

# 不同线偏振光对水体吸收系数测量的影响

刘 佳 黄海清\* 白 雁 何贤强

(国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要** 通过对紫外-可见光分光光度计的光源偏振性进行系统测量,并开展了光源偏振性对水体黄色物质和颗粒物光谱吸收系数测量影响的实验研究,结果表明,紫外-可见光分光光度计光源具有显著的偏振性,但分光光度计光源偏振对水体黄色物质光谱吸收系数测量的影响可忽略不计,对水体颗粒物光谱吸收系数测量的影响也较小。

**关键词** 海洋光学;吸收系数;分光光度计;偏振;颗粒物

**中图分类号** P714 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0601003

## Influences of Liner Polarization Light on the Measurement of Water Absorption Coefficient

Liu Jia Huang Haiqing Bai Yan He Xianqiang

(State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

**Abstract** The polarization of the output light emitted by ultraviolet-visible spectrophotometer is systematically measured, and its influences on the measurement of the absorption coefficients of the colored dissolved organic matter (CDOM) and particles are researched. The results reveal that the output light of the ultraviolet-visible spectrophotometer has significant polarization. Yet, the polarization of ultraviolet-visible spectrophotometer light has negligible influence on the measurement of the absorption coefficients of the CDOM and particles.

**Key words** oceanic optics; absorption coefficient; spectrophotometer; polarization; particle

**OCIS codes** 010.4450; 120.4640; 300.1030; 350.0350

## 1 引 言

水体组分吸收系数(包括黄色物质、藻类颗粒、有机碎屑)是海洋水色的决定因子之一,也是海洋水色卫星遥感的基础参数<sup>[1]</sup>。水体光谱吸收系数属于固有光学特性,它只与水体成分有关,不随光照条件变化<sup>[2-3]</sup>。水体组分光吸收性质已成为海洋光学的重要研究内容,也是建立水色遥感反演模型的基础。同时,水体主要成分的光谱吸收系数在卫星遥感水体色素、初级生产力、光化学和光生物学等方面起着

十分重要的作用<sup>[4]</sup>。水体吸收系数测量主要有两种方法,分别是利用水体吸收衰减仪(如 AC-S)进行现场原位测量,或者利用紫外-可见光分光光度计在实验室中对现场采集的样品进行测量。这两种方法各有优缺点,原位测量理论上可以获得较为精确的结果,但一般只能测量水体总吸收系数,无法区分各组分吸收系数。而实验室紫外-可见光分光光度计测量方法是目前获取水体组分光谱吸收系数的主要方法,如黄色物质、总颗粒物、非色素颗粒物、色素颗

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(41322039, 41271378, 40976110)、国家科技支撑计划(2013BAD13B01)、全球变化与海气相互作用专项(GASI-03-03-01-01)

作者简介: 刘 佳(1988—),男,硕士研究生,主要从事海洋水色偏振遥感方面的研究。E-mail: 763533751@qq.com

导师简介: 何贤强(1978—),男,研究员,博士生导师,主要从事海洋水色遥感方面的研究。

E-mail: hexianqiang@sio.org.cn

\* 通讯联系人。E-mail: huanghaiqing@sio.org.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

粒物的吸收系数<sup>[1-2,4-7]</sup>。王林等<sup>[1]</sup>对 AC-S 和紫外-可见分光光度计(UV2550)测量获得的水体光谱吸收系数进行了比较分析,发现短波段 AC-S 测得吸收系数普遍低于 UV2550 测量结果,两种方法测量结果相对误差可达 40%。张亭禄等<sup>[7]</sup>也对两种方法测量水体光谱吸收系数做了对比分析,发现两种测量方法对实验室单种培养的藻类水体和黄海水域的水体光谱吸收系数的测量结果均具有很高的一致性,其中实验室单种培养藻类水体的测量结果的一致性好于黄海水体的测量结果的一致性。

实验室利用紫外-可见光分光光度计测量水体组分吸收系数过程中有诸多因素可影响测量结果的准确度,如光源偏振、波长准确度、光谱带宽、杂散光、光度线性和吸收池常数等<sup>[8-11]</sup>。Morgan 等<sup>[12]</sup>利用偏振光源研究了浑浊介质散射对成像分辨率的影响。Zimnyakov 等<sup>[13]</sup>根据蒙特卡罗模拟表明散射偏振光的运用能够提高散射介质中的成像质量。Zimnyakov 等<sup>[14-15]</sup>研究发现散射介质(牛奶和人体生物组织)的吸收作用能够大幅度增加后向散射光的偏振度。这些研究表明水体组分吸收和散射对光源偏振敏感,但当前利用紫外-可见光分光光度计测量水体组分光谱吸收系数时均没有考虑仪器本身光源的偏振性,亦未有关于光源自身偏振特性对水体组分吸收系数测量精度影响的研究。由于紫外-可见光分光光度计光路中各种镜面反射及透射作用,可能导致其出射光源具有偏振性,进而可能影响其吸收系数的测量结果。本文针对该问题,系统地开展了紫外-可见光分光光度计光源偏振性的测量,并进行了光源偏振性对水体黄色物质和颗粒物光谱吸收系数测量影响的实验研究。

## 2 实验方法

### 2.1 分光光度计光源偏振性测量

通过在紫外-可见光分光光度计(PE350)光源出瞳口放置线偏振片(LPWISE050-A)改变光源的线偏振方向,并利用地物波谱仪(ASD)测量通过线偏振片后的辐亮度。LPWISE050-A 线偏振片在可见光波段具有高透射率和超过 99% 的偏振效率,但在紫外波段却具有强吸收特性,因此本文研究仅限于可见光波段。实验前,将 ASD 光纤探头固定在紫外-可见光分光光度计光路内并对准光路。实验过程中依次设置紫外-可见光分光光度计出射中心波长,分别为 400、500、600、700、800、900 nm。对每个波长依次旋转线偏振片的角度,分别为 0°、45°、90°、

135°,然后依次测量每个角度下的辐亮度 20 次,并将 20 次的平均值作为测量辐亮度值。通过对比不同角度下的辐亮度值可判断紫外-可见光分光光度计光源的偏振特性。

