

文章编号:1001-9014(2007)04-0307-05

利用多角度偏振信息计算海水密度研究初探

杜嘉¹, 赵云升¹, 吕云峰^{1,2}, 赵乃卓¹

(1. 东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024; 2. 长春师范学院 教务处, 吉林 长春 130032)

摘要:提出一种利用多角度偏振信息计算海水密度的方法,从多角度遥感与偏振光遥感的角度,找出海水的偏振特性与海水密度之间的函数关系,利用海水偏振特性与海水折射率特性对海水密度进行计算,扩展现有遥感应用的领域,同时为海洋基本参数反演开拓新思路。

关键词:海水密度;偏振信息;多角度;海水折射率

中图分类号:TP72 **文献标识码:**A

PRELIMINARY DISCUSSION ON CALCULATION OF SEAWATER DENSITY WITH MULTI-ANGLE POLARIZED INFORMATION

DU Jia¹, ZHAO Yun-Sheng¹, LV Yun-Feng^{1,2}, ZHAO Nai-Zhuo¹

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

2. Dean's Office, Changchun Normal University, Changchun 130032, China)

Abstract: The calculation method of seawater density by the multi-angle and polarized information was advanced here. The function between the properties of polarization of seawater and the seawater density was inferred from the angle of multi-angle remote sensing and polarized remote sensing. The seawater density was calculated by the polarized property of seawater and refraction index of seawater. The work will be helpful to extend the available application scope of remote sensing and exploit a new idea of ocean basic parameters' inversion.

Key words: seawater density; polarized information; multi-angle; refraction index of sea water

引言

对海水密度的研究是全球环境变化的研究、海洋生态环境研究的基础,而在以往的研究中,对海水密度数据的获取一般是通过选点观测和代表路线观测相结合的方法^[1]。由于路线观测不可能同步进行,观测点位的密度也不可能太高,试图细致的研究海水密度的平面分布特征有一定的困难。所以研究如何利用遥感来大面积、同步获取海水密度的信息就成为海洋科学、遥感科学的迫切要求。

在利用多波段、多时相、高光谱的遥感数据来提高遥感对地物识别能力的同时,人们注意到角度信息在遥感图像识别和分类中所起的影响和贡献,即地物在 2π 空间上的三维光谱特征^[2]。在来自目标地物的辐射中,除了光通量、方向和相位外还有一个

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。不同地物或同一地物不同状态产生不同的偏振态,因此探测目标地物偏振信息正成为遥感目标识别的新手段,偏振信息在遥感领域中的重要性已得到 NASA 的认可。法国的 POLDER 传感器是目前将多角度与偏振结合得最好的例子之一^[3]。

1 海水表面偏振反射光机理

1.1 海水表面反射光的偏振存在性分析

当光倾斜地入射到海水表面上时,一部分将发生反射;另一部分将折射入海水内部。设 α 为入射角,在入射光为太阳光时 α 即太阳天顶角, 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

收稿日期:2006-08-21,修回日期:2007-02-03

Received date: 2006-08-21, revised date: 2007-02-03

基金项目:国家自然科学基金(40572167)和中国科学院知识创新工程重要方向(KZCX3-SW-338-1)资助项目

作者简介:杜嘉(1980-),男,吉林通榆人,博士研究生,主要研究方向为定量遥感。

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 $E'_{10\parallel}$; 相应的折射光电矢量的分量为 $E_{20\perp}$ 和 $E_{20\parallel}$.

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

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

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 可得 $\left| \frac{E'_{10\parallel}}{E_{10\parallel}} \right| = \left| \frac{E'_{10\perp}}{E_{10\perp}} \right|$, 我们已经

知道 $E_{10\perp} = E_{10\parallel}$, 因此上式表明反射光中电矢量的平行分量 $E'_{10\parallel}$ 值和垂直分量 $E'_{10\perp}$ 值的大小相等. 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海水时, 其反射光不存在偏振性^[4].

