

文章编号: 0253-2239(2010)08-2452-07

利用偏振光技术计算海水密度的深入研究

孙仲秋 赵云升 阎国倩 卢泰男

(东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要 在可见光波段范围内,利用折射率可以建立偏振度与海水密度之间的函数关系,但是计算的海水密度误差较大。为了更加精确的计算海水密度,以色散理论为基础,确定计算海水密度最优波段。实验中以大连湾与月牙湾海水为研究对象,利用 USB2000 光谱仪测量海水偏振光谱并计算出偏振度,用反向迭代法找出与实际密度对应的偏振度误差较小的波段,即计算海水密度的最优波段。结果表明,不同密度的海水在不同入射角度计算密度的最优波段不同,在 $(650\pm 2)\sim(670\pm 2)$ nm 范围内具有较高的精度。在最优波段范围内计算的精度高,使得偏振信息计算海水密度在遥感技术中的实际应用更进一步。

关键词 遥感;光谱学;偏振度;密度

中图分类号 TP72 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2452

Further Study on Calculating the Density of Seawater with Polarized Light Technology

Sun Zhongqiu Zhao Yunsheng Yan Guoqian Lu Tainan

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

Abstract The function relation between polarization and the density of seawater at the range of visible waveband can be established by index of refraction, but there is a great calculation error. In order to calculate the density of seawater more accurately, the best waveband of calculating the density of seawater was determined based on dispersion theory. Seawater from Dalian Bay and Yueya Bay was used as study objects, and USB2000 spectrometer was used to measure the polarized spectrum of seawater, and then its polarization was calculated. Iterative inversion was used to find out the waveband which has the smallest polarization errors that match along with the actual density, which means the optimal waveband of calculating the density of seawater. The results show that seawater with different densities has different optimal wavebands to calculate the densities at different incident angles. That is to say, the calculation of density has a higher accuracy at the range of $(650\pm 2)\sim(670\pm 2)$ nm waveband. A further step of using polarization information to calculate the density of seawater in the practical application of remote sensing technology is showed.

Key words remote sensing; spectroscopy; degree of polarization; density

1 引 言

对海水密度的研究是全球环境变化和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]。随着遥感技术的兴起,大面积、适时间

步获取信息为海洋监测提供了科学依据。在利用多波段、多时相和高光谱的遥感数据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]。

收稿日期: 2009-09-23; 收到修改稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家 973 计划(2009CB426305)、国家自然科学基金(40971190,40771153)和东北师范大学科技创新平台培育项目(106111065202)资助课题。

作者简介: 孙仲秋(1986—),男,硕士研究生,主要从事偏振光遥感方面的研究。E-mail: sunzq465@nenu.edu.cn

导师简介: 赵云升(1948—),男,教授,博士生导师,主要从事定量遥感方面的研究。E-mail: zhaoy975@nenu.edu.cn (通信联系人)

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^[3]。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。法国里尔(Lille)大学研发了 POLDER(polarization and directionality of the earth reflectance) 偏振仪,后经法国航天局 CNES 支持进一步发展成航天偏振仪,并于 1996 年搭载日本的 ADEOS-I 卫星发射升空。该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^[4,5]。国内学者对偏振的研究也在进行当中,表现在偏振图像融合、云态识别和偏振双向反射分布函数研究等多方面^[6~8],而且取得了一定的成果。

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方面有更丰富的内涵,为水体遥感提供了一种新的有效手段^[9,10]。而被动遥感监测主要是以地物反射光作为研究基础的,光是电磁波,而且是横波,因此光具有偏振性。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。在传统遥感中无法利用得到的反射信息计算海水的密度,得到的是海洋表观光学参数,而利用偏振信息对海洋进行检测时可计算其密度,也可以根据入射光线的变化来调整探测器的角度接收信号,从而使偏振测量受时间变化的影响变小。因此,利用海水偏振特性与海水折射率对海水密度进行计算是可行的^[11],但是以往研究中计算得到的海水密度与实际海水密度误差较大。由于不同液面具有不同的偏振反射特征^[12],且光在媒质中的折射率随波长而异^[13],所以一定存在某一波段的偏振度计算海水密度最精确,这个波段就是计算海水密度的最优波段。该波段的确定不仅提高了计算精度,也为偏振传感器的设计提供了理论依据。

