

## 水体颗粒广角度偏振体散射测量研究

潘耀瑞<sup>1</sup>, 陶邦一<sup>2\*</sup>, 吴超钺<sup>1</sup>, 毛志华<sup>1,2</sup>, 黄海清<sup>2</sup><sup>1</sup>浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021;<sup>2</sup>自然资源部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** 针对国内尚没有大角度范围的水体颗粒偏振体散射函数测量仪的问题, 基于潜望镜式光路结构与旋转偏振探测器的探测方式, 建立了水体颗粒偏振体散射特性测量系统, 验证了采用半衰片胶合方式的出射棱镜对大角度偏振体散射特性测量的适用性, 实现了  $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$  范围内  $3\times 3$  水体颗粒散射穆勒矩阵的测量。对系统开展了角度、幅值及偏振标定, 根据系统结构和水下传输原理进行了散射光程归一化和水下衰减矫正。实验结果表明,  $3\ \mu\text{m}$  直径聚苯乙烯标准颗粒测量结果与理论计算值吻合良好, 证明了该套系统的可靠性。同时在千岛湖自然水体对该套系统进行了测试验证, 获得的水体颗粒物  $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$  范围内  $3\times 3$  水体颗粒散射穆勒矩阵测量结果表明偏振体散射特性能够提供更丰富的颗粒特性信息。

**关键词** 水体颗粒; 偏振; 穆勒矩阵; 体散射函数

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221869

## 1 引言

水体颗粒散射是海洋光学遥感的基础, 颗粒散射的异向性和不同类型颗粒的异质性又是遥感定量化过程复杂和反演问题困难的主要原因。随着海洋光学遥感的发展, 无论是被动的水色遥感还是主动光学传感与激光遥感, 都从传统的基于辐射强度的标量探测技术向基于辐射偏振特性的矢量探测技术发展。水体颗粒的 Mueller 矩阵是其散射特性最基础、最完整的描述参数<sup>[1-2]</sup>, 体现了水体中分子和大颗粒物的种类、粒径谱、形状、折射率等, 因此研究水体颗粒的 Mueller 矩阵具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。水体颗粒偏振体散射函数成为海洋主被动光学遥感研究中最关键的固有光学参量<sup>[5]</sup>, 但同时也是测量难度最大的固有参量。

目前传统基于标量体散射函数的测量仪器与方法在国内外都取得了大量进展。1972 年 Petzold 研制了  $0.1^{\circ}\sim 10^{\circ}$  前向小角度体散射函数测量仪样机和基于旋转探测器原理的  $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$  范围的广角体散射函数测量仪样机, 利用两种测量方式将测量角度扩大, 其体散射函数 (VSF) 测量结果一直作为经典的海洋光学基本数据。2003 年 Lee 等<sup>[6]</sup> 基于旋转探测器研制了多光谱体散射函数测量仪 (MVSM), 通过旋转棱镜的方式, 将测量角度范围提高至  $0.6^{\circ}\sim 177^{\circ}$ , 分辨率为  $0.3^{\circ}$ , 并实现了水下原位测量。国内方面, 2005 年中国科学院

南海海洋研究所李彩团队<sup>[7]</sup> 建立了一套具有 8 个固定角度的水下体散射函数测量仪, 角度测量范围为  $20^{\circ}\sim 160^{\circ}$ 。2018 年华中科技大学杨克诚和夏珉团队<sup>[8]</sup> 通过搭建一种基于空间映射成像技术的 VSF 测量装置, 对三维空间的散射光进行了成像, 实现了对粒径小于  $1\ \mu\text{m}$  的微小悬浮颗粒的 VSF 快速测量, 测量的散射角范围为  $18^{\circ}\sim 160^{\circ}$ , 分辨率为  $1^{\circ}$ 。2020 年自然资源部第二海洋研究所的郭乙陆等<sup>[9]</sup> 研制了一套 VSF 实验室测量样机 (VSFlab), 该样机基于旋转探测器与潜望镜式的测量原理, 实现了  $2^{\circ}\sim 178^{\circ}$  范围内的 VSF 测量。

而偏振体散射函数研究相对较晚, 1984 年美国 Voss 等<sup>[10]</sup> 利用自己研发的仪器进行水体 Mueller 矩阵参数测量, 该组 Mueller 矩阵参数一直沿用至今。美国 Sequoia 公司研制了一款商业化偏振体散射函数测量仪 (LISST-VSF), 其在  $15^{\circ}\sim 150^{\circ}$  范围内具有有限的对 Mueller 矩阵元素  $M_{11}$ 、 $M_{12}$  和  $M_{22}$  的测量能力, 同时也可以实现  $0.1^{\circ}\sim 150^{\circ}$  VSF 测量。Chami 等<sup>[11]</sup> 于 2014 年构建了一套新颖的偏振体散射测量仪 (POLVSM), 该测量仪依赖双潜望镜光学系统, 作用是将包含光源的平面与包含样品和接收器的散射平面分开, 此设计可以有效避免遮挡效应, 将测量角度范围扩大到  $1^{\circ}\sim 179^{\circ}$ 。而国内, 清华大学马辉和廖然团队利用成像方式开展了颗粒的二维体散射高效测量, 实现了部分角度范围 ( $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ) 的偏振体散射测量。但是, 我国海

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2022-12-15; 录用日期: 2023-01-03; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41876033)、国家重点研发计划项目 (2022YFB3901704)

通信作者: \*taobangyi@sio.org.cn

洋光学领域仍然缺乏实测偏振体散射函数数据,需要建立能够覆盖大角度范围的水体偏振体散射函数的观测手段。

针对国内尚没有大角度范围的水体颗粒 Mueller 矩阵参数测量仪,缺乏对水体颗粒偏振信息探测能力的问题,本文设计了一台水体颗粒偏振体散射测量仪,实现了  $10^\circ \sim 170^\circ$  范围内  $3 \times 3$  的 Mueller 矩阵参数测量;选取了直径不同的聚苯乙烯标准粒子分别进行角度和幅值标定及验证,测量结果与理论值吻合良好;并且在千岛湖进行海试,获得了千岛湖自然水体颗粒大角度范围的偏振体散射特性数据。