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

$$\left| \frac{E'_{10\parallel}}{E_{10\parallel}} \right| < \left| \frac{E'_{10\perp}}{E_{10\perp}} \right|. \quad (4)$$

考察式(1)和式(2), 交界面对于入射光的两个分量 ($E_{10\perp}$ 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 $E_{10\perp}$ 按(1)式反射, 而把它的 $E_{10\parallel}$ 按式(2)反射, 公式(4)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以 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 入射角入射, 且自然光(非偏振光)时, 入射光经海水一次反射后, 其反射存在偏振现象.

1.2 海水偏振度随太阳天顶角的变化规律

根据菲涅耳公式, 对偏振度函数作进一步的分析. 由于光强为电矢量振幅的平方, 则

$$p = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} = \frac{E_{10\perp}^2 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} - E_{10\parallel}^2 \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)}}{E_{10\perp}^2 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + E_{10\parallel}^2 \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)}}. \quad (5)$$

当入射光是太阳光即自然光时, 可以认为垂直入射面和平行入射面振动的电矢量各占一半. 有 $E_{10\perp}^2 = E_{10\parallel}^2$, 故偏振度公式可以进一步简化为

$$p = \frac{2\cos\alpha\cos\beta\sin\alpha\sin\beta}{\cos^2\alpha\cos^2\beta + \sin^2\alpha\sin^2\beta}. \quad (6)$$

利用光的折射定律, 两电介质折射率之比等于光在两电介质中的速度之比, 也等于入射角正弦与折射角正弦之比, 即

$$\frac{N}{N_s} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}, \quad (7)$$

由于空气的折射率 $N_s = 1$, 于是有

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = N, \quad (8)$$

可以用折射率消去上式中的折射角, 得

$$p = \frac{2\sin\alpha\text{tg}\alpha \sqrt{N^2 - \sin^2\alpha}}{N^2 - \sin^2\alpha + \sin^2\alpha\text{tg}^2\alpha}. \quad (9)$$

对于某一海水, 其折射率 N 的值是一定的. 对 p 函数求导, 当 $p' = 0$ 时, $\alpha = \arctan(N)$, 此时该函数存在极大值^[5].

由式(9), 光波经过海水表面反射后产生的偏振特征, 理论上受 2 个因素决定和影响. 一个因素是光波的入射角大小, 另外一个因素是海水的折射率. 对于不同的海水, 由于其物质组成成分不同、组成结构也不同, 因此它们的折射率也不相同, 这样经过它们产生的反射光的偏振特征也随之发生改变, 反之, 我们可以通过海水反射光谱中的偏振特征来反推海水的性质. 对同一海水, 其偏振特征只与太阳高度角有关, 偏振度函数在太阳天顶角为 $(0^\circ, 90^\circ)$ 区间内, 先是单调增加, 在天顶角为由海水性质所决定的布儒斯特角时达到极值, 然后又开始减小, 呈抛物线形.

1.3 利用偏振信息计算海水密度

我们可以根据式 9 可以求出折射率 N , 得

$$n_1 = \frac{\sin\alpha \sqrt{\text{tg}^2\alpha(2 - p^2 + 2\sqrt{1 - p^2}) + p^2}}{p}, \quad (10)$$

$$n_2 = \frac{\sin\alpha \sqrt{\text{tg}^2\alpha(2 - p^2 + 2\sqrt{1 - p^2}) + p^2}}{p} < 1.$$

(舍去, 水体的折射率都大于 1) (11)

索伯列夫在利用格拉斯顿-代尔公式时,

$$\frac{N-1}{\rho} = K, \quad (12)$$

发现在可见光波段,液体的 K 值为 0.340,式(12)中 N 为折射率, ρ 为密度^[6].