2 原理分析

2.1 液体表面偏振光反射原理

当光从大气倾斜地入射到水体表面上时,会发生反射和折射。设 n_1 和 n_2 为空气和水的折射率,将入射光分解为平行于入射面的分量,用 P 表示;垂直于入射面的分量,用 S 表示。则依据菲涅耳反射公式

$$r_P = \frac{E'_{1P}}{E_{1P}} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}, \quad (1)$$

$$r_S = \frac{E'_{1S}}{E_{1S}} = \frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)}, \quad (2)$$

由于传感器接收的是水体表面反射的能量值,所以重点讨论反射公式。 E_1, E'_1 分别为入射光、反射光的光矢量; i_1 和 i_2 分别为入射角和折射角; r_P 和 r_S 分别为 P 分量与 S 分量的振幅反射率。不考虑方向时,由(1),(2)式得到

$$r_P = r_S \frac{|\cos(i_1 + i_2)|}{\cos(i_1 - i_2)}, \quad (3)$$

当入射光垂直入射时, $i_1 = 0, r_S = r_P$,所以反射光不存在偏振特性。当 $0 < i_1 < 90^\circ$ 时,

$$r_P < r_S, \quad (4)$$

表明反射光中电矢量的平行分量的值总是小于垂直分量,当入射光为自然光时,倾斜入射经水体表面反射后,其反射存在偏振现象。而水面反射光是部分偏振光(在布儒斯特角是完全线偏振光),设反射光中自然光强为 I_n ,线偏振光强为 I_1 ,反射光总光强为 I_0 ,则

$$I_0 = I_n + I_1. \quad (5)$$

而传感器接收的光强 I 包括:水体表面的反射光强,水分子及水中悬浮物对传入水中的光的后向散射光强 I_a ,这部分光看作是自然光。所以有

$$I = I_0 + I_a, \quad (6)$$

由于自然光经过偏振片后光强为原来的 1/2,所以在 90° 偏振和 0 偏振时有

$$I_{90^\circ} = I_S = \frac{1}{2} I_n + I_1 + \frac{1}{2} I_a, \quad (7)$$

$$I_0 = I_P = \frac{1}{2} I_n + \frac{1}{2} I_a, \quad (8)$$

I_{90° 表示 S 分量的光强 I_S, I_0 表示 P 分量的光强 I_P ,由于是利用海水表面反射光计算偏振度,所以 I_a 的计算不做过多的讨论。由(7),(8)式得

$$I_1 = I_S - I_P, \quad (9)$$

偏振度是描述偏振光偏振程度的物理量,在 $[0, 1]$ 区间,定量的表示了线偏振光占全部光的比例

$$B = \frac{I_1}{I_0} = \frac{I_S - I_P}{I_S + I_P}. \quad (10)$$

由于后向散射光的存在,(10)式中的 I_0 在测量中为 I ,所以实际的偏振度值比理论值要小,主要取决于所测液体悬浮物的数量与悬浮物粒径的大小。在实际测量中只需要测量偏振角为 90° (S 分量)和 0° (P 分量)的反射能量就可以求出偏振度:

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{1 - B}{1 + B}. \quad (11)$$

由于光强与振幅的平方成正比,且入射光为自然光,所以 $E_S^2 = E_P^2$, 则

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{r_P^2}{r_S^2} = \frac{\cos^2(i_1 + i_2)}{\cos^2(i_1 - i_2)}, \quad (12)$$

$$B = \frac{\cos^2(i_1 - i_2) - \cos^2(i_1 + i_2)}{\cos^2(i_1 - i_2) + \cos^2(i_1 + i_2)}, \quad (13)$$

由光的折射定律

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (14)$$

空气的折射率为 $n_1 = 1$, 用(14)式消去(13)式的折射角得到

$$B = \frac{2 \sin i_1 \tan i_1 \sqrt{n_2^2 - \sin^2 i_1}}{n_2^2 - \sin^2 i_1 + \sin^2 i_1 \tan^2 i_1}. \quad (15)$$

表明光的入射角与液体的折射率决定偏振度的大小。

2.2 偏振度与海水密度之间的定量关系

索伯列夫在利用格拉斯顿-代尔(16)式时,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。

$$\frac{N-1}{\rho} = K. \quad (16)$$

由 $N = n_2$ 将(16)式代入(15)式的反函数得到液体密度与偏振度的关系

$$\rho = \frac{\sin i_1 \sqrt{\tan^2 i_1 (2 - B^2 + 2 \sqrt{1 - B^2}) + B^2} - B}{KB}. \quad (17)$$