## 2 实验系统

### 2.1 偏振体散射测量仪

水体中光辐射偏振特性一般由 Stokes 矢量表示,偏振特性的改变主要由水体颗粒偏振散射引起,最简单的形式可以表示为

$$I_{\text{scat}} = L(\pi - \alpha_2) \times M \times L(\alpha_1) \times I_{\text{inc}}, \quad (1)$$

式中:  $L(\alpha)$  为子午面下的旋转矩阵。最为核心的就是水体颗粒偏振体散射函数,即  $4 \times 4$  的散射 Mueller 矩阵  $M^{[12]}$ , 其中  $M_{11}$  项就是传统意义上的体散射函数。 $M$  的表达式为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \circ \quad (2)$$

$I_{\text{scat}}$  和  $I_{\text{inc}}$  分别表示散射光与入射光的斯托克斯向量,表示为

$$\begin{cases} I_{\text{scat}} = [I' Q' U' V']^T \\ I_{\text{inc}} = [I Q U V]^T \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $[I Q U V]$  依次为光强量、水平/垂直方向线偏量、 $45^\circ/135^\circ$  方向线偏量和圆偏量。对于大多数水体光学应用如海洋光学遥感而言,假设水体颗粒为随机朝向,在统计上及模型中都近似为各向均匀散射媒质,加之自然界中 Stokes 矢量的  $V$  分量极小<sup>[13]</sup>, 因此通常只需对偏振体散射函数简化后的  $3 \times 3$  Muller 矩阵进行测量。简化后的 Muller 矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \circ \quad (4)$$

在实验室已有标量体散射函数实验室测量样机 (VSFlab)<sup>[9]</sup> 的研制基础上,通过增加起偏模块和检偏模块,增加仪器偏振测量能力,设计了一款偏振体散射测量仪 (PVSFlab), 仪器光路如图 1(a) 所示。

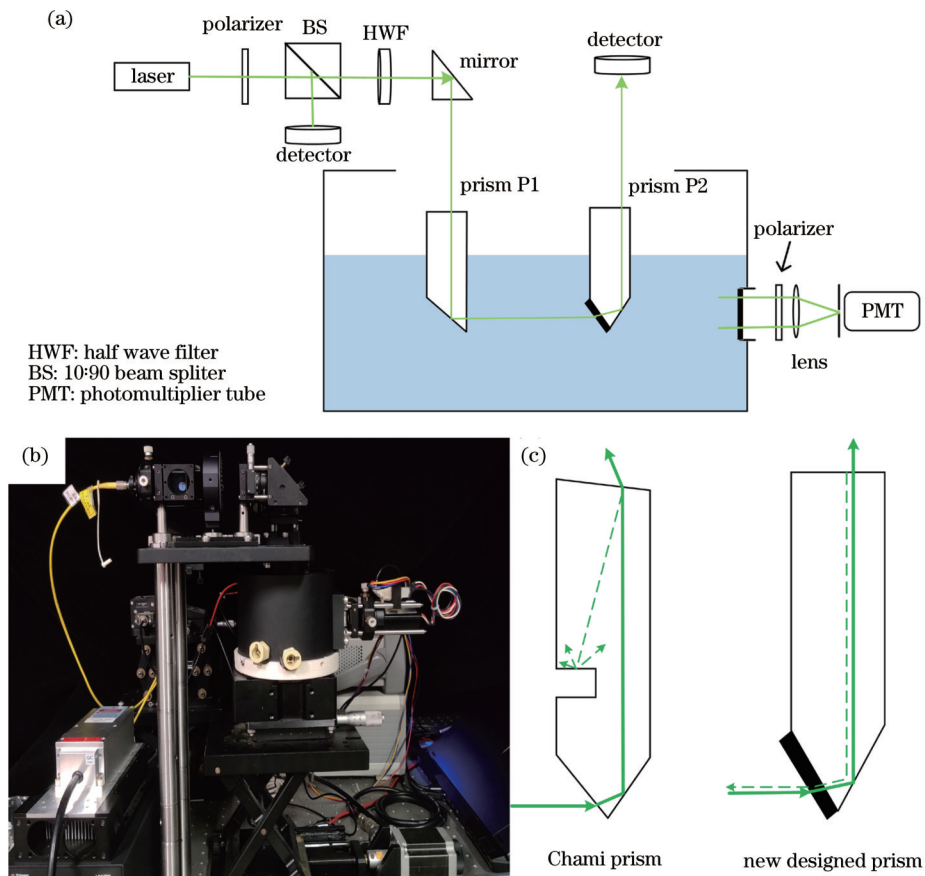


图 1 PVSFlab 示意图。(a)光路示意图;(b)实物图;(c)新旧出射棱镜对比

Fig. 1 Schematic of PVSFlab. (a) Schematic of the optical path; (b) physical map; (c) comparison of old and new prisms

该仪器主要由光源起偏系统、潜望镜棱镜组、旋转检偏探测系统等模块组成。其中光源系统采用 Integrated Optics 公司的 MatchBox 系列空间光激光器,具体型号为 0532L-11B,可产生功率为 60 mW、波长为 532 nm 的准直线偏光束,激光光束半发散角为 0.06°。激光器发出的准直光束经过准直后进入分束镜,由参考光硅探测器接收,用以计算颗粒的衰减系数  $c$ ,剩余光经起偏模块产生测量所需的不同起偏。起偏模块由线偏振片和半波片组成,通过步进电机控制旋转半波片可以获得 0°、45°或 90°三个不同偏振方向的线偏振光。线偏振片使用的是 Thorlabs 公司的型号为 LPVISA100-MP2 的线偏振片,在 400~700 nm 波段上的消光比达 10000:1。延迟器同样使用该公司型号为 WPH10M-532 的零级半波片,零级波片相较于多级波片更不易受到温度和波长的影响。