### 2.2 光源偏振对水体组分吸收系数测量影响的实验

#### 2.2.1 样品采集

2012 年 10 月 25 日在杭州西湖采集了 6 个站点的水样(见图 1),其中站点 1、3 和 6 采集了平行样。采集的水样被快速带回实验室进行过滤,分别获得黄色物质(CDOM)和总颗粒物(TSM)样品。CDOM 样品为过滤后的滤液,滤膜用 Whatman 公司的聚碳酸酯膜,直径为 47 mm,孔径为 0.22 μm;TSM 样品为过滤膜样,滤膜为 Whatman 公司的 GF/F 玻璃纤维滤膜,直径为 47 mm,孔径为 0.7 μm。



图 1 西湖水样采集站位图

Fig. 1 Location of the sampling stations in the West Lake

#### 2.2.2 黄色物质样品吸收系数测量

实验室内使用紫外-可见光分光光度计 PE350 测量黄色物质吸光度(OD,  $V_{OD}$ )。首先测量未加线偏振片时的 OD,随后在分光光度计的光路中加入线偏振片,并依次测量不同旋转角度下的 OD 值。根据(1)式计算得到光源不同偏振角度下的 CDOM 吸收系数:

$$a_{CDOM}(\lambda) = \frac{2.303}{l} \{ [V_{OD-CDOM}(\lambda) - V_{OD-Mill-Q}(\lambda)] - V_{OD-null} \}, \quad (1)$$

式中  $V_{OD-CDOM}(\lambda)$  为黄色物质样品的吸光度,  $V_{OD-Mill-Q}(\lambda)$  为纯水参比样的吸光度,  $V_{OD-null}$  为长波处的残余吸收,取 700 nm 附近平均值,  $l$  为比色皿的长度(取值为 0.1 m)。

#### 2.2.3 颗粒物样品吸收系数测量

利用带积分球的紫外-可见光分光光度计 PE950 测量颗粒物样品的吸收系数。实验流程与 CDOM 偏振测量类似,首先测量未加偏振片时样品

的透射率和反射率,然后在分光光度计的光路中加入线偏振片,并依此测量不同偏振角度(0°、60°、120°)下的透射率和反射率。再根据(2)式、(3)式和(4)式计算得到颗粒物的吸收系数:

$$a_{TSM}(\lambda) = \frac{2.303A}{\beta V} V_{OD-TSM}(\lambda), \quad (2)$$

$$V_{OD-TSM}(\lambda) = -\lg \left[ 1 - \frac{1 - \rho_T + R_f(\rho_T - \rho_R)}{1 + R_f \rho_T \tau} \right], \quad (3)$$

$$\beta = [C_1 + C_2 V_{OD-TSM}(\lambda)]^{-1}, \quad (4)$$

式中  $a_{TSM}(\lambda)$  为颗粒物吸收系数,  $V$  为过滤的水样体积,  $A$  为滤纸上富集有颗粒物的滤纸面积,  $V_{OD-TSM}(\lambda)$

为样品滤纸测得的光学密度,  $\rho_T$  为样品透射率,  $\rho_R$  为样品反射率,  $R_f$  为参比膜反射率,  $\beta$  为光程放大校正因子,  $C_1$ 、 $C_2$  为光程放大因子的经验系数<sup>[16-17]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 紫外-可见光分光光度计光源的偏振性

图 2 为不同波长(400、500、600、700、800、900 nm)、不同线偏振角度的辐亮度值。很明显,不同线偏振角度紫外-可见光分光光度计 PE350 辐亮度值有较大的差异,说明光源具有偏振性<sup>[18-25]</sup>。

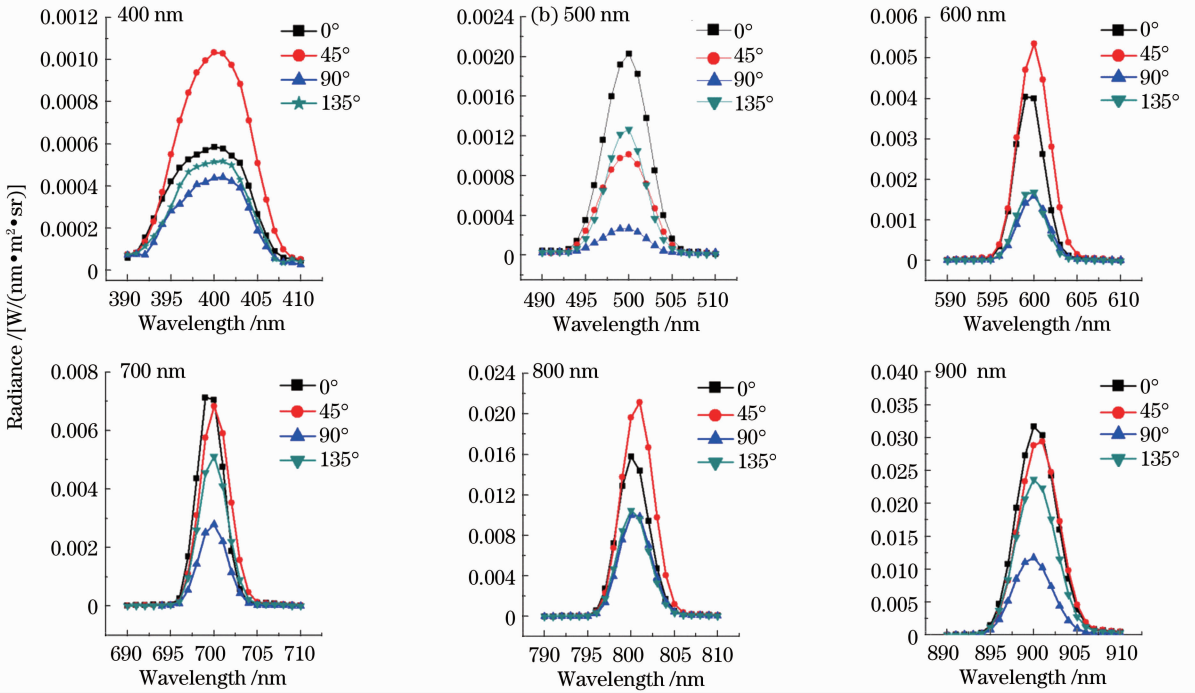


图 2 不同中心波长及线偏振角度下分光光度计(PE350)光源的辐亮度

Fig. 2 Output radiances of spectrophotometer (PE350) at different central wavelengths and linear polarizing angles

