaixia@126.com

* 通讯联系人 e-mail: liyan@pku.edu.cn

果不考虑方向,由菲涅耳公式得

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

当 $\alpha = 0^\circ$ 时,由于自然光垂直入射面和平行入射面振动的电矢量各占一半,故 $E_{10\perp} = E_{10=}$ 。因此(1)式中反射光中电矢量的平行分量 $E'_{10=}$ 值和垂直分量 $E'_{10\perp}$ 值相等,合成后的反射光仍然是自然光。即当入射光垂直入射到水体表面时,其反射光不存在偏振性。

当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时均有

$$|\cos(\alpha + \beta)| < \cos(\alpha - \beta) \quad (2)$$

此时

$$\frac{E'_{10=} }{E_{10=}} < \frac{E'_{10\perp}}{E_{10\perp}} \quad (3)$$

根据菲涅耳公式,交界面对于入射光的两个分量($E_{10\perp}$ 和 $E_{10=}$)的物理作用并不相同,(3)式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,也就是说当入射光为自然光(非偏振光)时,倾斜入射经水体表面一次反射后,其反射存在偏振现象。

2 水体多角度偏振波谱特性

2.1 水体多角度偏振波谱曲线

为了说明水体的多角度偏振的波谱特性,我们利用美国 ASD 公司的可见光/近红外光谱仪(波谱范围 350~2 500 nm)对自然水体进行了多角度偏振测量。实验区域为北京大学未名湖,湖水较清晰,无波纹,天气条件晴朗无云,数据采集时间为中午 12 点。实验采用偏振波谱波动较小的汤姆森棱镜作为偏振器。水体多角度偏振波谱数据采集的过程为:光谱仪探头在不同的探测天顶角的情况下,利用光谱仪分别测量水平偏振、垂直偏振以及不加偏振器 3 种状态的反射率。探测天顶角从 0° 到 45° 变化,每 15° 测量一次。

图 1 所示的是探测天顶角分别为 0° (垂直探测), 30° , 45° 的水体的水平偏振、垂直偏振以及无偏的反射比波谱曲线。图中的红线表示的是偏振度的波谱曲线,偏振度是计算的结果。横坐标为波长,纵坐标为反射率。

图 1(a)为垂直探测时湖水的水平偏振、垂直偏振、无偏的反射率,其中无偏的曲线也就是常见的水体波谱曲线,在整个波段范围内反射率都很低,在蓝绿光波段有轻微反射峰。目前在轨的遥感器大多都是垂直探测地表,水体的这种低反射率特性就造成在一般的光学遥感影像上,水体表现为暗色调,很难利用水体的波谱特性对水体进行遥感识别和水质参数反演。而垂直探测时,水体的水平偏振和垂直偏振都接近于零,这与前文的推导相吻合,即在水体的垂直方向上无偏振反射,偏振度为零。

图 1(b)和(c)分别为探测天顶角为 30° 和 45° 时湖水的水平偏振、垂直偏振、无偏的反射率及偏振度的波谱曲线。

图 1(b)和(c)的无偏反射率在可见光波段较垂直时要大,作者推测是水体表面镜面反射的作用,但也可能是水体的多角度波谱特性之一,说明多角度观测数据也是遥感反演的一维重要信息,具体原因有待进一步考证。图 1(b)和(c)的偏振度波谱曲线是本文论证的核心所在。图 1(b)的偏振度曲线的值在 350~900 nm 的波段范围内均大于无偏反射率的值,而图 1(c)的偏振度曲线的值在 350~1 350 nm 的整个波段范围内都大于无偏反射率的值。 30° 和 45° 探测时的偏振度的值在某些波段比垂直探测时的无偏反射率的值要大出几十倍。