潜望镜光学系统包括一个反射镜、入射棱镜(P1)和出射棱镜(P2),它可以将散射平面和入射平面分开,确保光源不会在接近后向大角度时被检偏探测器遮挡。因此起偏光束需经过反射镜和入射棱镜 P1 进入样品池。所使用的反射镜是 Thorlabs 公司型号为 BBE1-E02 的反射镜,它的表层镀有介质膜,在 400~700 nm 波段具有保偏效果。光束穿过水池中的样品,一些以不同的角度散射,一些被水吸收,一些经出射棱镜的玻璃表面出射到水池底部被吸收。水池表面经过氧化处理后吸收率达 99.99%,剩余透射光束经过出射棱镜 P2 离开样品池,被衰减光硅探测器接收,用于计算样品的衰减系数  $c$ 。其中出射棱镜主要起到消除前向直射光反射产生的杂散光对后向散射测量的影响的作用,需要将杂散光能量降低为前向光能量的  $10^{-6}$  量级左右才能保证后向散射测量结果,因此该棱镜的设计最为关键。如图 1(c)所示,Chami 公司的 P2 出射棱镜以空气间隙作为光陷阱,但是棱镜加工难度高,空气间隙表面平整处理困难,容易产生杂散光,因此本文设计了一种新的加工更为简单的出射棱镜。该棱镜是由 1 块被切割成特定形状的棱镜和 1 片中性密度滤光片粘合组成的。直射光和反射光先后经过中性密度滤光片,经历 2 次光衰减,反射光强度降低到约为直射光强度的  $10^{-6}$ ,对 180°附近的后向散射光探测影响可以忽略不计。这种新型棱镜能够有效减少杂散光对大角度后向散射和小角度前向散射测量造成的影响。

最后各方向上的散射光穿过水池上的窗口被检偏模块接收。检偏模块由线偏振片、透镜、针孔和光电倍增管(PMT)组成。透镜焦距为 27 mm;针孔孔径为 1 mm;采用的 PMT 是一种高性能光电倍增管,最小探测功率为  $1.25 \times 10^{-9}$  mW,可满足近 5 个动态范围测量的要求,通过旋转线偏振片可以对 0°、45°和 90°三个不同偏振方向的散射光检偏。水池与旋转电机连接,由旋转电机带动在水平方向旋转 180°,由此可以探测各个角度的散射光。实验过程中,通过设计 0°、45°和

90°这三种不同的起偏和检偏角度,获得 9 组散射光组合,联立求解获得偏振体散射函数。

## 2.2 数据标定与处理

偏振体散射测量仪的标定是实验的重要组成部分,通常需要借用超纯水、标准悬浮颗粒和 Mie 散射理论计算模型进行综合标定。标定过程大致分为纯水基线测量、角度与幅值标定及偏振标定等。

### 1) 纯水基线测量

对只含有纯水的样品进行测量(以下称为基线测量)具有十分重要的意义。通过去除纯水信号对总信号的贡献,颗粒的散射特性才能被确定。实验使用的纯水由 Millipore 公司的 MilliQ advantage A10 纯水仪制备,并且通过一个孔径为 0.2  $\mu\text{m}$  的聚碳酸酯筒式过滤器进行过滤,进一步去除残余颗粒污染物。此外使用 Liqui-Cel 脱气膜去除纯水中的气泡,以获得准确的基线测量值。最后,用颗粒悬浮液信号减去基线信号获得颗粒的散射信号。由于最终需要获得 9 组散射信号光,所以基线信号同样需要测量 9 组。

### 2) 角度与辐射标定

聚苯乙烯标准颗粒(Duke STANDARDSTM, Thermo Fisher Scientific 公司)的中心粒径、粒径谱和复折射系数等信息是精确可知的,可以通过米散射理论计算获得其散射特性,进而可以通过标准颗粒散射特性确定得到的探测电信号与体散射函数之间的转换关系,所以常用标准颗粒进行体散射函数的角度和辐射标定。

米散射理论计算需要考虑:光的波长  $\lambda$ ;粒度(平均粒径和粒径分布),此处的粒径分布模式指的是高斯分布;标准颗粒(折射率为  $n_p = n_r + n_i$ ,其中  $n_r$  是  $n_p$  的实部, $n_i$  是  $n_p$  的虚部)相对周围介质(折射率为  $n_w$ )的复折射率  $n = n_p/n_w$ 。表 1 列出了实验使用的聚苯乙烯标准颗粒的详细参数,其中标称直径为  $\mu_{ND}$ ,标准颗粒粒径呈正态分布,平均直径为  $\mu_D$ ,粒径标准偏差为  $\sigma_D$ 。 $\delta_D$  代表在 95% 置信水平下确定的平均直径  $\mu_D$  的不确定度, $n_p$  代表标准颗粒在 532 nm 处的复折射率。

表 1 聚苯乙烯标准颗粒的详细参数

$\mu_{ND} / \mu\text{m}$	$\mu_D / \mu\text{m}$	$\sigma_D / \mu\text{m}$	$\delta_D / \mu\text{m}$	$n_p = n_r + n_i$
3	2.994	0.029	0.03	
2	2.02	0.015	0.02	$1.5982 + (0.00035 \pm 0.00015)i$
0.2	0.203	0.004	0.0059	

根据 Mie 散射理论中标准颗粒的特性,一般选用具有较为平缓的 Mie 散射结果的标准颗粒(如直径为 0.2  $\mu\text{m}$  的颗粒)来进行幅值标定及标定系数确定,利用角度特征明显的标准颗粒(如直径为 2  $\mu\text{m}$  的颗粒)进行角度标定。最后再利用其他粒径的标准颗粒来进行验证。根据探测器接收的散射光,在各个角度探测