2.3 根据色散理论确定最优波段

光在介质中的折射率随波长 λ 而异的现象,称为色散。而在正常色散中折射率随波长 λ 的增加而单调下降,且下降率在短波一端更大。海水在可见光范围内属于正常色散^[14],且不同密度的海水的折射率不同。根据在不同光线入射角的情况下,对不同密度海水偏振度的测量,用反向迭代法将计算的密度与实际密度对比,得出计算海水密度的最优波段。

3 材料与方法

3.1 实验材料与仪器

实验海水采自烟台月芽湾,采集时温度 20.3 °C; 大连湾,采集时温度 21.2 °C。所采样品是在两个区域均匀采集,且均为表层海水,水质清澈。海水密度 ρ 根据(18)式计算:

$$\rho = \frac{m}{v}, \quad (18)$$

式中 m 为海水的质量, v 为海水体积。海水质量 m

利用精度为 0.0001 g 的电子天平称量,体积 v 利用容积为 10 ml 与 2 ml 的色标分度吸液管分别对同一海水样品进行 5 次测量,并取其平均值,所以得到的真实海水密度精度较高。

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^[15]和 Ocean Optics 公司生产的 USB2000 系列高光谱仪进行光谱测量,图 1 为采用的二向性反射光度计。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。USB2000 型光谱仪探测范围是 340~1100 nm,探测光纤的视场角为 25°,积分时间为 3 ms~65 s,每 13 ms 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。



图 1 二向性反射光度计

Fig. 1 Spectrophotometer for bidirectional reflectance

3.2 海水偏振度的测量

为避免杂光干扰,将海水倒入黑色容器中,容器直径为 16 cm,高 23 cm。实验室温度为 20.5 °C,与采集样品时温度相近,所以温度变化对海水密度的影响很小。在相对方位角 180° 处,不同入射角(光线入射角等于探测角),分别测量 90° 偏振和 0 偏振时海水的反射能量值,依据(11)式求出偏振度。入射角从 10°~50°,5 个角度分别计算不同密度海水的偏振度。

为了保证实验精度,在实验过程中利用 5 个相同容器盛装样品,每组实验测量 5 个海水样品,并利用烧杯和滴定管保证每次实验的海水体积一致。为了避免容器中残留海水对下一组实验的影响,测量之后在清水中将容器浸泡 5 min,待其干燥后进行下一组实验。获取偏振反射信息时,分别对 90° 偏振和 0 偏振重复测量 6 次,并取其算术平均值。海

水样品数为 25 个,以 19 个样品为例求出最优波段, 剩余 6 个样品检验计算值与实际值的误差。

4 分析与讨论

由于噪声的存在,所以选择 390~900 nm 波长范围为研究区。图 2 为海水的反射光谱曲线,由于海水清澈,所以接近纯水的反射光谱曲线,在蓝绿波段为主要反射区域,在近红外波段吸收强烈。

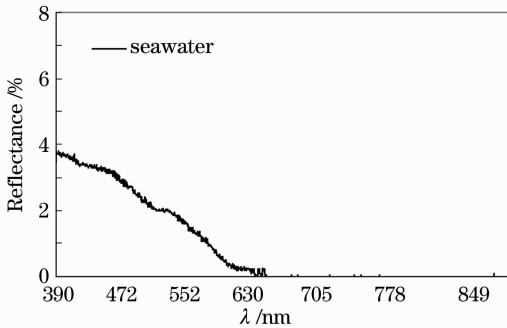


图 2 海水反射光谱

Fig. 2 Reflectance spectrum of seawater

4.1 不同密度海水的偏振度随波长变化规律

实验过程中测量数据为入射角 10°~50°,海水密度范围为 1.01165~1.035242 g/cm³,由于海水密度差异不大,所以它们的折射率差异不太明显,其偏振度随波长变化也不太明显。故选择最大密度与最小密度偏振度曲线对比。图 3 为入射角 20°,入射角等于探测角,密度为 1.01165 g/cm³ 与 1.035242 g/cm³ 的海水的与纯水的偏振度对比曲线。

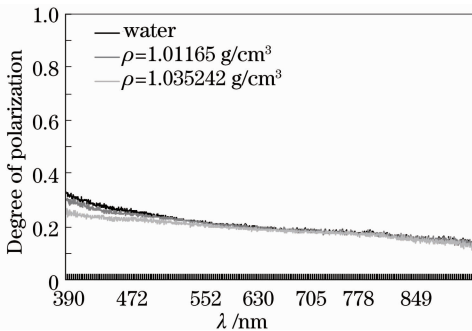


图 3 入射角为 20°不同密度海水与纯水的偏振度曲线

Fig. 3 Degree of polarization curves of different seawater density and water at the incident angle 20°