由此,我们可以得出海水密度 ρ 与偏振度 p 和入射角 α 的函数关系

$$\rho_1 = \frac{\sin\alpha \sqrt{\lg^2\alpha(2-p^2+2\sqrt{1-p^2})+p^2}-p}{PK}. \quad (13)$$

从式(13)可知,海水的密度的计算主要取决于自然光线入射角即太阳天顶角和海水偏振度. 太阳天顶角的计算时可以根据式(14)求得

$$\cosh = \sin\phi\sin\eta + \cos\phi\cos\eta\cos t, \quad (14)$$

式(14)中, ϕ 是地理纬度,太阳赤纬角 η 可以由天文年历查出, t 由时间划算为度,1h 等于 15° ^[7]. 根据此计算方法,可计算出地球上任一点(经度、纬度)在任一时刻的太阳天顶角. 而在偏振遥感中,偏振度这个变量是可以很容易获得的,因此我们可以从理论上证明利用海水的偏振信息来对海水密度进行探测.

2 实验与数据分析

实验选取的海水样本有 3 种:来自辽宁省营口市月牙湾表层、辽宁省大连湾表层、河北省秦皇岛湾表层,海水有不同程度的污染,水质浑浊. 将上述 3 种样本分别装在透明塑料杯里,塑料杯内部用黑涂料涂黑,避免外界光的干扰.

2.1 实验数据的获取

为了获得海水的偏振反射数据,采用偏振反射三维空间分布光度计来进行测量^[8]. 传感器波长范围为 630~690nm,探测拱架上有 7 个探测头;由于偏振片的光轴方向可以代表经偏振片起偏后的入射光振动方向,为了测量方便,把起偏后入射光振动方向与水面光轴方向所成夹角为 0° 时的偏振片方位规定为 0° 方向,而把与 0° 方向正交的偏振片方位规定为 90° 方向,以下简称 0° 偏和 90° 偏,其中间又分 8 等分,每等分为 10° ;光源位置的设置与探测头设置相同,实验中用到其中 5 个方向. 测试时,让探测拱架绕被测物和白板运行一周,就获得了方位角 $10^\circ \sim 360^\circ$ 半球内、不同探测角位置上的 2π 空间三维分布偏振反射比数据.

2.2 结果分析

为了方便表示,特作以下说明:在所有图中纵轴表示偏振反射比;横轴表示探测方位角,用 β 表示; θ

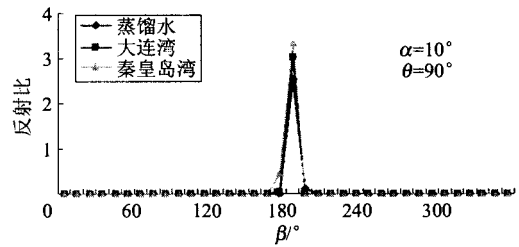


图1 相同入射角和偏振角时不同海水的反射光谱
Fig.1 Reflection spectrum of different seawater under same incidence angle and polarized angle

表示偏振角,其取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和无偏(不加偏振片状态).

2.2.1 不同海水样品对偏振反射光谱的影响

图1是3种海水样品在光线入射角和探测角均为 40° ,探测方位角 $10^\circ \sim 360^\circ$,偏振角 90° 时的反射光谱曲线.

由图1可知不同液体的偏振反射比不同. 这是由于不同的液体内部物质组成不同,对自然光的辐射反映也不同造成的,现代遥感技术就是利用这种差异性来判别不同物体种类的.

2.2.2 探测方位角、探测角对海水偏振反射光谱的影响

图2(a)是蒸馏水在光线入射角 30° , 0° 偏状态下,探测方位角 $10^\circ \sim 360^\circ$,探测角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时的反射光谱曲线;图2(b)是秦皇岛湾海水样品在光线入射角 20° , 90° 偏振状态下,探测方位角为 $10^\circ \sim 360^\circ$,探测角为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时的反射光谱曲线;图2(c)是大连湾海水样品在光线入射角 10° , 0° 偏振状态下,探测方位角为 $10^\circ \sim 360^\circ$,探测角为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时的反射光谱曲线. 由于只有在探测角 δ 与光线入射角 α 相等的时候,水的偏振反射才存在峰值,而在其他探测角反射比约为 0^[3]. 所以如果没有特殊说明本文涉及的数据中探测角 δ 都等于入射角 α .