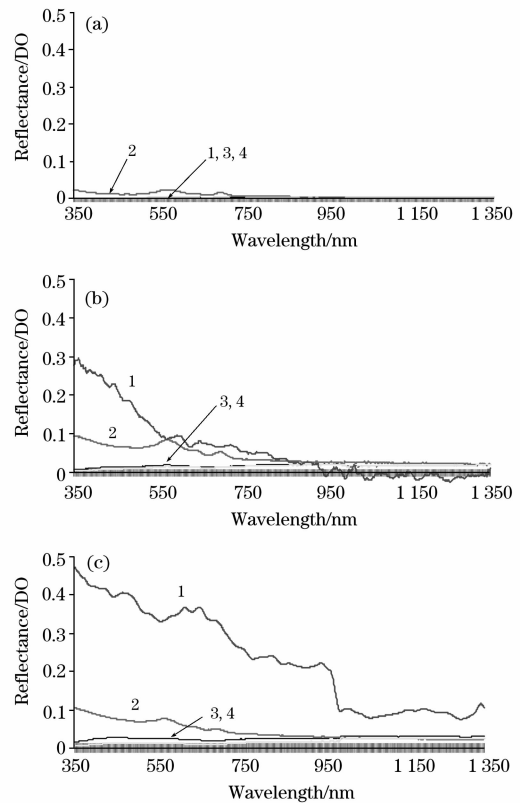


Fig. 1 The water's polarization spectra at different viewing angles

1: Degree of polarization; 2: Unpolarization;
3: Horizontal polarization; 4: Vertical polarization
(a): Vertical detection; (b): Detection zenith angle 30° ;
(c): Detection zenith angle 45°

2.2 水体多角度偏振特性的物理解释

水体的偏振特性随探测角的变化而变化,这种变化有没有一定的规律性呢?我们从水体表面偏振反射的物理学特性进行分析。当自然光倾斜入射到水面上时,在一特殊的入射角度 θ_0 时,反射光线垂直于折射光线,反射光线变成电矢量垂直于入射面的完全偏振光,这即是所谓布儒斯特定律, θ_0 称为布儒斯特角或偏振角,纯净水体折射率为 1.33,其布儒斯特角为 53.1° 。

偏振度是描述偏振光偏振程度的物理量,它定量表示了线偏振光占全部光的比例,根据菲涅耳公式,对偏振度函数作进一步的分析,则有

$$P = \frac{E_{10\perp}^2 \frac{\sin^2(\alpha-\beta)}{\sin^2(\alpha+\beta)} - E_{10=}^2 \frac{\text{tg}^2(\alpha-\beta)}{\text{tg}^2(\alpha+\beta)}}{E_{10\perp}^2 \frac{\sin^2(\alpha-\beta)}{\sin^2(\alpha+\beta)} + E_{10=}^2 \frac{\text{tg}^2(\alpha-\beta)}{\text{tg}^2(\alpha+\beta)}} \quad (4)$$

当入射光是太阳光时, $E_{10\perp}^2 = E_{10=}^2$, 用折射率消去(4)式中的折射角, 并将纯净的水的折射率代入, 得

$$P = \frac{2\sin\alpha\text{tg}\alpha \sqrt{1.769 - \sin^2\alpha}}{1.769 - \sin^2\alpha + \sin^2\alpha \text{tg}^2\alpha} \quad (5)$$

对 P 函数求导, 当 $P' = 0$ 时, $\alpha = 53.1^\circ$, 此时该函数存在极大值。

图 2 为水体表面反射率、偏振度随入射角变化曲线。横轴为入射角, 纵轴为反射率。垂直分量的反射率总是大于平

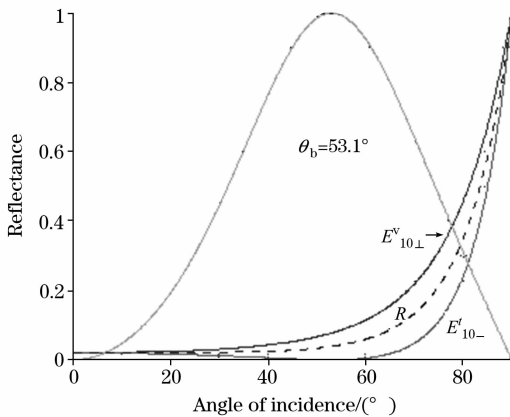


Fig. 2 Curve of water's polarization vs. angle of incidence

行分量的反射率。当入射天顶角 α 由 0° 逐渐增大时, 反射光的偏振程度也逐渐增大。到达布儒斯特角时, 此时 P 存在最大值。随后偏振度又逐渐减小。由于太阳高度角与太阳入射角互余, 故水体的偏振度函数在太阳高度角为 $(0^\circ, 90^\circ)$ 区间内, 先是单调递减, 在入射角为由地物性质所决定的布儒斯特角时达到极值, 然后又开始递增。反射角与入射角是相等的, 偏振度与探测角也有相同的变化规律。

水体的这种多角度偏振波谱特性为水体遥感探测提供了一条重要的线索, 利用多角度偏振遥感数据, 理论上可以让强度图像上原本很暗的水体在偏振图像上变得很亮, 从而达到提高水体识别能力和反演精度的目的。那么在多角度偏振卫星遥感图像上的实际情况是怎样的呢?