到的散射光程并不相同,且在水中的衰减传输距离也各不相同,因此要进行散射光程归一化和衰减光程校正处理,详细校正过程见参考文献[14]。

使用直径为 2 μm 的聚苯乙烯标准颗粒进行角度标定,由于 PVSFlab 仪器在测量时无法将散射角度与散射信号采样点一一对应,也无法确定 10°~170° 范围内第一个采样点和最后一个采样点,因此需要进行角度标定去找出 10° 和 170° 所对应的散射信号。由于 2 μm 标准颗粒粒径尺寸远大于所使用的激光波长, Mie 散射理论曲线出现多处极小值与极大值,呈现涟漪状。这种明显的角度分布特征十分适用于角度标定。

使用直径为 0.2 μm 的聚苯乙烯标准颗粒进行幅值标定,目的是将仪器所探测的原始光电信号(单位为 V)转换为目标物理量体散射函数(单位为 sr<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>)。0.2 μm 直径标准颗粒的理论体散射函数为

$$\beta_{\text{Mie}}(\theta) = \bar{\beta}_{\text{Mie}}(\theta) \times c_{\text{PVSFlab}}, \quad (5)$$

式中:  $\bar{\beta}_{\text{Mie}}(\theta)$  表示从 Mie 散射理论中计算得到的理论相函数;  $c_{\text{PVSFlab}}$  表示 PVSFlab 仪器测得的样品衰减系数。应用线性回归模型,计算幅值标定系数  $k(\theta)$ ,

$$k(\theta) = \beta_{\text{Mie}}(\theta) / V(\theta), \quad (6)$$

即标定系数  $k(\theta)$  为  $\beta_{\text{Mie}}(\theta)$  与校正后的原始光电信号  $V(\theta)$  之间的斜率。

### 3) 偏振标定

偏振标定分为两部分,一是对起偏光的验证,二是在传输过程中对旋转矩阵的校准。对于第一部分,在实验前会使用 Thorlabs 公司的斯托克斯测量仪对起偏光的偏振方向进行验证,以确保获得所需偏振方向的线偏光。对于第二部分,理想情况下,本实验中入射光子午面与散射平面相互垂直,旋转矩阵为一个单位矩阵,但工程实际中,仪器的安装误差造成一定的角度偏差是无法避免的,这时候需要考虑旋转矩阵的标定。旋转矩阵标定的关键在于从入射棱镜出射的光可以正入射到检测窗口,安装过程中入射棱镜微小的左右偏移和俯仰均会对结果产生影响。直接进行入射棱镜的对齐校准较为困难,需要利用标准的圆形颗粒进行校准,对于标准的圆形颗粒,它们 Mueller 矩阵的  $M_{23}$  和  $M_{32}$  项均等于 0,  $M_{23}$  和  $M_{32}$  项的偏移可以显示出仪器明显的对准误差,因此可以通过判断  $M_{23}$  和  $M_{32}$  是否为 0 作为检验仪器光学对准与否的手段。通过反复测量标准颗粒,并不断微调入射棱镜的安装角度,对这些标准颗粒的测量矩阵与理论矩阵进行比较来对旋转矩阵进行标定。针对 Mueller 矩阵的偏振标定,通常在标定过程中会把 Mueller 矩阵的其他项(除了  $M_{11}$ )除以  $M_{11}$  进行归一化,用以解释其他项。

### 4) 数据处理

探测散射光的斯托克斯矢量为

$$I_{\text{scat}} = AMPI_{\text{inc}}, \quad (7)$$

式中:  $I_{\text{scat}}$  就是探测所得光强;  $A$  和  $P$  分别表示检偏器和起偏器的矩阵。分别设置 4 种不同起偏角度与检偏角度,使用  $\alpha_A$  和  $\alpha_P$  分别表示检偏器与起偏器的偏转角度,探得光强可表示为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} I'(\alpha_{A1}, \alpha_{P1}) & I'(\alpha_{A1}, \alpha_{P2}) & I'(\alpha_{A1}, \alpha_{P3}) & I'(\alpha_{A1}, \alpha_{P4}) \\ I'(\alpha_{A2}, \alpha_{P1}) & I'(\alpha_{A2}, \alpha_{P2}) & I'(\alpha_{A2}, \alpha_{P3}) & I'(\alpha_{A2}, \alpha_{P4}) \\ I'(\alpha_{A3}, \alpha_{P1}) & I'(\alpha_{A3}, \alpha_{P2}) & I'(\alpha_{A3}, \alpha_{P3}) & I'(\alpha_{A3}, \alpha_{P4}) \\ I'(\alpha_{A4}, \alpha_{P1}) & I'(\alpha_{A4}, \alpha_{P2}) & I'(\alpha_{A4}, \alpha_{P3}) & I'(\alpha_{A4}, \alpha_{P4}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\alpha_{A1}) \\ A(\alpha_{A2}) \\ A(\alpha_{A3}) \\ A(\alpha_{A4}) \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} P(\alpha_{P1}) \\ P(\alpha_{P2}) \\ P(\alpha_{P3}) \\ P(\alpha_{P4}) \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

由于忽略了斯托克斯矢量的  $V$  分量,且设置的起偏器和检偏器角度分别为 0°、45° 和 90°,那么式(8)可以简化为

$$\begin{bmatrix} I'(0^\circ, 0^\circ) & I'(0^\circ, 45^\circ) & I'(0^\circ, 90^\circ) \\ I'(45^\circ, 0^\circ) & I'(45^\circ, 45^\circ) & I'(45^\circ, 90^\circ) \\ I'(90^\circ, 0^\circ) & I'(90^\circ, 45^\circ) & I'(90^\circ, 90^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(0^\circ) \\ A(45^\circ) \\ A(90^\circ) \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} P(0^\circ) \\ P(45^\circ) \\ P(90^\circ) \end{bmatrix}^T. \quad (9)$$

