

文章编号:1001-9014(2010)03-0201-04

高光谱多角度偏振信息反演盐水密度最佳波段

孙仲秋, 赵云升*, 阎国倩

(东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要:利用折射率可以建立偏振度与液体密度之间的函数关系. 以不同浓度的盐水为例, 通过 USB2000 光谱仪测得高光谱偏振信息并计算其密度, 发现在不同入射角度计算不同浓度的盐水密度的最佳波段不同, 在最佳波段范围内计算的盐水密度精度高. 当入射角趋近布儒斯特角时最佳波段范围变宽, 可以满足现今遥感技术的要求. 该研究结果为遥感技术在监测水体密度方面提供了新的科学依据.

关键词:高光谱; 偏振度; 密度; 多角度

中图分类号:TP72 **文献标识码:**A

INVERSING THE BEST BANDS OF BRINY DENSITY BY USING HYPERSPECTRAL MULTI-ANGLE AND POLARIZATION INFORMATION

SUN Zhong-Qiu, ZHAO Yun-Sheng*, YAN Guo-Qian

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

Abstract: The relation between the polarization index and the liquid density can be established in term of refractive index. USB2000 spectroscopy was used to obtain the hyperspectral polarization information of brine with different concentrations, and the briny density was calculated. It is found that the optimum wavelength bands of light incident at different angles are different for brine with different concentrations. The precision of the briny density calculated in the best bands is the highest. The best bands become wider when incident angle approaches the Brewster angle, which can satisfy the demand of the present remote sensing technology. The results provide a new scientific basis for monitoring the density of water by using remote sensing technology.

Key words: hyperspectrum; degree of polarization; density; multi-angle

引言

遥感探测器接收的地球表面各种信息主要是地球表面对太阳的电磁波能量的反射信息, 根据光的传播原理和光的反射模型, 这种反射能量的大小与入射角有密切的关系, 太阳与地球卫星下点的相对位置在遥感工作中的许多环节都极为有用^[1]. 与传统方法相比, 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, 使定量遥感成为可能^[2].

地物反射波谱曲线除随不同地物反射率不同外, 同种地物在不同内部结构和外部条件下形态表

现的反射率也不同^[3]. 在光与地物相互作用的过程中, 随着地物的表面结构、内部特征及观测角度的改变, 光的偏振特性也会发生相应的变化. 光的这种改变会使地物的某些信息得到增强, 从而可以更有效地鉴别地物的特征信息^[4].

在遥感技术的发展过程中, 人们逐渐认识到偏振信息在识别目标地物的重要性, 尤其是在近期的偏振遥感研究中^[5,6], 偏振信息更加引起人们的注意. 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

收稿日期: 2009-01-14, 修回日期: 2009-08-24

Received date: 2009-01-14, revised date: 2009-08-24

基金项目: 国家自然科学基金 (40771153); 东北师范大学科技创新平台培育项目 (106111065202); 国家自然科学基金 (40971190); 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2009CB426305)

作者简介: 孙仲秋 (1986-), 男, 吉林磐石人, 硕士生, 主要从事偏振光与定量遥感, E-mail: sunzq465@nenu.edu.cn.

* 通讯作者: 赵云升, 男, 教授, 主要从事遥感研究, E-mail: zhaoy975@nenu.edu.cn.

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].本研究从定量角度出发,根据不同液面具有不同的偏振反射特征^[11],应用偏振度与密度的函数关系计算盐水密度,并确定测量盐水密度的最佳波段,最终为遥感技术在水体与海洋定量测量方面提供了科学依据.

1 实验原理

1.1 液体表面偏振光反射机理

自然光以非布儒斯特角入射到光滑液面时,反射和折射光均变成部分偏振光,而反射光的主要振动方向与入射面垂直,折射光的主要振动方向平行于入射面.在反射光中垂直于入射面的光振动多于平行于入射面的光振动,折射光中的平行入射面的光振动多于垂直于入射面的光振动.