3 水体多角度偏振遥感图像分析

PARASOL 卫星是法国和美国合作的“卫星列车”(“A-Train”)计划中的一员, 上面主要搭载了 POLDER 仪器, 可以通过全球观测, 从空间收集地气系统反射太阳辐射的偏振性和方向性数据^[12-15]。图 3 和图 4 用到的图像是截取的 2008 年 11 月 29 日位于大西洋某海域的 PARASOL 卫星图像。

图 3 所示的是不同波段的 PARASOL 卫星的无偏(强度)图像。图 3(a), (b), (c) 分别对应 490, 670 和 865 nm 的强度图像。图中白色区域为云, 黑色区域为海水。

图 4 所示的是不同波段的 PARASOL 卫星的偏振度图像。图 4(a), (b), (c) 分别对应 490, 670 和 865 nm 的偏振度图像。

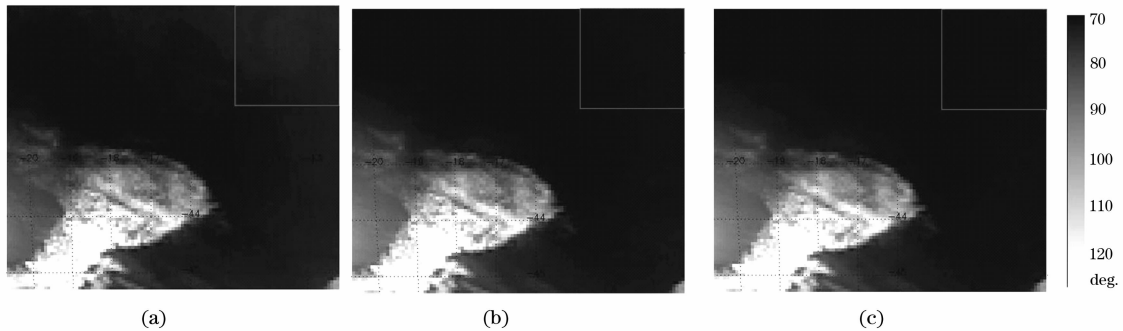


Fig. 3 Intensity images at different bands

(a): 490 nm; (b): 670 nm; (c): 865 nm

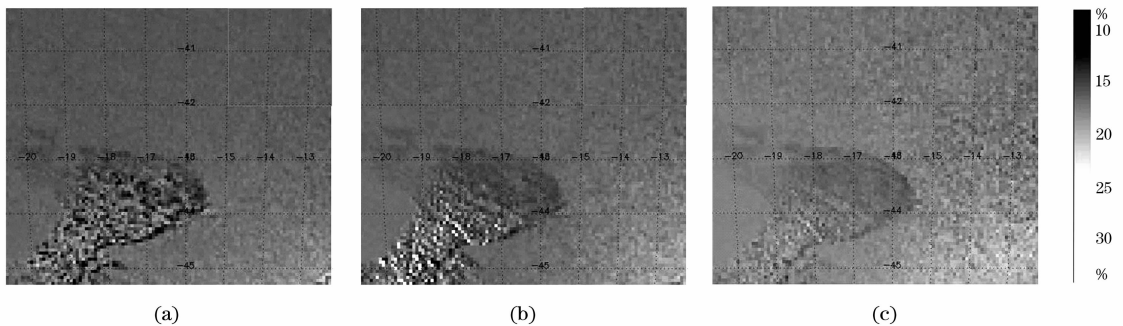


Fig. 4 DOP (Degree of polarization) images at different bands

(a): 490 nm; (b): 670 nm; (c): 865 nm

从图 3 和图 4 可以看出,各波段对应的偏振度图像的水体部分亮度都高于强度图像的水体部分亮度。表 1 将图 3 和图 4 的图像中的方框区域(水体)的亮度的平均值进行了统计。亮度倍数是将偏振度图像的亮度平均值除以强度图像的亮度倍数。相同海域 490, 670 和 865 nm 的偏振度图像亮度分别是对应波段强度图像亮度的 4.1 倍、18.0 倍和 36.8 倍。490 nm 由于大气偏振、水体吸收等因素的影响而倍数较小,但总体上水体偏振度图像的亮度要远大于其强度图像的亮度。分析相同海域不同角度观测的偏振度图像,偏振度图像的亮度仍然大于强度图像的亮度。也就是偏振度图像能够将