根据式(9),可算出 Mueller 矩阵  $M$  的数值,即为所求颗粒偏振体散射函数。

## 2.3 研究区域

2022 年 5 月 14 日至 5 月 18 日期间在千岛湖利用不同水样对偏振体散射测量仪进行了测试,开展了 4 个站点(A1、B1、B2 和 B3)的测量,4 个站点的位置如图 2 所示。其中在 A1(29.58° E, 119.13° N) 站位采集了表层 0 m 和 15 m 水深处的水样,在 B1(29.58° E, 118.95° N)、B2(29.61° E, 118.99° N) 和 B3(29.57° E, 118.94° N) 只采集了表层水样。每天测量前对 PVSFlab 仪器进行角度和振幅标定,同时对每个样品进行测量时会使用过滤后的湖水进行基线测量。考虑到气泡对测量结果的影响<sup>[15]</sup>,在收水、转液、稀释过程

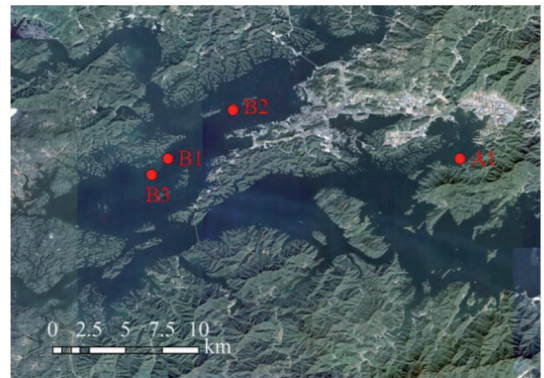


图 2 千岛湖 4 个采样点位置

Fig. 2 Locations of four sampling points in Qiandao Lake

中都特别注意,避免出现气泡。分别测量各个站点水样的 Mueller 矩阵参数,分析水体偏振特性,并且通过  $M_{11}$  项进行积分,计算后向散射系数<sup>[16]</sup>。采集水样的同时,利用 HOBI 公司的 HydroScat-6P(以下简称 HS6) 水体后向散射测量仪进行多波段(420~700 nm)后向散射系数剖面测量,用于与 PVSFlab 仪器测量结果进行比较。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 仪器测量标定结果

为了验证新型棱镜在偏振体散射特性测量中的适用性,开展了基线测量、角度和幅值标定验证对比。根据 POLVSM 公司的出射棱镜,仿造了一块出射棱镜 (Chami-like),并与新型棱镜在 532 nm 波段、3  $\mu\text{m}$  直径标准颗粒条件下的结果进行对比验证,结果如图 3 所示,其中  $b$  是散射系数。考虑到 Mueller 矩阵其余项都会归一化到  $M_{11}$  项用以解释,所以此处仅进行  $M_{11}$  项的验证对比。从图 3(a)和图 3(c)可以看出,新型棱镜可以和 Chami-like 棱镜一样在大角度范围内实现对偏振

体散射函数的精确测量,验证了新型棱镜在偏振体散射特性测量中的适用性。图 3(b)展示了角度标定前后的对比结果,可以看出在  $120^\circ\sim 170^\circ$  范围内  $M_{11}$  经过角度标定后更接近于理论值。

PVSFlab 仪器同时还具有测量样品衰减系数的功能,根据参考光硅探测器和衰减光硅探测器信号可以计算衰减系数  $c$ 。采用 Perkin-Elmer(PE) Lambda 35 分光光度计验证 PVSFlab 仪器所测的衰减系数。PE 公司的 Lambda 35 分光光度计测量衰减系数的能力是被业内所认可的<sup>[14]</sup>。使用 Lambda 35 分光光度计进行测量时,将一个盛满样品的比色皿放置在靠近光束输出窗口的位置,并在检测器前面放置一个孔径为 0.8 mm 的光孔,以将检测器的接收视场角减小。制备一组具有不同衰减系数( $c=0.13, 0.55, 0.79, 1.33 \text{ m}^{-1}$ )的悬浮 2  $\mu\text{m}$  直径标准颗粒样品,对每个样品进行多次测量,然后比较 PVSFlab 和 PE Lambda 35 的测量结果,如图 3(d)所示,相关系数  $R^2$  达 96.84%,验证 PVSFlab 仪器在衰减系数测量方面具有良好的精度。