由(16)式可知,在可见光范围内海水的密度与其折射率成正比例关系。当入射角不变时,偏振度随海水密度的增加而减小,即偏振度与海水折射率成反比。各种颜色的光的偏振度略有差别,波长越短,偏振度越高^[12],实际测得的海水偏振度随波长变化与理论相符。

4.2 在不同入射角时不同密度海水的偏振度变化规律

图 4 是在 5 个入射角(10°~50°)情况下测得密度为 1.01165 g/cm³ 与 1.035242 g/cm³ 的海水的偏振度曲线,相邻的两条曲线是同一角度不同密度的,从下到上依次为 10°,20°,30°,40°和 50°时不同密度的 5 组偏振度曲线。

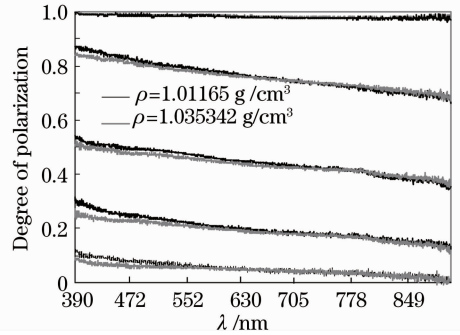


图 4 不同入射角时海水的偏振度曲线

Fig. 4 Polarization curves of different seawater densities at the different incident angles

从图 4 中可以发现,在 10°~50°范围内随入射角的增加偏振度逐渐增大。这是由于自然光以非布儒斯特角入射光滑液面时,反射光变成部分偏振光,而反射光的主要振动方向与入射面垂直,所以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,即 S 分量随角度增加而增大,P 分量随角度的增加而减小。在 50°时偏振度趋直线,这是由于入射角临近海水的布儒斯特角,各种颜色的光的偏振度接近最大值。水体偏振度在不同入射角条件下的变化曲线,如图 5 所示,当入射角为布儒斯特角时,偏振度 B 存在最大值,随后偏振度又逐渐减小。故水体的偏振度在入射角(0,90°)区间内,先是单调递增,在入射角为由水体性质所决定的布儒斯特角

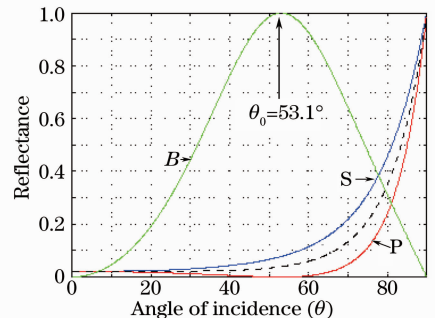


图 5 水体偏振度和反射率在不同入射角条件下变化的曲线图

Fig. 5 Curves of water's polarization and reflectance with angle of incidence

时达到极值,然后又开始递减,呈抛物线形。

4.3 计算海水最优波段的确定

通过对 19 个测试样品的偏振度的测量,利用反代法将偏振度代入(17)式计算海水密度,并与实际海水密度做比较,在误差较小的范围内确定计算海水密度的最优波段范围,最优波段范围内所对应的偏振度是它们的平均值。并利用 6 个检验样品来比较计算值与实际值的误差。

表 1 是在不同入射角,检验样品在最优波段计算值 ρ' 与实际值 ρ 对比表,表中偏振度为实际测得值。

表 1 不同入射角时不同密度海水在最优波段的计算值与实际值对比表

Table 1 Contrast of the different seawater densities calculated at different incidence angles in the optimal band and the actual seawater densities