由图2(a)可以看出,在入射角为 30° ,探测角为 30° ,探测方位角为 180° 时营口市月牙湾水体样品的反射比达到反射峰值,此时的反射比为 0° 偏振反射比;由图2(b)可以看出,在入射角为 20° ,探测角为 20° ,探测方位角为 180° 时秦皇岛湾海水样品的反射比达到反射峰值,此时的反射比为 90° 偏振反射比;由图2(c)可以看出,在入射角为 10° ,探测角为 10° ,探测方位角为 180° 时大连湾海水样品的反射比达到反射峰值,此时的反射比为 0° 偏振反射比. 由此我们可以得出,不论是二向性反射比或者是偏振反射比,反射峰值都会出现在入射

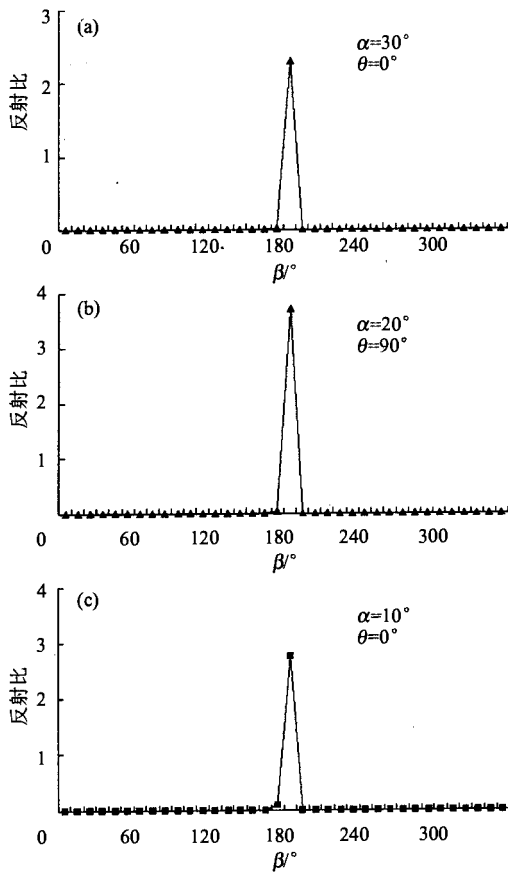


图2 不同入射角和偏振角时海水样品的反射光谱
Fig.2 Reflection spectrum of sea water under different incidence angles and polarized angles

角等于探测角,探测方位角为180°处,反射比最大.这也说明了物体的反射比不但与探测器的探测方向有关.

2.2.3 利用偏振信息计算海水密度

图3是各种海水在光线入射角α分别为10°、20°、30°、40°时,偏振角θ分别为90°和0°时的偏振反射比曲线.

从图3可以发现,在入射角10°~40°时,海水样品的90°偏振反射比逐渐增加而海水样品的0°偏振

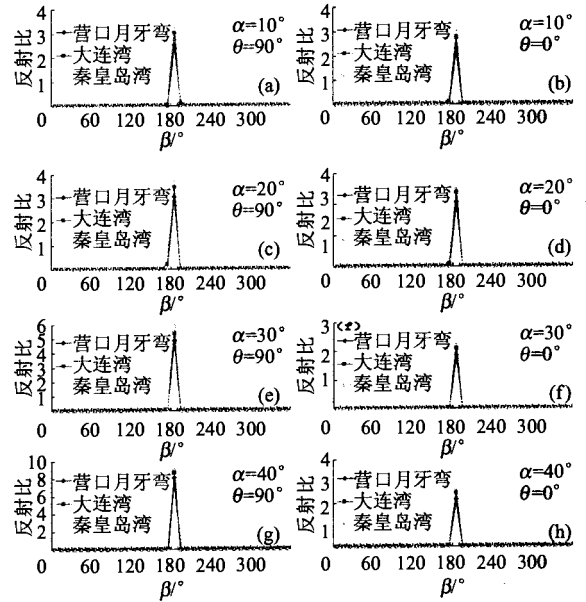


图3 不同海水在入射角α为10°、20°、30°和40°时的偏振反射光谱
Fig.3 Polarized reflectance spectrum of seawater at incidence angle 10°, 20°, 30° and 40°

反射比逐渐减小.