图 3 为紫外-可见光分光光度计光路示意图,分光光度计光源经过一系列镜面的反射、折射后,经过光栅分光成单色光波,再经过比色皿到达探测器。根据菲涅耳反射定律和折射定律可得出光波经过镜面反射后其光波偏振态发生变化,出射光波偏振度  $P$  为

$$P = \frac{2 \times \sin \theta_1 \tan \theta_1 \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta_1}}{N^2 - (\sin \theta_1)^2 + (\sin \theta_1 \times \tan \theta_1)^2}, \quad (5)$$

式中  $N$  为折射率,  $\theta_1$  为入射角<sup>[26-27]</sup>。

当紫外-可见光分光光度计钨灯光源以非垂直的角度入射到光路中设置的各种反射和折射镜面时,入射光波被分解为与传播方向垂直和平行的  $s$

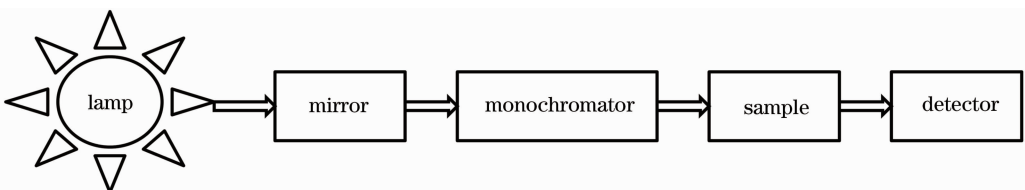


图 3 分光光度计光路示意图

Fig. 3 Sketch map of the optical path of spectrophotometer

波和 p 波,由于 s 波和 p 波的反射率和透射率存在差异,导致反射光和透射光为部分偏振光,进而使得入射到比色皿的光波具有偏振性,不同偏振角度下光波辐亮度具有较大差异。

### 3.2 光源偏振对水体组分吸收系数测量的影响

#### 3.2.1 光源偏振对黄色物质吸收系数测量的影响

图 4 为 6 个采样站位不同线偏振角度下(0°、45°、90°、135°)黄色物质吸收系数的测量结果,其中 X1、X3、X6 站位设有平行样。总体上,黄色物质吸

收系数在不同线偏振角度下的测量结果( $a_{p-CDOM}$ )与未加偏振片时测量结果( $a_{np-CDOM}$ )没有显著的变化。图 5 为对应于典型的水色卫星波段(412、443、490、510、531、555、670 nm)不同线偏振角度下测量结果与未加偏振片时测量结果的散点比较。比较散点均分布在 1:1 对角线附近,线性相关系数  $r^2$  在 99% 以上,说明分光光度计光源的偏振对黄色物质吸收系数测量结果影响很小,可以忽略不计。图中 SD 为线性回归的标准差。

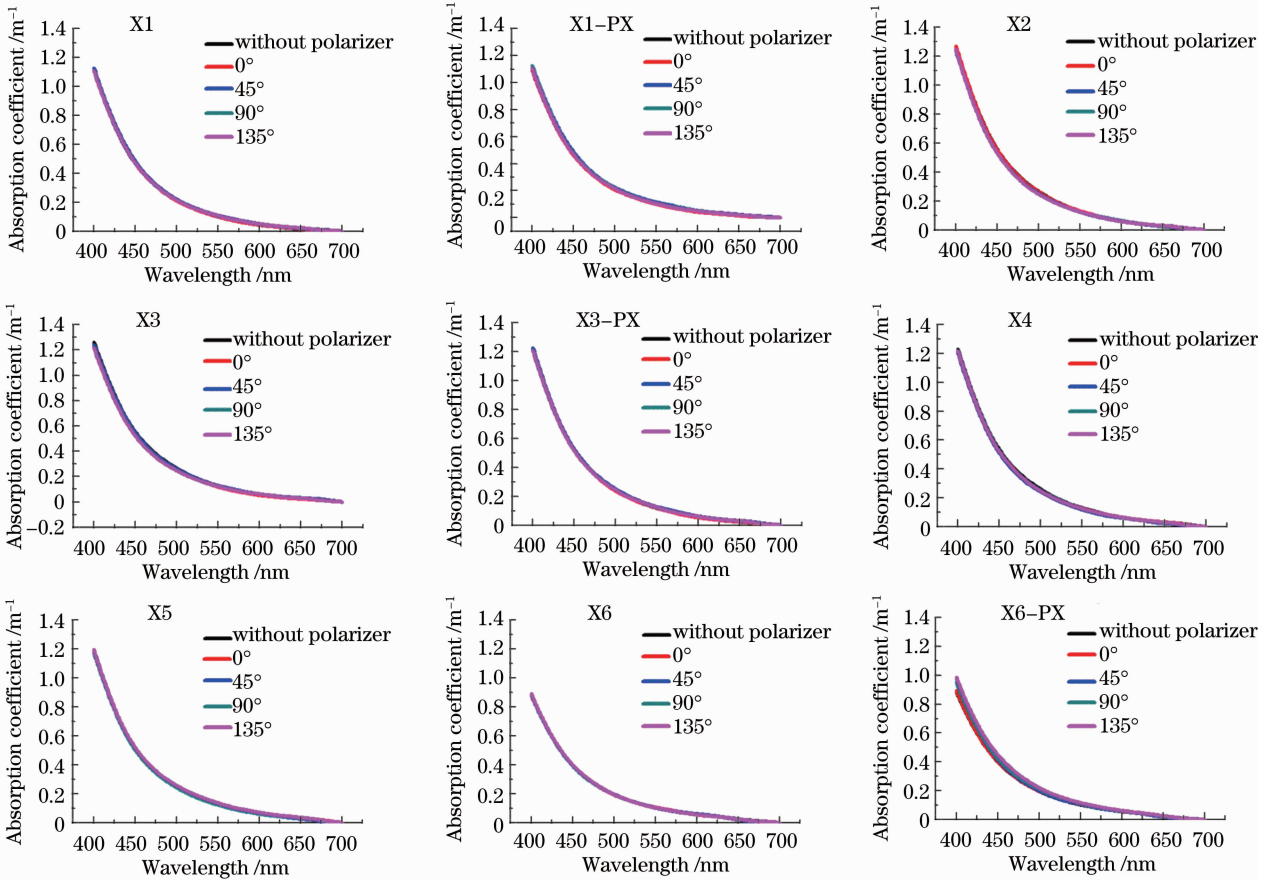


图 4 不同线偏振角度下黄色物质吸收系数测量结果与未加偏振片测量结果的比较

Fig. 4 Comparison of the CDOM absorption coefficients measured at different polarizing angles and without polarizer