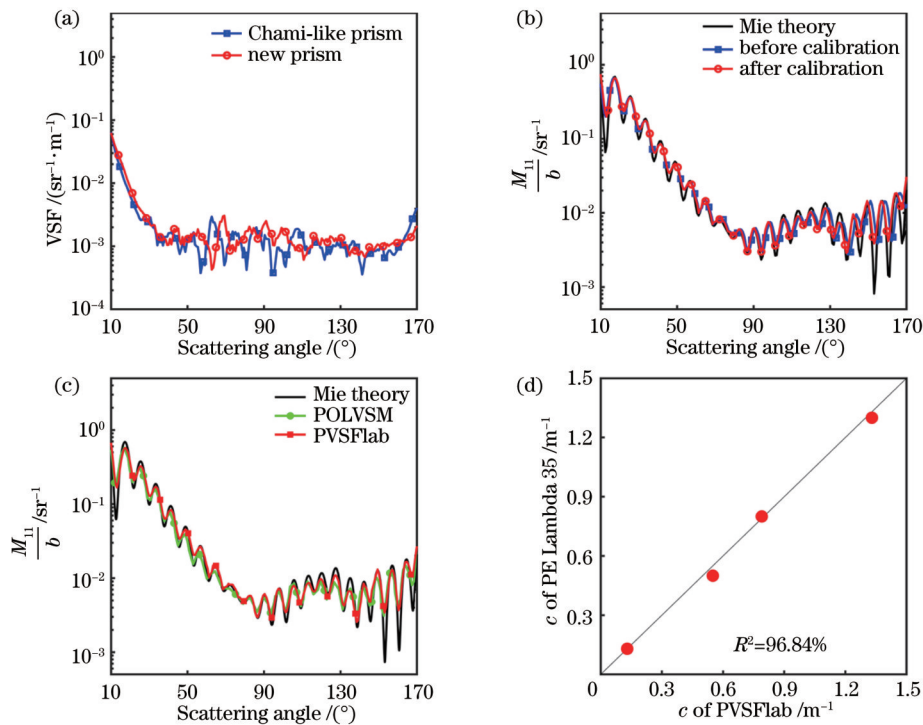


图 3 棱镜验证对比。(a)新型棱镜与 Chami-like 棱镜的基线测量结果对比;(b)新型棱镜角度标定前后的测量结果对比;(c)新型棱镜与 Chami-like 棱镜对 3  $\mu\text{m}$  标准颗粒测量结果的对比;(d) PVSFlab 与 PE Lambda 35 衰减系数对比

Fig. 3 Verification comparison of prisms. (a) Comparison of the baseline measurement results of the new prism and Chami-like prism; (b) comparison of measurement results of the new prism before and after the angle calibration; (c) comparison of the measurement results of the new prism and Chami-like prism for 3- $\mu\text{m}$  diameter standard particles; (d) comparison of attenuation coefficient between PVSFlab and PE Lambda 35

对 PVSFlab 仪器的纯水基线信号进行测量,纯水由净水系统制备,通过孔径为 0.2  $\mu\text{m}$  的过滤器过滤,以进一步去除残余颗粒杂质。分别测量  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  起偏以及  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  检偏组合的光强,获得 9 种组合

的基线信号,测量结果如图 4 所示。从图 4 可以发现: $30^\circ\sim 150^\circ$  范围的散射信号比较低,受探测器探测下限的制约,存在一定的噪声信号,不过这并不影响对颗粒散射光的探测,因为颗粒的散射信号要远远强于基线

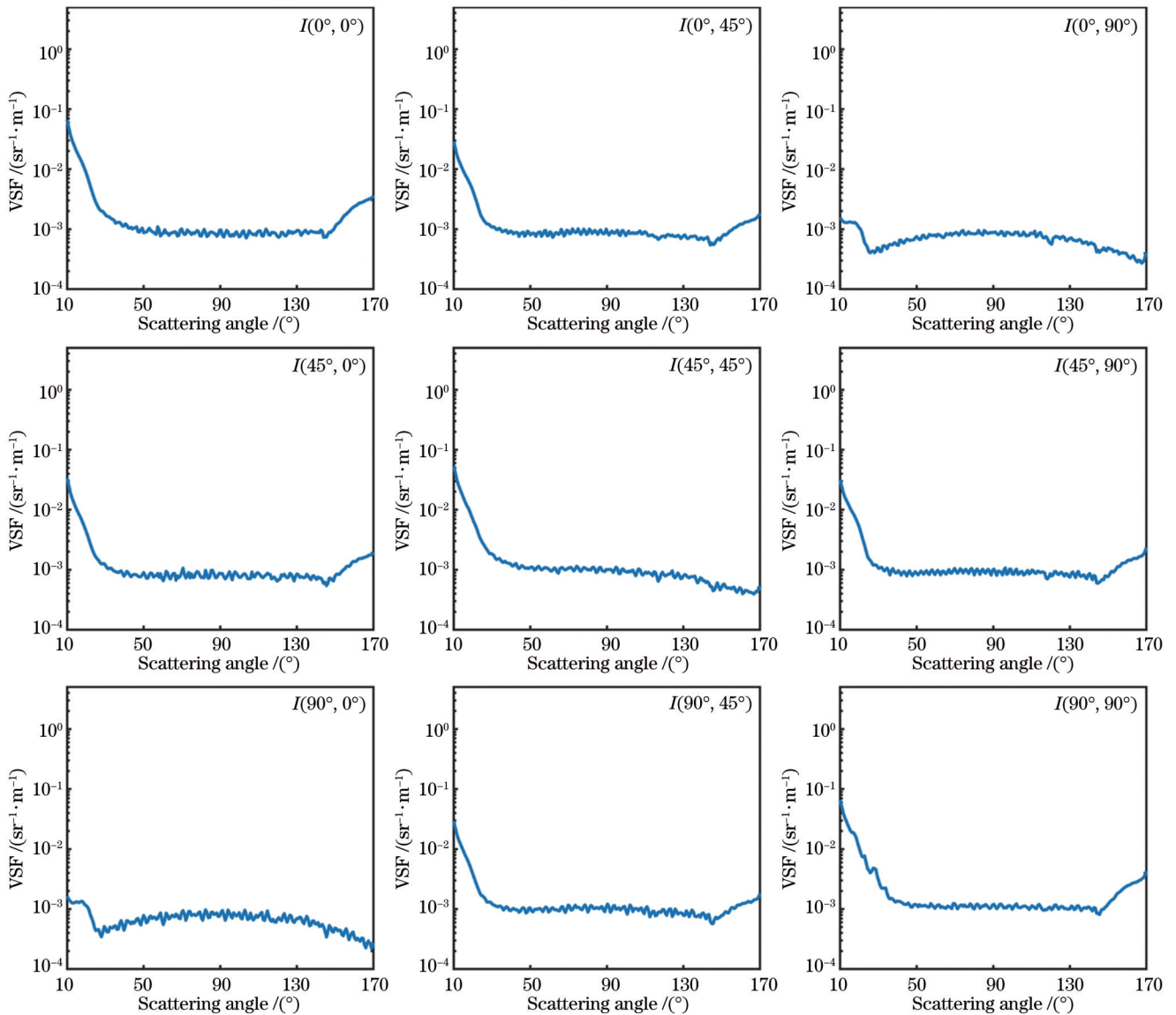


图 4 不同起偏和检偏角度组合的基线信号测量结果(以 532 nm 波段下测得的纯水散射信号为例)