偏振度的原始定义为

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (15)$$

在本实验中, I_{max} 指的是90°偏振反射强度,而 I_{min} 指的是0°偏振反射强度.

通过式(15)和图3所示海水测量的数据,我们可以求得海水在入射角α为10°、20°、30°和40°时的偏振度,进而求得海水密度.表1所示为各种海水,光线入射角α分别为10°、20°、30°和40°,方位角为180°时的偏振度、通过偏振度计算出来的海水密度以及计算得到的海水密度与实际海水密度的相对误差.

表1是光线入射角α分别为10°、20°、30°和40°时,利用海水偏振度估算的海水密度和实际海水密度的对比表.从实验数据的分析结果看,利用海水

表1 利用不同入射角的海水偏振度计算的密度与实际海水的密度对比表

Table 1 The contrast table of the seawater density calculated at different incidence angles and the actual seawater density

海水样品在入射角为10°时的偏振度	利用10°时的偏振度计算的海水密度	与实际海水密度的相对误差	海水样品在入射角为20°时的偏振度	利用20°时的偏振度计算的海水密度	与实际海水密度的相对误差	实际海水密度	
营口月牙湾	0.046319	0.977456	-0.024884	0.191915	0.970426	-0.031898	1.0024
大连湾	0.045392	1.056284	0.02106	0.188976	1.028331	-0.005963	1.0345
秦皇岛湾	0.045611	1.037367	-0.008064	0.187241	1.063401	0.01683	1.0458
海水样品在入射角为30°时的偏振度	利用30°时的偏振度计算的海水密度	与实际海水密度的相对误差	海水样品在入射角为40°时的偏振度	利用40°时的偏振度计算的海水密度	与实际海水密度的相对误差	实际海水密度	
营口月牙湾	0.444181	0.969886	-0.03244	0.76283	0.970384	-0.03194	1.0024
大连湾	0.439024	1.013914	-0.0199	0.752016	1.036826	0.002248	1.0345
秦皇岛湾	0.437805	1.024481	-0.02039	0.741503	1.102864	0.054565	1.0458

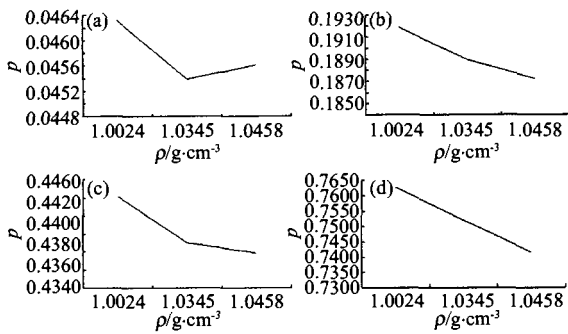


图4 入射角 α 为 10° (a)、 20° (b)、 30° (c)、 40° (d) 时的偏振度 p 与水体密度 ρ 之间的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of seawater density and degree of polarization at incidence angle 10° (a), 20° (b), 30° (c) and 40° (d)

偏振度估算的海水密度和实际海水密度有一些的差别,这跟实验中有一定的杂光干扰、在测量过程中角度控制的精度以及样品的位置有一定的关系,由于在测量过程中,必须保证测量过程中没有杂光影响和样品必须位于测量仪器 2π 空间的中心,而在实验中无法完全消除这些因素的影响。

图4是各种海水在光线入射角 α 分别为 10° 、 20° 、 30° 和 40° 时,水体偏振度 p 与水体密度 ρ 之间相互关系曲线。

从图4可以发现,在入射角 $10^\circ \sim 40^\circ$ 时,在同一入射角度下样品偏振度基本上都是随着密度的增加而减小的。

3 讨论

在偏振信息的探测上,由于信息相对较弱,普通 CCD 相机已不能满足要求,需要高性能、大面阵及大动态范围的 CCD 器件,同时也需要高量化精度的数据采集器件。从当前技术水平看,动态范围大于 70db 的 CCD 器件已经成熟且价格也较为适中,10 位以上的数据采集器件技术上也没有困难,通过精心设计、由计算机精密控制滤光片和偏振片的转动,获取偏振信息是可以实现的^[9]。现在国外的偏振仪器大多数只能测量目标的线偏振度,例如美国的 EOSP、法国的 POLDER。而我国生产的若干偏振仪器则实现了在某些波段上全偏振态测量,而且测量偏振度误差基本上不超过 ± 0.02 ,可以基本上满足海洋遥感的需求^[10]。