Incident angles	λ /nm	B	δ	$\rho'/(g/cm^3)$	$\rho/(g/cm^3)$	$\rho-\rho'/(g/cm^3)$
10°	651~671	0.04592927	0.00201022	1.011374	1.011650	0.000276
	650~670	0.04587868	0.001891164	1.015665	1.016138	0.000473
	649~670	0.04583371	0.002025185	1.019489	1.019542	0.000053
	649~671	0.04577823	0.002015186	1.024212	1.024167	-0.000045
	649~671	0.04510776	0.001948184	1.029973	1.029658	-0.000315
	648~670	0.04564836	0.002020110	1.035318	1.035342	0.000024
20°	651~670	0.18983991	0.002019826	1.011189	1.011650	0.000461
	651~671	0.18961048	0.002017499	1.015744	1.016138	0.000394
	650~671	0.18938673	0.002022624	1.020197	1.019542	-0.000655
	651~672	0.18914669	0.002018622	1.029524	1.024167	-0.000820
	650~671	0.18891989	0.002137621	1.029524	1.029658	0.000134
	648~670	0.18866382	0.002008622	1.034662	1.035342	0.000680
30°	650~670	0.43926218	0.001917146	1.011860	1.011650	-0.000210
	649~670	0.43872696	0.001902630	1.016485	1.016138	-0.000347
	649~670	0.43836763	0.001907396	1.019857	1.019542	-0.000315
	649~670	0.43787016	0.001922294	1.023914	1.024167	0.000253
	648~670	0.43726455	0.001907396	1.029182	1.029658	0.000476
	648~669	0.43658667	0.002019931	1.035096	1.035342	0.000246
40°	652~671	0.75617286	0.002018868	1.011011	1.011650	0.000639
	652~672	0.75527228	0.002002117	1.016563	1.016138	-0.000425
	651~671	0.75480716	0.002013755	1.019434	1.019542	0.000108
	650~670	0.75400962	0.002010513	1.024365	1.024167	-0.000198
	650~671	0.75318482	0.002020868	1.029472	1.029658	0.000186
	648~670	0.75212196	0.002013191	1.036066	1.035342	-0.000724
50°	650~671	0.98214361	0.001131510	1.011994	1.011650	-0.000344
	650~672	0.98183319	0.001260886	1.016465	1.016138	-0.000327
	650~670	0.98159895	0.001285502	1.019821	1.019542	-0.000279
	650~670	0.98126249	0.001135427	1.024615	1.024167	-0.000448
	649~669	0.98089620	0.001096511	1.029801	1.029658	-0.000143
	648~669	0.98051720	0.001112491	1.035131	1.035342	0.000211

通过表 1 中在相同入射角不同密度对应的最优波段对比中发现,不同密度对应的最优波段不同,差异为 ± 2 nm,且随密度的增加最优波段向波长短的

由于在实际测量光谱时,波段范围越小,受外界干扰越大,所以选择的最优波段范围应大一些。而波段范围变大时应考虑其所对应的偏振度的离散程度,这里通过求最优波段对应的偏振度标准差 δ 来确定偏振度的稳定程度。由表 1 可知,不同密度海水的偏振度最大差值为 0.0040509,所以在确定最优波段时选择最大差值的一半(0.00202545)作为不同密度海水偏振度标准差的上限。实际密度与计算值的误差较小,波动范围在 $-0.00082\sim 0.00068$ g/cm^3 之间。

方向移动。这是由于偏振度随海水密度的增加而减小,而由于后向散射光的存在,且随海水密度的增加而变强,使实际测得的偏振度变小,所以计算出的海

水密度值大于实际值。为了使计算值与实际值更接近,所以要使偏振度值增大一些,而波长越短,偏振度越高,故而向波长短的方向移动才可以使偏振度增加。

在确定最优波段过程中发现,在入射角为 50° 时,趋近海水的布儒斯特角,所测得的偏振度趋直线

表 2 入射角为 50° 时不同密度海水在不同波段的计算值与实际值对比表

Table 2 Contrast of the different seawater densities calculated at incidence angles 50° with different bands and the actual seawater densities

Incident angles	λ/nm	B	δ	$\rho' / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho - \rho'$
50°	616~699	0.98220585	0.001594821	1.011095	1.011650	0.000555
	616~698	0.98184317	0.001581921	1.016322	1.016138	-0.000184
	616~698	0.98161410	0.001575652	1.019604	1.019542	-0.000062
	615~699	0.98124247	0.001590654	1.024899	1.024167	-0.000732
	615~698	0.98088610	0.001578609	1.029943	1.029658	-0.000285
	614~697	0.98049410	0.001506483	1.035455	1.035342	-0.000113
50°	597~727	0.98219747	0.002024328	1.011216	1.011650	0.000434
	597~728	0.98180389	0.002000764	1.016885	1.016138	-0.000747
	596~728	0.98159376	0.002019279	1.019895	1.019542	-0.000353
	596~727	0.98126716	0.002013734	1.024549	1.024167	-0.000382
	595~728	0.98086419	0.002028287	1.030253	1.029658	-0.000595
	594~727	0.98048183	0.002022871	1.035627	1.035342	-0.000285