以 X1、X3、X6 三个站位平行样间在未加偏振片时测量结果的差异来检验测量本身可能引起的不确定性大小。表 1 给出了这三个站位 7 个不同特征波段处(412、443、490、510、531、555、670 nm)未加偏振片时平行样测量结果的相对偏差值

$$\frac{a_{np-CDOM} - a_{p-CDOM}}{a_{np-CDOM}} \times 100\%$$

从表 1 可以看出,平行样间测量结果相对偏差平均为 1.003%。同时,求出全部站位黄色物质吸收系数在不同线偏振角度下测量结果与未加偏振片时测量结果的相对偏差(见表 2)。从表 2 可以看出,光源偏振引起的测量结果相对偏差

表 1 未加偏振片时黄色物质平行样间吸收系数相对偏差  
Table 1 Relative deviations of the CDOM absorption coefficients between the parallel samples measured without polarizer

Wavelength / nm	Station		
	X1 / %	X3 / %	X6 / %
412	—	—	0.546
443	—	—	0.297
490	-2.254	-2.197	0.344
510	-1.349	-1.471	0.209
531	-0.608	-0.782	0.137
555	0.174	-0.286	0.077
670	0.101	-0.38	0.022
Average	1.003%		

平均值为 0.889%，此偏差完全掩盖在平行样测量本身可能导致的不确定性范围之内，说明分光光度

计光源偏振对水体黄色物质吸收系数测量结果的影响甚微。

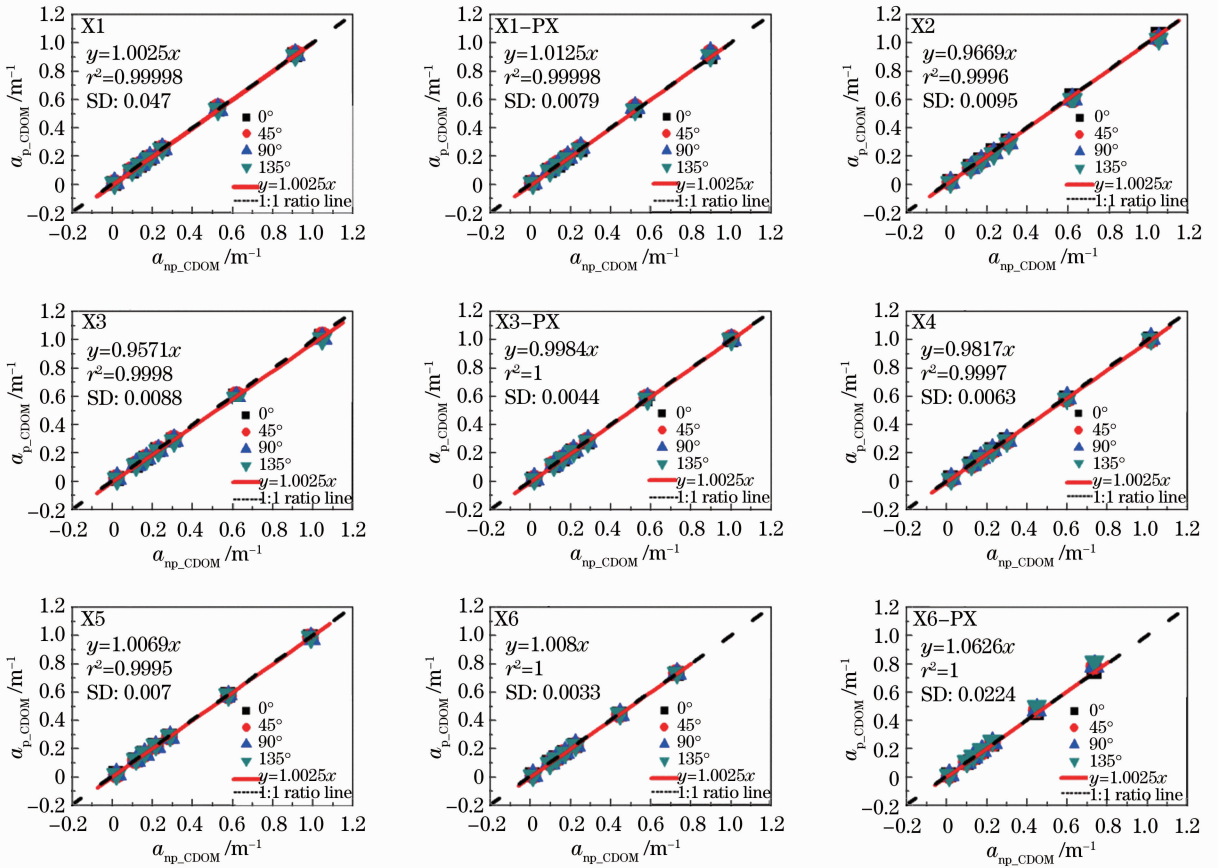


图 5 不同线偏振角度下黄色物质吸收系数测量结果与未加偏振片测量结果的散点比较

Fig. 5 Scatter plot comparison between the CDOM absorption coefficients measured at different polarizing angles and without polarizer

表 2 黄色物质样品不同偏振角度测量结果与未加偏振片测量结果的相对偏差值

Table 2 Relative deviations of the CDOM absorption coefficients at different polarizing angles and without polarizer

Wavelength / nm	X1 / %				X2 / %				X3 / %			
	0°	45°	90°	135°	0°	45°	90°	135°	0°	45°	90°	135°
412	—	—	—	—	0.205	-2.585	-2.416	-2.633	-2.36	-1.84	-1.041	-0.514
443	—	—	—	—	-0.428	-2.764	-2.554	-2.72	-2.284	-2.14	-0.883	-0.667
490	-1.752	-2.145	-0.991	0.463	-0.275	-1.761	-1.773	-2.042	-1.396	-1.036	-0.475	-0.387
510	-0.655	-1.388	-0.544	0.79	-0.119	-0.985	-1.147	-1.537	-1.035	-0.702	-0.007	-0.268
531	0.134	-0.593	0.162	0.926	-0.06	-0.73	-0.66	-0.824	-0.565	-0.207	-0.06	-0.155
555	0.944	0.167	0.681	1.105	0.365	-0.249	-0.293	-0.169	-0.001	0.036	-0.245	0.029
670	0.764	-0.025	0.52	0.271	-0.045	-0.205	-0.498	-0.175	-0.206	-0.248	-0.355	-0.063
Wavelength / nm	X4 / %				X5 / %				X6 / %			
	0°	45°	90°	135°	0°	45°	90°	135°	0°	45°	90°	135°
412	-1.466	-2.24	-0.872	-1.173	0.107	-0.584	-0.257	0.033	1.28	—	—	—
443	-1.533	-2.31	-1.062	-1.48	0.156	-0.226	-0.199	0.973	0.76	—	—	—
490	-1.266	-1.953	-1.12	-1.358	0.147	-0.121	-0.225	1.231	0.795	1.058	1.729	3.057
510	-0.709	-1.358	-0.623	-0.875	0.172	-0.172	-0.456	0.989	0.61	0.455	1.258	2.238
531	-0.424	-1.081	-0.355	-0.646	-0.117	-0.322	-0.658	0.7	0.455	0.455	0.796	1.751
555	-0.435	-1.15	-0.57	-0.616	-0.033	-0.39	-1.167	0.375	0.234	0.592	0.61	1.239
670	-0.218	-0.808	-0.508	-0.566	-0.091	0.188	-1.259	0.083	0.202	0.14	0.225	0.157
Average	0.889%											