1.2 偏振度与折射率之间的定量关系

偏振度是描述偏振光偏振程度的物理量,它定量地表示了线偏振光占全部光的比例,其定义为

$$P = \frac{|I_{\perp} - I_{\parallel}|}{|I_{\perp} + I_{\parallel}|}, \quad (1)$$

式中, I_{\parallel} 为反射光中电矢量平行于入射面的光强, I_{\perp} 为反射光中电矢量垂直于入射面的光强. I_{\perp} 对应于 90° 偏振($I_{90^{\circ}}$), I_{\parallel} 对应于 0° 偏振($I_{0^{\circ}}$).

根据菲涅尔公式对偏振度的分析,由光强为电矢量振幅的平方得到

$$P = \frac{\left(\left(-E_{\perp} \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2 - \left(E_{\parallel} \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right)^2 \right)}{\left(\left(-E_{\perp} \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2 + \left(E_{\parallel} \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right)^2 \right)}, \quad (2)$$

式中, E_{\perp} 为入射光的电矢量垂直于入射面的分量, E_{\parallel} 为入射光的电矢量平行于入射面的分量, α 、 β 分别为入射角和折射角.当入射光为自然光时, $E_{\perp}^2 = E_{\parallel}^2$.利用光的折射定律:

$$\frac{N}{N_s} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}, \quad (3)$$

由于空气折射率 $N_s = 1$,即

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = N, \quad (4)$$

用式(3)、(4)消去式(2)的折射角得

$$P = \frac{2\sin\alpha\tan\alpha\sqrt{N^2 - \sin^2\alpha}}{N^2 - \sin^2\alpha + \sin^2\alpha\tan^2\alpha}. \quad (5)$$

由公式(5),光经过液体表面反射后的偏振度受2个因素决定:一是光的入射角,另外一个为液体的折射率.对于不同的液体,由于其物质组成成分、组成结构不同,因此它们的折射率也不相同,经过它们产生的反射光的偏振度也随之发生改变.

1.3 偏振度与液体密度间的定量关系

索伯列夫在利用格拉斯顿——代尔公式时,

$$\frac{N - 1}{\rho} = K, \quad (6)$$

发现在可见光波段,液体的 K 值为0.340, N 为折射率, ρ 为密度.

将式(6)代入式(5)的反函数中得出液体密度 ρ 与偏振度 P 的函数关系

$$\rho = \frac{\sin\alpha\sqrt{\tan^2\alpha(2 - P^2 + 2\sqrt{1 - P^2}) + P^2} - P}{PK}, \quad (7)$$

由式(7)可知,液体密度 ρ 取决于入射角与偏振度.

1.4 原理分析

不同波长的光在同一介质中的折射率是不同的,即密度不同的液体在同一波段光的折射率表现出不同的值,在相同的液体密度下不同波段光的折射率表现的值不同.所以利用高光谱偏振信息可以准确地测量液体密度,并找到最佳波段.

对于水体来说,当入射角逐渐增大时,反射光的偏振程度也逐渐增大,到达布儒斯特角时,此时偏振度最大,随后又逐渐减小^[12].本文利用高光谱偏振信息来计算不同密度的盐水在不同波长、不同入射天顶角、不同探测天顶角的偏振度,并根据式(7)得出测量的盐水密度.

2 材料和实验方法

2.1 样品准备

本实验采用盐水作为样品,溶质为食盐.溶液为纯净的自来水.按不同浓度将样品分为5份,食盐由天平称重,如表1所示.

表1 不同浓度盐水的密度

Table 1 The density of brine with different concentrations

食盐(g)	水(ml)	C 浓度(%)	ρ 密度(ml)
75	300	20	1.25000
53	300	15	1.17640
33	300	10	1.11111
16	300	5	1.05261
0	300	0	1.00000

2.2 实验仪器与实验环境

实验中采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^[13]和 Ocean Optics 公司生产的 USB2000 系列高光谱仪进行光谱测量. 二向反射光度计以镍钨灯作为光源, 在 0 ~ 70° 范围内每隔 10° 为一个光源入射天顶角; 在探测架上设有 0 ~ 60° 的 7 个探测头, 间隔为 10°. 光源与探测器之间从 0° ~ 360° 每隔 10° 为一个探测方位 (180° 是镜面反射方向). 该设备还配有偏振镜头, 能够任意角度旋转. 高光谱的波长探测范围是 340 ~ 1100nm, 探测光纤的视场角为 25°, 积分时间为 3ms ~ 65s, 每 13ms 数据传输速率刷新内存一次, 启动 USB2000 型光谱仪时将自动读取波长校准参数及 OOIBase32TM 操作软件数据.