5 结 论

在 390~900 nm 范围内,不同密度海水的偏振度随波长的增加而减小,且在短波一端较明显。在入射角 $10^\circ \sim 50^\circ$ 范围内,随角度的增加海水的偏振度也增加。当入射角一定时,不同密度的海水对应的最优波段不同,随海水密度的增加略向短波方向移动。在入射角为 $10^\circ \sim 40^\circ$ 范围内,最优波段以 650~670 nm 为基础波动范围 ± 2 nm,计算海水密度误差值在 $-0.00082 \sim 0.00068 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间;而在入射角 50° 时,有 3 个最优波段范围,分别为 $(650 \pm 2) \sim (670 \pm 2)$ nm, $(615 \pm 1) \sim (668 \pm 1)$ nm, $(596 \pm 2) \sim (727 \pm 2)$ nm,这 3 个波段的计算值与实际值误差与其它角度误差值相近。

实验是在实验室环境下对平静海水面进行研究的,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,这也是以后研究中的重点和难点。利用偏振信息计算海水密度最优波段的确定可作为海水密度探测与评估的多/高光谱遥感最优选择波段。

参 考 文 献

1 Zhou Xuhua, Wu Bin, Zhong Min. Seawater density effect on sea

形,而且随波长的变化与其它角度相比不明显。表 2 是在入射角 50° 时,不同波段计算的海水密度与实际密度对比表。当波段范围变宽时,计算值与实际值的误差并没有明显变化,精度也比较高。这说明在临近海水布儒斯特角时计算密度的波段可以选择范围更多,测量者可根据实际情况选择所需波段。

- level height variation[J]. *J. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2002, **19**(4): 410~414
- 周旭华, 吴斌, 钟敏. 海水密度对海面高变化的影响[J]. 中国科学院研究生院学报, 2002, **19**(4): 410~414
- 2 Wang Junfa, Gao Xiaoping, Chen Zhifen *et al.*. Remote sensing in multi-angle and airborne imaging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2001, **20**(5): 229~334
- 汪骏发, 高晓萍, 陈志峰等. 多角度遥感及其航空成像仪[J]. 红外与毫米波学报, 2001, **20**(5): 229~334
- 3 B. G. Henderson, J. Theiler, P. Villeneuve. The polarized emissivity of a wind-roughened sea surface; a Monte Carlo model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **88**(4): 453~467
- 4 I. Csiszar, G. 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
- 5 M. Leroy, F.-M. Bréon. Angular signatures of surface reflectances from airborne POLDER data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **57**(2): 97~98
- 6 Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel image fusion algorithm for multi-band polarimetric image based on visible light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1067~1072
- 张晶晶, 方勇华. 基于可见光的多波段偏振图像融合新算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1067~1072
- 7 Cheng Tianhai, Chen Liangfu, Gu Xingfa *et al.*. Cloud phase classification and validation based on multi-angular polarized characteristics of cloud[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1849~1855
- 程天海, 陈良富, 顾行发等. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1849~1855
- 8 Feng Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei *et al.*. Study of polarized bidirectional reflectance distribution function model for

- painting surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 290~294
冯巍巍, 魏庆农, 汪世美等. 涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 290~294
- 9 W. G. Egan, M. J. Duggin. Comparative merits of multispectral optical polarization to microwave remote sensing [C]. *SPIE*, 2002, **4481**: 292~298
- 10 J. A. Shaw. Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15): 3157~3165
- 11 Du Jia, Zhao Yunsheng, Lü Yunfeng *et al.*. Preliminary discussion on calculation of seawater density with multi-angle polarized information[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(4): 307~310
杜 嘉, 赵云升, 吕云峰等. 利用多角度偏振信息计算海水密度研究初探[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(4): 307~310
- 12 Zhao Yunsheng, Jin Lun, Song Kaishan *et al.*. Study on the characteristics of polarized reflectance on liquid surface[J]. *J. Northeast Normal University*, 2000, **32**(4): 103~106
赵云升, 金 伦, 宋开山等. 液体表面偏振反射特征研究[J]. *东北师大学报自然科学版*, 2000, **32**(4): 103~106
- 13 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1984. 234~243
赵凯华, 钟锡华. *光学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984. 234~243
- 14 Jin Xifeng, Qiao Delin, Zhou Suxiang. The measuring device for bidirectional polarized reflectance, Patent No. 96239489.0
金锡峰, 乔德林, 周素香. 地物偏振二向性反射比测量装置, 专利号: 96239489.0
- 15 Zhang Zhixiang. *The Polarization of Light* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985. 26~37
张之翔. *光之偏振* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985. 26~37