3.2.2 光源偏振对颗粒物吸收系数测量的影响

图 6 为 6 个采样站点在未放置线偏振片及不同线偏振角度下 (30°、60°、120°) 颗粒物吸收系数的测量结果, 其中 X3、X6 站点设置平行样, 站点 4 样品

损坏数据缺失。总体上, 颗粒物吸收系数在不同线偏振角度下的测量结果 ( $a_{p-TSM}$ ) 与未加偏振片时测量结果 ( $a_{np-TSM}$ ) 没有明显的变化。图 7 为典型波长 (412、443、490、510、531、555、670 nm) 不同线偏振

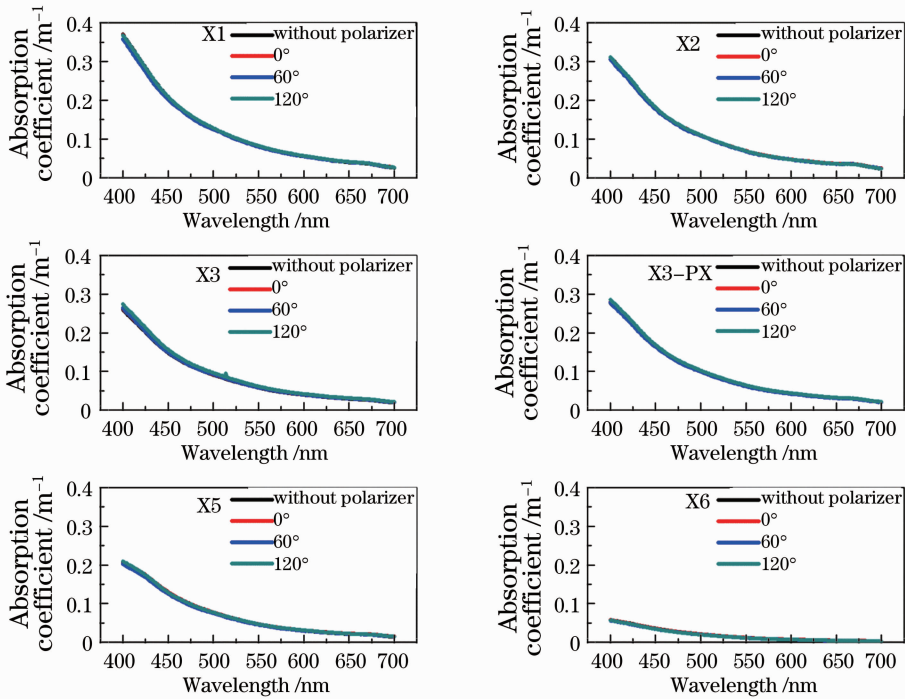


图 6 不同线偏振角度下颗粒物吸收系数测量结果与未加偏振片测量结果的比较

Fig. 6 Comparison of the TSM absorption coefficients measured at different polarizing angles and without polarizer

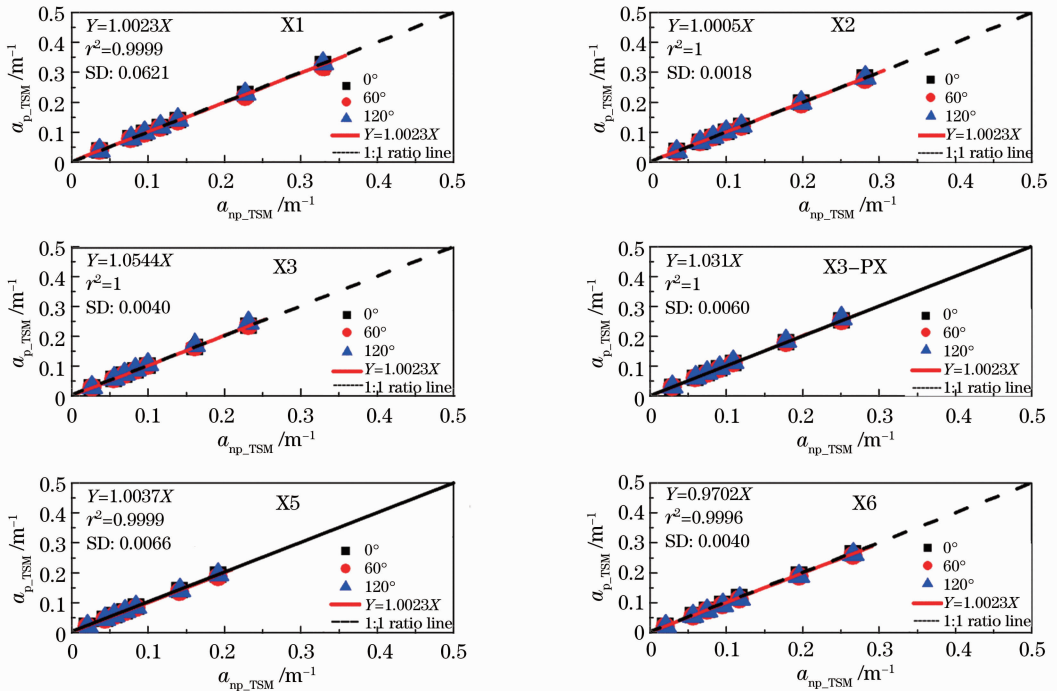


图 7 不同线偏振角度下颗粒物吸收系数测量结果与未加偏振片测量结果的散点比较

Fig. 7 Scatter plot comparison between the TSM absorption coefficients measured at different polarizing angles and without polarizer