该实验在东北师范大学高光谱偏振实验室进行. 溶液器皿为黑色塑料杯, 为了避免光线反射对实验造成影响, 用黑色胶带缠绕. 实验过程中为确保实验环境一致, 采取器皿不动, 用输液管更换样品.

2.3 数据采集与密度测量

在启动 USB2000 型光谱仪后, 进行白板反射率测量和黑暗环境的测量, 在探测方位角为 180°、不同入射天顶角与探测天顶角探测不同浓度盐水分别在 90° 偏振和 0° 偏振的数据, 每组数据为重复测量 10 次的平均值, 因此得到的数据精度较高. 最后根据所得偏振信息来计算盐水密度.

3 结果与讨论

由于高光谱实验中短波存在一定的噪声, 且式 (6) 在可见光范围内适用, 所以选择 430 ~ 760nm 为研究区域. 为表示方便, 入射天顶角我们称之为入射角, 当入射角等于探测角时液体表面的偏振度最大, 以下表述中提到入射角即为入射角等于探测角, 图

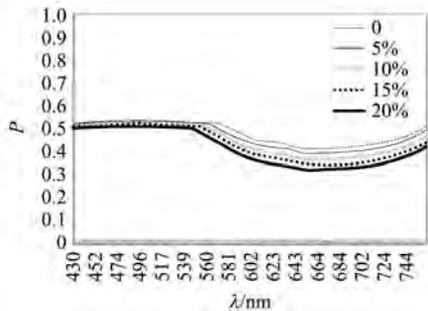


图 1 入射天顶角为 30°、不同浓度盐水的高光谱偏振度曲线
Fig. 1 Hyperspectral polarization curves of brine with different concentrations at the incident angle of 30°

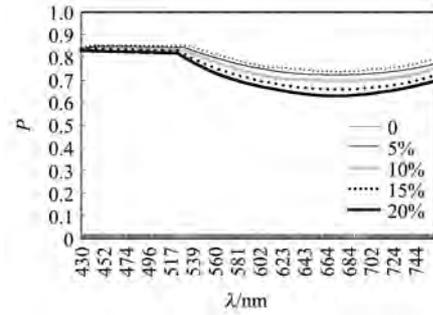


图 2 入射天顶角为 40°、不同浓度盐水的高光谱偏振度曲线
Fig. 2 Hyperspectral polarization curves of brine with different concentrations at the incident angle of 40°

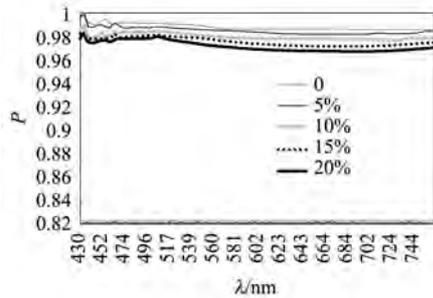


图 3 入射天顶角为 50°、不同浓度盐水的高光谱偏振度曲线
Fig. 3 Hyperspectral polarization curves of brine with different concentrations at the incident angle of 50°

1 ~ 图 3 横坐标表示波长 λ , 纵坐标表示偏振度 p .

3.1 不同入射角与不同浓度盐水高光谱偏振度的关系

本文测量数据为入射角为 30°、40°、50° 三个角度、分别在 90° 偏振和 0° 偏振时的高光谱偏振信息, 并由公式 (1) 计算偏振度. 图 1 为入射角为 30° 时不同浓度盐水在不同波段的偏振度值. 根据图 1 得出, 在同一波长随着盐水浓度的增高, 偏振度逐渐减小; 同一浓度盐水在不同波长的偏振度值不同.