Fig. 4 Baseline signal measurement results for different combinations of polarization and analysis angles (taking the pure water scattering signal measured at 532 nm as an example)

信号;不同偏振角度组合下颗粒散射信号能量在  $30^\circ \sim 150^\circ$  角度范围内几乎稳定在  $10^{-3}$  量级,两端的测量结果存在一定的差异,这表明制备的纯水质量满足实验需求,杂散光产生少。

使用  $2 \mu\text{m}$  和  $0.2 \mu\text{m}$  直径聚苯乙烯标准颗粒对 PVSFlab 仪器分别进行了角度、幅值和偏振标定。对  $3 \mu\text{m}$  直径标准颗粒测量结果与其理论计算值进行对比分析,结果如图 5 所示;对  $3 \mu\text{m}$  直径聚苯乙烯标准颗粒在 532 nm 波段下的偏振体散射测量仪测量结果与理论计算值进行对比。对  $M_{11}$  项通过散射系数进行归一化,得到散射相函数(即  $M_{11}/b$ ),Mueller 其他项通过除以  $M_{11}$  用以帮助解释。从图 5 可以看出:对于球形粒子,  $M_{13}$ 、 $M_{23}$ 、 $M_{31}$  和  $M_{32}$  都接近于 0,在  $10^\circ \sim 170^\circ$  散射角度范围内,  $M_{13}$ 、 $M_{23}$ 、 $M_{31}$  和  $M_{32}$  测量值与理论值之间的平均绝对误差分别为 8.2%、5.6%、6.6% 和 5.7%,

与理论计算结果吻合良好,其中  $M_{23}$  和  $M_{32}$  项接近于 0,表明入射棱镜的安装符合对准要求;  $M_{22}/M_{11}$  与粒子的圆形度相关,实测值均在 1 附近,  $M_{22}$  测量值与理论值之间的平均绝对误差为 7.5%;  $M_{12}/M_{11}$  反映粒子偏振程度,从图 5 可以看出角度与幅值均吻合良好,  $M_{11}$ 、 $M_{12}$  和  $M_{21}$  测量值与理论值之间的平均绝对误差分别为 23.8%、27.2% 和 26.8%。这三项测量值相较于前面结果有较大的误差,这与颗粒本身的特性和探测器视场角相关。 $3 \mu\text{m}$  直径标准颗粒的  $M_{11}$ 、 $M_{12}$  和  $M_{21}$  具有变化剧烈的理论曲线,所以在测量值角度与幅值整体吻合良好的前提下,仍然存在部分峰谷处幅值无法完全吻合的情况,若要改善这一情况,就需要更小的接收视场角。但实际上,PVSFlab 仪器的现有视场角(约  $5^\circ$ )已经满足了探测需求,此外自然样品的体散射函数曲线通常比较平缓,不需要更小的探测视场角,这在后