强度图像上较暗的区域变得更亮,有利于通过亮度分割等手段进行识别与分类,以提高遥感解译与反演精度。

4 结 论

从上述分析可以看出,当入射光为自然光(非偏振光)时,倾斜入射经水体表面一次反射后,其反射存在偏振现象,其偏振度与入射光线的角度有着定量关系。在可见光与近红外波段,水体的多角度偏振度波谱曲线要大于相同状态水体的无偏光谱。在地面利用光谱仪测量水体的多角度偏振光谱的特性和规律,同样适用于星载多角度偏振遥感器对水体的识别与反演。这也为低反射率地物的遥感提供了一条重要的观测手段。POLDER 多角度偏振数据不但可以提供高精度的大气参数,还在水体等低反射率地物的探测上具有优势,拓宽了偏振遥感卫星的应用范围,很大程度上提高了水体的遥感识别能力和水质参数反演精度。

Table 1 Average brightness of water's DOP images and intensity images

| | 490 nm | 670 nm | 865 nm |
|-------|--------|--------|--------|
| 反射率图像 | 14.07 | 3.47 | 1.97 |
| 偏振度图像 | 57.25 | 62.51 | 72.49 |
| 亮度倍数 | 4.1 | 18.0 | 36.8 |

参 考 文 献

- [1] Shaw J A, Marston C. Optics Express, 2000, 7(11): 375.
- [2] Cox C, Munk W. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838.
- [3] LI Yan, LI Jing(李 炎, 李 京). Chinese Science Bulletin(科学通报), 2000, 45(10): 925.
- [4] Wu Taixia, Zhao Yunsheng. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(12): 2854.
- [5] Henderson Bradley G, Theiler James, et al. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(4): 453.
- [6] Li X W, Strahler A H. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1992, 30(2): 276.
- [7] Csizsar I, Gutman G, Romanov P, et al. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(3): 399.
- [8] Leroy M, Bréon F M. Remote Sensing of Environment, 1996, 57(2): 97.
- [9] Egan W G, Duggin M J. Proc. SPIE, 2000, 4133: 172.
- [10] Shaw J A. Applied Optics, 1999, 38(15): 3157.
- [11] Azzam R M A, Bashara N M. Ellipsometry and Polarized Light. North-Holland Publishing Company, 1997. 1.
- [12] Nadal F, Bréon F M. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1709.
- [13] Bacour C, Bréon F M. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(1): 80.
- [14] Jozsef Gal, Gabor Horvath, et al. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(1): 103.
- [15] Heege T, Fischer J. Proc. SPIE Ocean Optics, 2000, 10: 16.

The Multi-angle Polarization Spectral Character of Water and Its Applications in Water Color Remote Sensing

WU Tai-xia^{1,2}, YAN Lei^{1*}, XIANG Yun^{1,3}, ZHAO Yun-sheng⁴, CHEN Wei¹

1. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration and 3S Engineering Applications, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China
2. Center for Remote Sensing and Mapping Science, the University of Georgia, Athens, Georgia 30602, USA
3. Hebei Meteorological Institute & Hebei Eco-Environmental Monitoring Laboratory, Shijiazhuang 050021, China
4. College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract The reflectance of pure water is very low at visible and near infrared bands. Its spectral characteristics are not obvious. Water always shows dark hue in optical remote sensing images. This dark hue causes the difficulties in water remote sensing identification. There is an interesting phenomenon when the authors research the water polarization spectroscopy. The authors measured water's polarization spectra and reflectance spectra at different view zenith angles using the ASD spectrometer.

When the view zenith angle was zero (measured vertically), as the spectrum people commonly measure, there was no polarization phenomenon at the water surface, and the reflectance was low at each band. Along with the increase in view zenith angle, the DOP spectra curves increased evidently, while the reflectance curves only changed a little. When the view zenith angle was over 30 degree, the values of DOP spectrum were much larger than the reflectance spectrum values at the entire visible and near infrared bands. At some bands, the DOP value was several dozen times than its reflectance value. This phenomenon shows that the water's brightness in DOP image is much higher than its brightness in intensity image under the same condition. This rule was verified by the PARASOL multiangle polarization satellite data. Comparing the average brightness of DOP images with the average brightness of intensity images at 490, 670 and 865 nm band, the former is higher than the latter apparently. The brighter DOP images are better for water remote sensing identification. It is the first time that the authors found this special multiangle polarization spectral character of water. It revealed the advantage of water detection using the multiangle polarization remote sensing data. This method solved the low reflectivity problem of water color remote sensing. It will greatly improve the capability of water remote sensing identification and the retrieval accuracy of water quality parameters.

Keywords Spectrum; Polarization; Multi-angle; Remote sensing; Water color

(Received Feb. 25, 2009; accepted May 26, 2009)

* Corresponding author