图 2 ~ 3 所示得出与图 1 相同结论, 从 3 幅图中可以得出随着入射角的增加, 相同浓度的盐水在相同波段的偏振度也增加. 由于水的布儒斯特角为 53°, 即当入射角为 53° 时偏振度等于 1, 图 3 的入射角为 50°, 水的偏振度趋近于 1. 随着盐水浓度的增加, 布儒斯特角也应该增加, 即大于 53°, 所以浓度越高的盐水的偏振度在入射角为 50° 时距离 $P = 1$ 越远, 图 3 表示了这一规律.

3.2 分析与处理数据.

把不同入射角、不同浓度盐水的偏振度值按波长范围划分并用式 (7) 计算密度, 用测量得到的值

与已知值做差来检验其精度.

首先把波段(430 ~ 760nm)按可见光波段分成7个范围,由于在实际测量光谱时,波段范围越小,受外界干扰越大,所以选择的最佳波段范围应大一些.因为红光范围较宽,把红光分成两份;然后对不同范围内的偏振度求平均值,并代入式(7)中;最后根据得到的密度值与真实密度对比,找出测量密度与真实密度接近时所在的波段区间,在这个区间内精确计算密度值.表2为不同入射天顶角所测量的盐水密度,并且与实际密度对比.通过对实验结果的分析统计,测量密度与真实密度的误差较小.

由于随盐度的增加,散射系数也明显增加,而使传感器测得的信息中包含的离水辐亮度信息增加,所以测量的偏振度值要比理论值小.为了满足计算精度的要求,要将偏振度增加,故确定最佳波段时向偏振度大的方向移动,所以出现了不同浓度的盐水对应的最佳波段不同.

4 结论

(1) 偏振度最小值出现在波长为665nm左右,且以该值为对称轴在波长570 ~ 760nm范围内向两端增加,随入射角临近布儒斯特角偏振度曲线在可见光范围内趋于直线.

(2) 入射角相同的情况下,随着盐水密度的增加对应的最佳波段向可见光波段的两端方向移动且偏振度逐渐减小,并以665nm左右为中心呈对称状出现两组最佳波段.在最佳波段范围内计算的盐水

密度值精度较高.

(3) 入射角为30°时各浓度对应的最佳波段为,浓度0:613 ~ 628nm、702 ~ 717nm;5%:595 ~ 610nm、720 ~ 735nm;10%:585 ~ 600nm、729 ~ 744nm;15%:580 ~ 595nm、735 ~ 750nm;20%:575 ~ 590nm、740 ~ 755nm.

(4) 入射角为40°时各浓度对应的最佳波段为,浓度0:609 ~ 624nm、706 ~ 721nm;5%:593 ~ 608nm、722 ~ 737nm;10%:582 ~ 597nm、733 ~ 748nm;15%:575 ~ 590nm、739 ~ 754nm;20%:569 ~ 584nm、743 ~ 758nm.

(5) 入射角为50°时各浓度对应的最佳波段为,浓度0:580 ~ 750nm;5%:600 ~ 730nm;10%:610 ~ 720nm;15%:615 ~ 715nm;20%:620 ~ 710nm.

(6) 在入射角为非布儒斯特角时不同浓度的盐水在不同的入射角对应的波段不同,但是变化范围不大,临近布儒斯特角时波段范围变宽.

在实际遥感中可以根据改变卫星上搭载传感器对地物目标探测的角度与太阳天顶角变化结合.使探测天顶角与太阳入射天顶角相等且满足在所研究的角度范围,在最佳波段范围内获取水体的偏振信息,并通过偏振度的计算来反演水体的盐度.而当传感器角度与太阳入射天顶角达到布儒斯特角时所选择的波段范围更大.若不能在布儒斯特角探测,则需根据其它的角度对应的最佳波段范围内测量水体的偏振度,进而计算盐度.