本文是在实验室条件下对不同海水样品进行初步偏振测量研究,还有许多问题需要进一步的探讨,比如影响目标偏振度的因素除海水密度之外,还有大气偏振、海水悬浮颗粒物散射等其他因素,因此还要研究在自然条件下偏振信息对海水密度的响

应;对于海洋来说,波浪是必然存在的,因此我们还要研究在海洋波浪影响下偏振信息校正方法;虽然根据水体反射原理,因为水体镜面反射光并未进入水体内部,所以水体成分对于水体镜面反射的影响很小,但是这种影响需要我们进一步通过实验以及理论推导来量化^[18]等。总之,偏振探测的应用是国际上的一个新兴领域,对不同密度海水进行多角度偏振遥感研究满足海洋研究、环境监测等部门的应用需求,可以扩展现有遥感应用的领域,同时为海洋基本参数估算开拓新思路。

REFERENCES

- [1] ZHOU Xu-Hua, WU Bin, ZHONG Min. Seawater density effect on sea level height variation [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science* (周旭华, 吴斌, 钟敏. 海水密度对海面高变化的影响. *中国科学院研究生院学报*), 2002, **19**(4): 410—414.
- [2] WANG Jun-Fa, GAO Xiao-Ping, CHENG Zhi-Fen, et al. Remote sensing in multi-angle and airborne imaging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汪骏发, 高晓萍, 陈志峰, 等. 多角度遥感及其航空成像仪. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(5): 229—334.
- [3] Csizsar I, Gutman G, Romanov P, et al. Using ADEOS/POLDER data to reduce angular variability of NOAA/AVHRR reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**(3): 399—409.
- [4] WANG Shu. *Crystal Optics of the Opaque Minerals* [M]. Beijing: Geological Publishing House (王曙. *不透明矿物晶体光学*. 北京:地质出版社), 1987: 15—102.
- [5] Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. North-Holland Publishing Company, 1997: 1—98.
- [6] HAN Xi-Jiang, ZHANG Yun-Tian, LV Zu-Shan. *Physical Chemistry Experiment* [M]. Harbin: Harbin institute of technology press (韩喜江, 张云天, 吕祖舜. *物理化学实验*. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社), 2004: 89—95.
- [7] JI Geng-Shan, YANG Jing, FU Jiang, et al. A study of remote sensing on water body mirror reflection [J]. *Remote Sensing of Environment* (季耿善, 杨静, 傅江, 等. 水体遥感的镜面反射特性研究. *环境遥感*), 1994, **9**(3): 195—202.
- [8] Changchun Institute of Fine Mechanics & Optics, Chinese Academy of Sciences. Patentee: Jin Xifeng, Qiao Delin, Zhou Dexiang. 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 年 3 月 4 日]
- [9] QIAO Yan-Li, YANG Shi-Zhi, LUO Rui-Zhi, et al. Research on polarized spectral monitoring for remote sensing of earth [J]. *High Technology Letters* (乔延利, 杨世雄, 罗睿智, 等. 对地遥感中的光谱偏振探测方法研究. *高技术通讯*), 2001, **11**(7): 36—39.
- [10] YANG Zhi-Wen, Gao Sheng-Gang, WANG Pei-Gang. Polarization of reflected light by earth objects [J]. *Acta Optica Sinica* (杨之文, 高胜钢, 王培刚. 几种地物反射光的偏振特性. *光学学报*), 2005, **25**(2): 241—245.
- [11] XU Xi-Ru. *Physics of Remote Sensing* [M]. Beijing: Pe-King University Press (徐希孺. *遥感物理*. 北京: 北京大学出版社), 2005: 186—189.