角度下测量结果与未加偏振片时测量结果的散点比较。与黄色物质吸收系数结果类似,散点均分布在1:1对角线附近,线性相关系数 $r^2$ 达99%以上,说明分光光度计光源的偏振性对颗粒物吸收系数测量的影响也不显著。

同样,以X3、X6 站位平行样之间在未加偏振片时测量结果的差异来检验测量本身可能引起的误差。表3给出了7个不同特征波段处(412、443、490、510、531、555、670 nm)未加偏振片时平行样测量结果的相对偏差值( $\frac{a_{np-TSM} - a_{pr-TSM}}{a_{np-TSM}} \times 100\%$ ),可以看出,平行样之间测量结果相对偏差平均值为7.470%。另外如表4所示,不同站位在不同线偏振角度与未加偏振片时比较得到的相对偏差绝对值平均值为1.924%,对比分析可知紫外-可见光分光光

度计光源偏振性对水体颗粒物吸收系数的测量结果影响也较小。

表3 未加偏振片时颗粒物平行样间吸收系数相对偏差  
Table 3 Relative deviations of the TSM absorption coefficients between the parallel samples measured without polarizer

Wavelength /nm	Station	
	X3 /%	X6 /%
412	8.292	-5.653
443	10.57	-6.053
490	9.651	-6.447
510	8.908	-6.619
531	8.386	-6.717
555	7.416	-5.78
670	11.564	2.603
Average	7.470%	

表4 颗粒物样品不同偏振角度测量结果与未加偏振片测量结果的相对偏差值

Table 4 Relative deviations of the TSM absorption coefficients at different polarizing angles and without polarizer

Wavelength /nm	X1 /%			X2 /%			X3 /%		
	0°	60°	120°	0°	60°	120°	0°	60°	120°
412	-0.779	-3.538	-0.077	-0.208	-2.125	-0.206	1.250	1.520	5.310
443	-0.613	-3.952	-0.013	-0.077	-2.306	0.062	1.334	0.844	5.319
490	0.056	-2.514	0.935	0.487	-1.870	0.629	1.588	1.144	5.192
510	0.140	-1.157	0.943	0.392	-0.098	0.570	1.771	2.010	5.973
531	0.911	-1.087	1.802	0.744	-0.564	0.754	2.424	2.408	5.700
555	0.971	-1.084	0.981	0.942	-0.134	0.281	2.232	2.611	4.964
670	3.073	1.656	2.460	1.457	-1.609	-0.066	4.714	4.104	6.897
Wavelength /nm	X4 /%			X5 /%			X6 /%		
	0°	60°	120°	0°	60°	120°	0°	60°	120°
412	0.624	-0.299	3.179	0.083	-3.081	0.556	-0.595	-3.413	-1.900
443	0.813	-0.330	3.005	0.199	-3.746	-0.477	-0.892	-4.353	-3.659
490	0.967	0.114	3.252	1.445	-2.650	0.500	-0.187	-5.559	-4.728
510	0.896	-0.496	2.824	1.152	-2.183	0.642	-0.378	-4.499	-4.942
531	1.343	-0.932	3.029	2.202	-1.679	1.725	0.394	-3.149	-4.036
555	1.658	-0.108	3.037	3.106	0.158	2.033	1.395	-3.353	-3.833
670	1.093	-1.854	1.567	4.982	-1.283	1.486	4.626	-4.257	-1.840
Average				1.924%					

### 3.3 讨论

紫外-可见光分光光度计是根据朗伯-比耳定律原理来测定样品的吸收系数<sup>[11-13]</sup>。朗伯-比尔定律的表达式为

$$V_{OD} = -\lg \frac{I}{I_0} = -\lg T = a \times L \times c, \quad (6)$$

式中 $V_{OD}$ 为吸光度, $I_0$ 为入射的光源辐射强度, $I$ 为透过样品后的透射辐射强度, $T$ 为样品的透射比, $a$ 为样品的吸收系数, $L$ 为比色皿长度, $c$ 为样品的浓度。

以黄色物质吸收系数测量为例,由(1)式和(6)式可得到扣除纯水后的CDOM吸光度:

$$V_{OD} = V_{OD-CDOM}(\lambda) - V_{OD-Milli-Q}(\lambda) = [-\lg(I_1/I'_0) + \lg(I_{Milli-Q}/I'_0)] = \lg(I_{Milli-Q}/I_1), \quad (7)$$