本文是在实验室环境下对盐度进行测量研究

表2 不同浓度盐水在不同入射角对应的最佳测量波段计算的盐水密度与实际盐水密度对比表

Table 2 The contrast table of the different density concentrations of brine calculated at different incidence angles with the best measuring band and the actual saline density

入射角(°)	波长 λ /nm		偏振度 P	测量密度 ρ' (g/ml)	实际密度 ρ (g/ml)	浓度 C (%)	相对误差($\rho'-\rho$)
30°	613 ~ 628	702 ~ 717	0.440123	1.004442	1.000000	0	0.004442
	595 ~ 610	720 ~ 735	0.434018	1.057678	1.052610	5	0.005068
	585 ~ 600	729 ~ 744	0.427589	1.115403	1.111111	10	0.004292
	580 ~ 595	735 ~ 750	0.420572	1.180450	1.176400	15	0.003950
	575 ~ 590	740 ~ 755	0.412951	1.253635	1.250000	20	0.003635
40°	609 ~ 624	706 ~ 721	0.756856	1.006787	1.000000	0	0.006787
	593 ~ 608	722 ~ 737	0.748441	1.058997	1.052610	5	0.006387
	582 ~ 597	733 ~ 748	0.739037	1.118450	1.111111	10	0.007339
	575 ~ 590	739 ~ 754	0.729308	1.181240	1.176400	15	0.004840
	569 ~ 584	743 ~ 758	0.717986	1.256062	1.250000	20	0.006062
50°	580 ~ 750	0.983621	0.990331	1.000000	1.000000	0	-0.009669
	600 ~ 730	0.979562	1.048410	1.052610	1.052610	5	-0.004200
	610 ~ 720	0.974264	1.118665	1.111111	1.111111	10	0.007554
	615 ~ 715	0.969906	1.173061	1.176400	1.176400	15	-0.003339
	620 ~ 710	0.963994	1.243286	1.250000	1.250000	20	-0.006714

(下转第219页)

- sition and Analysis, 2005, **18**(1):105—111.
- [2] LADD P G. Pollen presenters in the flowering plants-form and function[J]. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1994, **115**(3):165—195.
- [3] CAMPOS M G, WEBBY R F, MARKHAM K R, et al. Age-Induced diminution of free radical scavenging capacity in bee pollens and the contribution of constituent flavonoids [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2003, **51**:742—745.
- [4] LI Ming-zan. *Spectroscopy Analysis Technology and Application* [M]. Beijing: Science Press(李民赞. 光谱分析技术及其应用. 北京: 科学出版社), 2006.
- [5] LIU Fei, HE Yong, WANG Li, et al. Comparison of calibrations for the determination of soluble solids content and pH of rice vinegars using visible and short-wave near infrared spectroscopy [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, **610**(2):196—204.
- [6] ZUDEA M, PFLANIA M, KAPRIELIAN C, et al. NIRS as a tool for precision horticulture in the citrus industry [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, **99**(3):455—459.
- [7] GARCIA-ALVAREZ M, HUIDOBRO J F, HERMIDA M, et al. Major components of honey analysis by near-infrared transreflectance spectroscopy [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2000, **48**(11):5154—5158.
- [8] GONZALEZ-MARTIN I, HERNANDEZ-HIERRO J M, BARROS-FERREIRO N, et al. Use of NIRS technology with a remote reflectance fibre-optic probe for predicting major components in bee pollen [J]. *Talanta*, 2007, **72**(3):998—1003.
- [9] SHAO Yong-ni, HE Yong, BAO Yi-dan. Application of visible/Near infrared spectroscopy to discriminating honey brands based on independent component analysis and BP neural network [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(邵咏妮, 何勇, 鲍一丹. 基于独立组分分析和 BP 神经网络的可见/近红外光谱蜂蜜品牌的鉴别. *光谱学与光谱分析*), 2008, **28**(3):602—605.
- [10] GIUNCHIA A, BERARDINELLI A, RAGNI L, et al. Non-destructive freshness assessment of shell eggs using FT-NIR spectroscopy [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, **89**(2):142—148.
- [11] HOU Rui-feng, HUANG Lan, WANG Zhong-yi, et al. The preliminary study for testing freshness of meat by using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(侯瑞锋, 黄岚, 王忠义, 等. 用近红外漫反射光谱检测肉品新鲜度的初步研究. *光谱学与光谱分析*), 2006, **26**(12):2193—2196.

(上接第 204 页)

的,而在实际应用当中还要考虑自然环境因素对目标偏振度的影响,如水体在波浪影响下的偏振信息校正方法等,这些问题还需要进一步的探讨.总之,利用偏振信息来反演盐度最佳波段对偏振传感器的设计与水体检测遥感技术的发展提供了可靠的依据.

REFERENCES

- [1] TAN Xiao-Sheng, GE Cheng-Hui. A method for calculating solar angles and its application on remote sensing [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*(谈小生, 葛成辉. 太阳角的计算方法及其在遥感中的应用. *国土资源遥感*), 1995, **7**(2):48—50.
- [2] Bradley G, Henderson, James Theiler, et al. The polarized emissivity of a wind-roughened sea surface: A Monte Carlo model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **88**(4):453—467.
- [3] MEI An-Xin, PENG Wang-Lu, QIN Qi-Ming, et al. *Introduction of Remote Sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press(梅安新, 彭望禄, 秦其明, 等. *遥感导论*. 北京: 高等教育出版社), 2002:35—41.
- [4] CAO Han-Jun, QIAO Yan-Li, YANG Wei-Feng, et al. Characterization and analysis of the polarization images in remote sensing [J]. *Chinese Journal of Quantum Electornics*(曹汉军, 乔延利, 杨伟锋, 等. 偏振遥感图像特性表征分析. *量子电子学报*), 2002, **19**(4):373—378.
- [5] ZHANG Chao-Yang, CHENG Hai-Feng, CHEN Zhao-Hui, et al. Detecting low reflectivity camouflage net by using polarization remote sensing [J]. *J Infrared Millim. Waves*(张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 偏振遥感识别低反射率伪装网研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2):137—140.
- [6] WU Tai-Xia, YAN Lei, XING Yun, et al. Polarization reflection effect of plane rough surface under vertical observation [J]. *J Infrared Millim. Waves*(吴太夏, 晏磊, 相云, 等. 垂直观测时水平粗糙地表偏振反射作用研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2):151—155.
- [7] Csiszar G I, Gutman P, Romanov, et al. Using ADEOS/POLDER data to reduce angular variability of NOAA/AVHRR reflectances [J]. *Remote Sensing of Environment*. 2001, **76**(3):399—409.
- [8] Marc Leroy, Bréon F M. Angular signatures of surface reflectances from airborne POLDER data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **57**(2):97—98.
- [9] Egan W G, Duggin M J. Comparative merits of multispectral optical polarization to microwave [J]. *Proceeding of SPIE*, 2002, **4481**:292—298.
- [10] Shaw J A. Degree of liner polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(15):3157—3165.
- [11] ZHAO Yun-Sheng, JIN Lun, SONG Kai-Shan, et al. Study on the characteristics of polarized reflectances on liquid surface [J]. *Journal of Northeast Normal University*(赵云升, 金伦, 宋开山, 等. 液体表面偏振反射特征研究. *东北师大学报自然科学版*), 2000, **32**(4):103—106.
- [12] LUO Yang-Jie, ZHAO Yun-Sheng, WU Tai-Xia, et al. Research and application of multi-angle polarization characteristics of water body mirror reflection [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*(罗杨洁, 赵云升, 吴太夏, 等. 水体镜面反射的多角度偏振特性研究及应用. *中国科学 D 辑:地球科学*), 2007, **37**(3):411—416.
- [13] JIN Xi-Feng, QIAO De-Lin, ZHOU Su-Xiang. The measuring device for bidirectional polarized reflectance [P]. Patent NO. 96239489.0, Mar. 4, 1998(金锡峰, 乔德林, 周素香. 二向性偏振反射测量装置: 96239489.0 专利权公告日, 1998-03-04).