式中 $I'_0$ 代表入射到比色皿样品的辐射强度,如加偏振片则为经过偏振片后的辐射强度; $I_1$ 为透射

CDOM样品后探测器接收到的辐射强度; $I_{Milli-Q}$ 为透射纯水(作为参比)后探测器接收的辐射强度。实验

说明分光光度计的光源具有显著的偏振性,也就是说光源的电矢量振动具有方向性,经过不同旋转角度的线偏振片(LPVI50-A)后,可获得不同振动

方向的线偏振光源。这些不同方向的辐射强度存在显著差异(见图2),导致经过比色皿CDOM样品后的辐射强度在不同方向也存在差异。同样地,经过

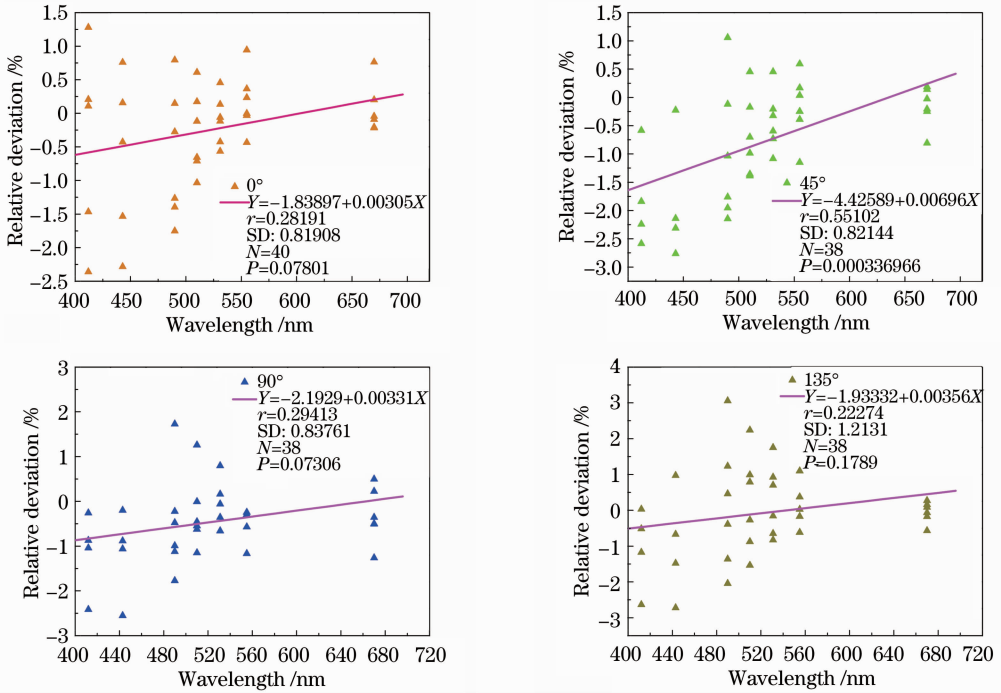


图 8 不同线偏振角度下黄色物质吸收系数相对偏差与波长的相关性

Fig. 8 Correlation between the relative deviation of CDOM absorption coefficients and the wavelength under different polarization angles

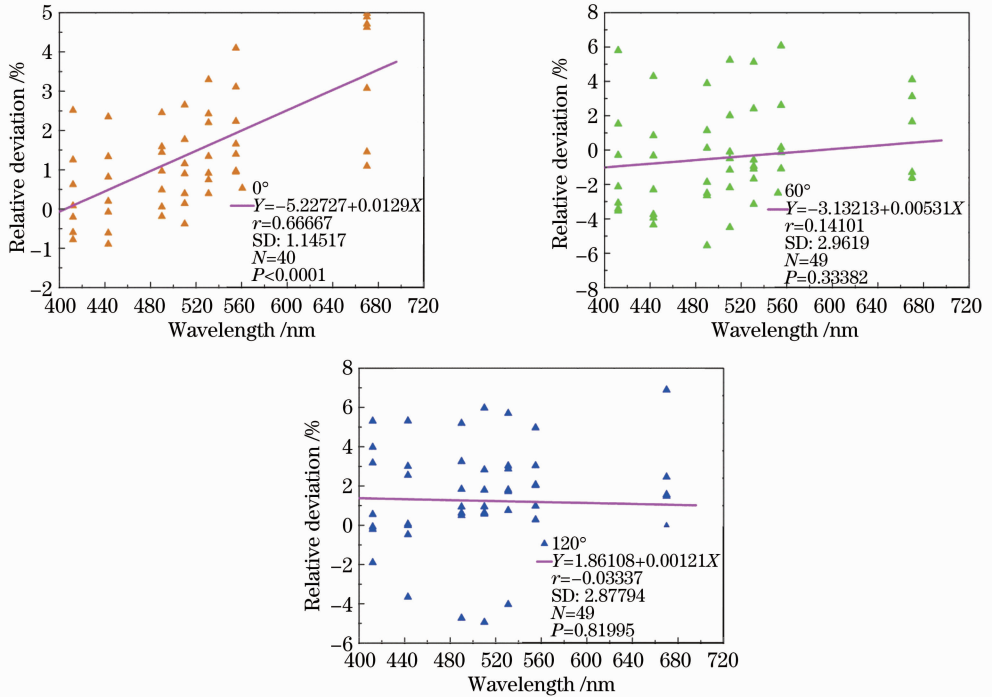


图 9 不同线偏振角度下颗粒物吸收系数相对偏差与波长的相关性

Fig. 9 Correlation between the relative deviation of TSM absorption coefficients and wavelength under different polarization angles



纯水样品后的辐射强度也在不同方向存在差异。但由(7)式可知,光源偏振对 CDOM 样品测量的影响通过纯水校正后将被消除,导致不同线偏振角度下分光光度计偏振光源对水体黄色物质和颗粒物吸收系数的测量影响不显著。

水体组分中黄色物质光学特性主要表现为吸收特性,而非色素颗粒物则主要表现为散射特性,Chami 等<sup>[28]</sup>研究结果表明,离水辐射偏振特性的改变主要是由于海水粒子的散射特性,这同样验证了分光光度计测量黄色物质吸收系数结果一致性要好于颗粒物的测量结果的原因。

图 8 和图 9 分别为黄色物质和颗粒物在不同线偏振角度下与未加偏振片时的吸收系数相对偏差与波长之间的相关性。结果表明,黄色物质在线偏振角度为  $45^\circ$  时相关系数  $r$  最高为 0.55,颗粒物在线偏振角度  $0^\circ$  时相关系数  $r$  最高为 0.67,在其他线偏振角度下并不存在显著的相关性。

## 4 结 论

紫外可见光分光光度计是测量水体组分光谱吸收系数的主要方法,利用地物波谱仪对紫外可见光分光光度计光源偏振特性进行了测量分析,并进一步研究了分光光度计光源偏振对水体黄色物质和颗粒物吸收系数测量结果的影响,得到的主要结论如下:

- 1) 紫外-可见光分光光度计光源具有偏振性;
- 2) 利用紫外-可见光分光光度计测量黄色物质吸收系数,通过纯水校正可以消除光源偏振对水体黄色物质光谱吸收系数测量的影响;
- 3) 利用紫外可见光分光光度计光源偏振测量水体颗粒物光谱吸收系数,通过参比膜校正可以消除光源偏振对颗粒物吸收系数的测量影响。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Lin, Zhao Dongzhi, Yang Jianhong, *et al.*. Comparison of two methods for absorption coefficients measurement in water body [J]. *Ocean Technology*, 2012, 31(3): 53-55.  
王 林, 赵冬至, 杨建洪, 等. 两种水体吸收系数测量方法的比较研究[J]. *海洋技术*, 2012, 31(3): 53-55.
- 2 Wang Xin, Zhang Yunlin, Zhao Qiaohua. On spectral absorption coefficients measurement methods of pure water, CDOM, total particulates, phytoplankton and nonalgal particulates [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(4): 97-102.  
王 鑫, 张运林, 赵巧华. 水体各组分吸收系数的测量方法研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(4): 97-102.
- 3 Dai Yongning, Li Sujun, Wang Xuejun. Measurement and analysis on the apparent optical properties of water in Chaohu Lake [J].

- Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5): 173-177.  
戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 173-177.
- 4 Zhu Jianhua. The key technique for measuring spectral absorption coefficient of case II water with spectrophotometer [J]. *Ocean Technology*, 2003, 22(1): 34-39.  
朱建华. 分光光度计测量 2 类水体光谱吸收系数的关键技术[J]. *海洋技术*, 2003, 22(1): 34-39.
- 5 Zhao Dongzhi, Luo Hu, Fu Yunna, *et al.*. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for ocean discrete water samples [J]. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(3): 81-86.  
赵冬至, 罗 虎, 傅云娜, 等. 海洋水色组分吸收系数的测定方法研究[J]. *海洋通报*, 2004, 23(3): 81-86.
- 6 Zhang Hong, Huang Jiazhu, Li Yunmei, *et al.*. Spectral absorption coefficients of optically active substances in lake Dianchi [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 452-463.  
张 红, 黄家柱, 李云梅, 等. 滇池水体光学物质的吸收特性研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(2): 452-463.
- 7 Zhang Tinglu, Xu Qingna, Chen Shuguo, *et al.*. Comparison of absorption coefficients measured with the quantitative filtered technique and the field measurement method [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2011, 41(7-8): 164-169.  
张亭禄, 徐青娜, 陈树果, 等. 海水吸收光谱测量方法比较-定量滤膜技术和现场测量方法[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(7-8): 164-169.
- 8 Zhu Ying, He Huipeng, Wu Xiaobo, *et al.*. UV-VIS spectrophotometer and its application [J]. *Chemical Intermediates*, 2012, (11): 34-37.  
朱 英, 和惠朋, 武晓博, 等. 紫外-可见分光光度计及其应用[J]. *化工中间体*, 2012, (11): 34-37.
- 9 Wang Haijun, Ning Xinxia. Recent progress of application of UV-VIS spectrophotometric technique [J]. *Physical and Chemical Inspection*, 2012, 48(6): 740-744.  
王海军, 宁新霞. 紫外-可见分光光度技术的应用进展[J]. *理化检验*, 2012, 48(6): 740-744.
- 10 Zhang Zhihong. Error analysis and adjustment of the spectrophotometer wavelength [J]. *Industrial Measurement*, 2003, 13(2): 39-40.  
张志红. 分光光度计波长误差分析及波长的调整[J]. *工业计量*, 2003, 13(2): 39-40.
- 11 Zhong Lixuan. Analysis of the reasons for the error caused by a spectrophotometer [J]. *Shanghai Construction Science & Technology*, 2005, (5): 41-42.  
钟乐旋. 引起分光光度计误差原因之分析[J]. *上海建设科技*, 2005, (5): 41-42.
- 12 S P Morgan, M P Khong, M G Somekh. Effects of polarization state and scatterer concentration on optical imaging through scattering media [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(7): 1560-1565.
- 13 D A Zimnyakov, Y P Sinichkin. A study of polarization decay as applied to improved imaging in scattering media [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2000, 2(3): 200.
- 14 D A Zimnyakov, Y P Sinichkin, I V Kiseleva, *et al.*. Effect of absorption of multiply scattering media on the degree of residual polarization of backscattered light [J]. *Optics and Spectroscopy*, 2002, 92(5): 765-771.
- 15 Gong Jieqiong, Zhan Haigang, Liu Dazhao. A review on polarization information in the remote sensing detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088-1095.  
弓洁琼, 詹海刚, 刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4): 1088-1095.
- 16 S Tassan, G M Ferrari. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(8): 1358-1368.
- 17 S Tassan, G M Ferrari. Proposal for the measurement of

- backward and total scattering by mineral particles suspended in water [J]. *Appl Opt*, 1995, 34(36): 8345–8353.
- 18 Zhu Jin, Wang Xianhua, Pan Banglong. Study on polarization spectral feature of suspended sediment in the water body [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1913–1917.  
朱 进, 王先华, 潘邦龙. 水体悬浮泥沙的偏振光谱特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1913–1917.
- 19 Zhu Jin, Wang Xianhua, Pan Banglong, *et al.*. Polarization spectral feature of Chlorophyll in the water body [J]. *Journal of Wuhan University*, 2013, 38(5): 538–542.  
朱 进, 王先华, 潘邦龙, 等. 水体叶绿素的偏振光谱特性 [J]. *武汉大学学报*, 2013, 38(5): 538–542.
- 20 Ding Chizhu, Yang Kecheng, Li Wei, *et al.*. Intensity distribution of polarized light scattering for a nucleated cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1129001.  
丁驰竹, 杨克成, 李 微, 等. 有核细胞对偏振光的散射强度分布 [J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1129001.
- 21 Zhao Yunsheng, Sun Zhongqiu, Li Shaoping, *et al.*. Review and outlook of polarized remote sensing [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 190–197.  
赵云升, 孙仲秋, 李少平, 等. 偏振遥感的回顾与展望 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 190–197.
- 22 Wang Zhengping, Yu Long. Expressions of totally polarized light employing circular and elliptical basic vectors and methods of locus plotting of optical vectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0526001.  
王政平, 余 龙. 完全偏振光在圆/椭圆基矢下的表征及其光矢轨迹做图法 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0526001.
- 23 Li Chao, Zhao Lei, Huang Zihua, *et al.*. Simulation study on amplitude stability in nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0202007.  
李 超, 赵 磊, 黄志华, 等. 非线性偏振旋转锁模光纤激光器幅值稳定性模拟研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0202007.
- 24 Wang Zhengping, Yu Long. Expressions of totally polarized light employing circular and elliptical basic vectors and methods of locus plotting of optical vectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0526001.  
王政平, 余 龙. 完全偏振光在圆/椭圆基矢下的表征及其光矢轨迹做图法 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0526001.
- 25 Wen Donghai, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo, *et al.*. Speckle characteristics of laser radar polarization imaging and despeckling algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311003.  
闻东海, 江月松, 张绪国, 等. 激光偏振成像散斑统计特性和抑制方法研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0311003.
- 26 Chen Jun. *Optics Electromagnetic Theory* [M]. Beijing: Science Press, 2005. 57.  
陈 军. *光学电磁理论* [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 57.
- 27 Liao Yanbiao. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 21.  
廖延彪. *偏振光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 21.
- 28 Malik Chami, David McKee. Determination of biogeochemical properties of marine particles using above water measurements of the degree of polarization at the Brewster angle [J]. *Opt Express*, 2007, 15(15): 9494–9509.

栏目编辑: 王晓琰