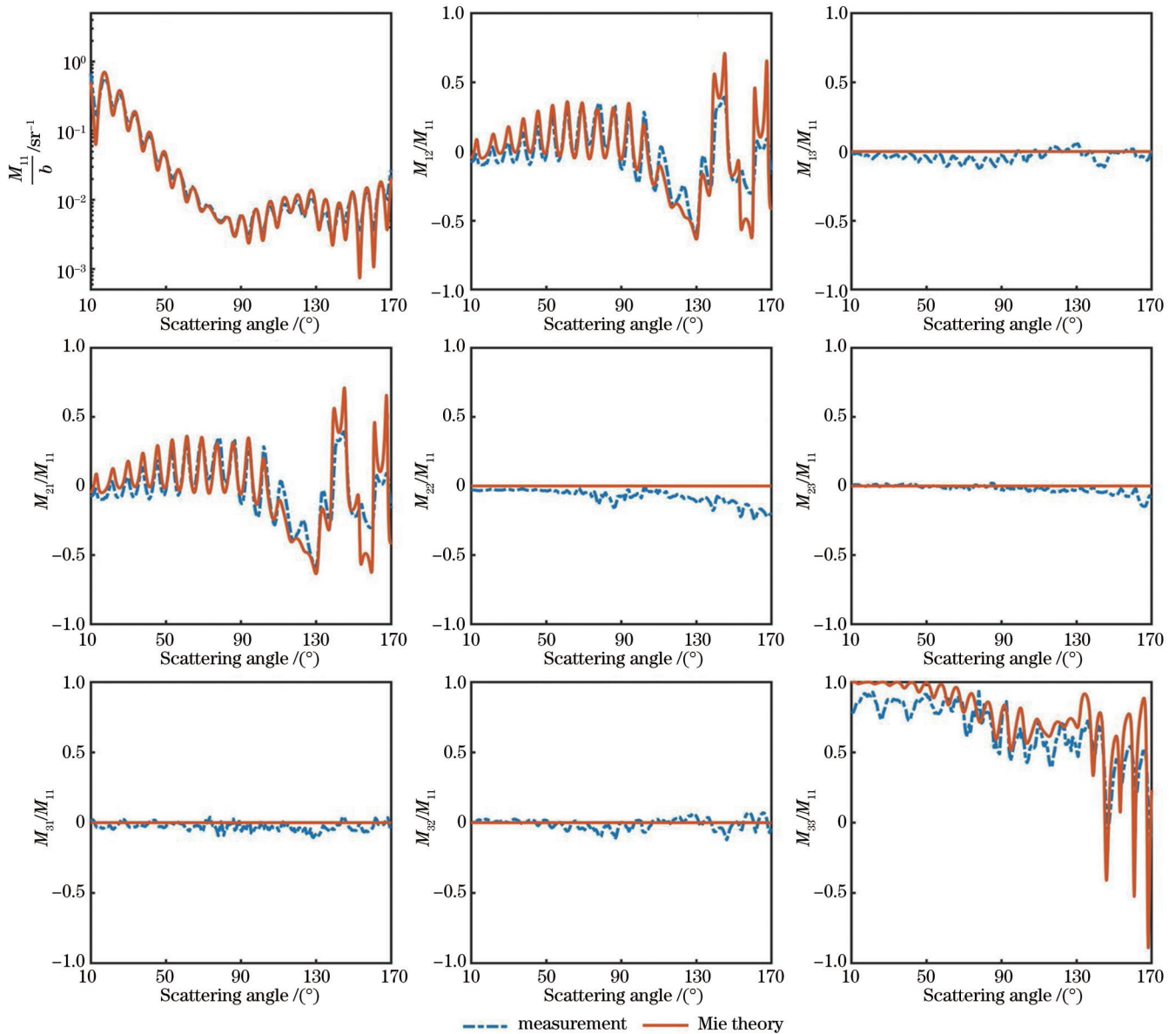


图 5 3 μm 直径聚苯乙烯标准颗粒在 532 nm 波段下的测量结果与理论计算值的对比

Fig. 5 Comparison of the measured results and theoretical calculated values of 3-μm diameter polystyrene standard particles in the 532 nm waveband

面的实验结果中可以得到证实。另一方面,更小的探测视场角反而降低了探测信号的信噪比,这对于测量精度是不利的,因此认为当前的 $M_{11}$ 、 $M_{12}$ 和 $M_{21}$ 测量结果仍然是精确的且可以接受。 $M_{33}$ 项目目前测量结果尚不理想, $M_{33}$ 测量值与理论值之间的平均绝对误差为 17.6%,这是今后需要改进的地方。从 3 μm 直径聚苯乙烯标准颗粒的验证结果来看,偏振体散射测量仪的测量结果与理论计算结果总体吻合一致,因此认为它在其他水体测量中也可以提供精确结果。

### 3.2 千岛湖水体实测验证结果

使用 PVSFlab 和 HS6 在千岛湖 A1、B1、B2 和 B3 区域进行测量。图 6(b)和图 6(c)展示了 HS6 获得的后向散射系数的归一化光谱分布,光谱形状的差异可以从侧面反映出不同站位及水层的颗粒类型组成有所

不同。结合图 6(a)的 510 nm 后向散射系数值可以发现,虽然 A1 站点的表层和 15 m 水深处的后向散射系数比较接近,但是两者光谱形状在 590~700 nm 存在较大差异,颗粒类型有所区别。而根据图 2 站位的分布可以发现 B1 和 B3 站点位置相近,B2 距离两者较远。B1 与 B3 站点的光谱形状差异较小,而 B2 与其他两个站点的光谱同样在 590~700 nm 存在明显变化。这充分说明了 3 个站点的颗粒类型区别。

对 PVSFlab 仪器  $M_{11}$  项在 140° 的测量结果与 HS6 仪器测量的 510 nm 波段  $\beta(140^\circ)$  进行对比,如图 6(a)所示,两者相关系数达 96.79%,可以看出 PVSFlab 仪器的测量精度是可靠的。PVSFlab 在 A1 站点的表层和 15 m 处的 Muller 矩阵测量结果能揭示更多颗粒信息。如图 7 所示,一般来说, $M_{22}/M_{11}$  提供水样中颗粒

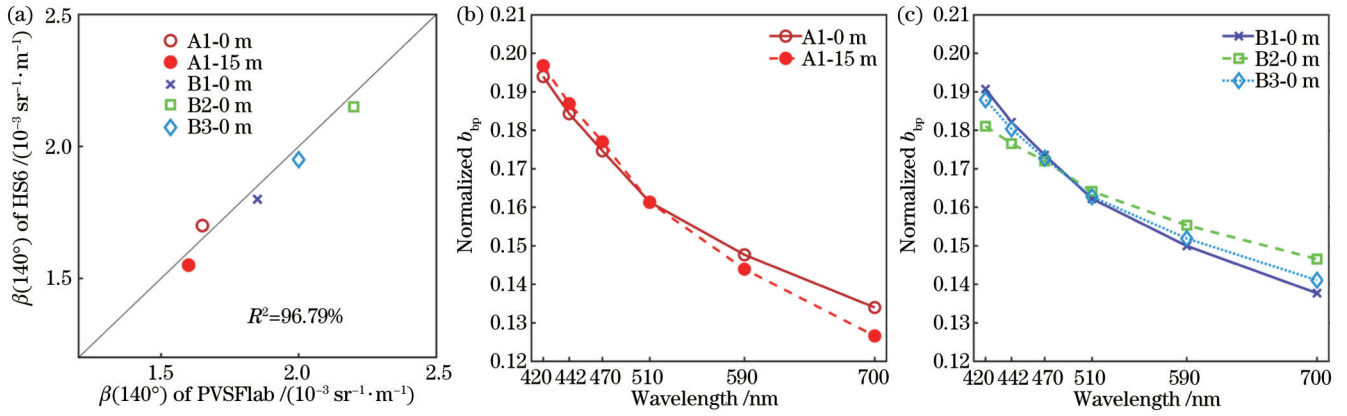


图 6 PVSFlab 与 HS6 测得的后向散射系数测量结果。(a) HS6 与 PVSFlab 的  $\beta(140^\circ)$  测量结果对比; (b) HS6 在 A1 站点的后向散射系数 ( $b_{bp}$ ) 的归一化光谱分布; (c) HS6 在 B1、B2、B3 站点的后向散射系数的归一化光谱分布  
Fig. 6 Measurement results of backscattering coefficient measured by PVSFlab and HS6. (a) Comparison of measurement results between HS6 and PVSFlab at  $\beta(140^\circ)$ ; (b) normalized spectral distribution of backscattering coefficient ( $b_{bp}$ ) of HS6 at station A1; (c) normalized spectral distribution of backscattering coefficient of HS6 at stations B1, B2, and B3

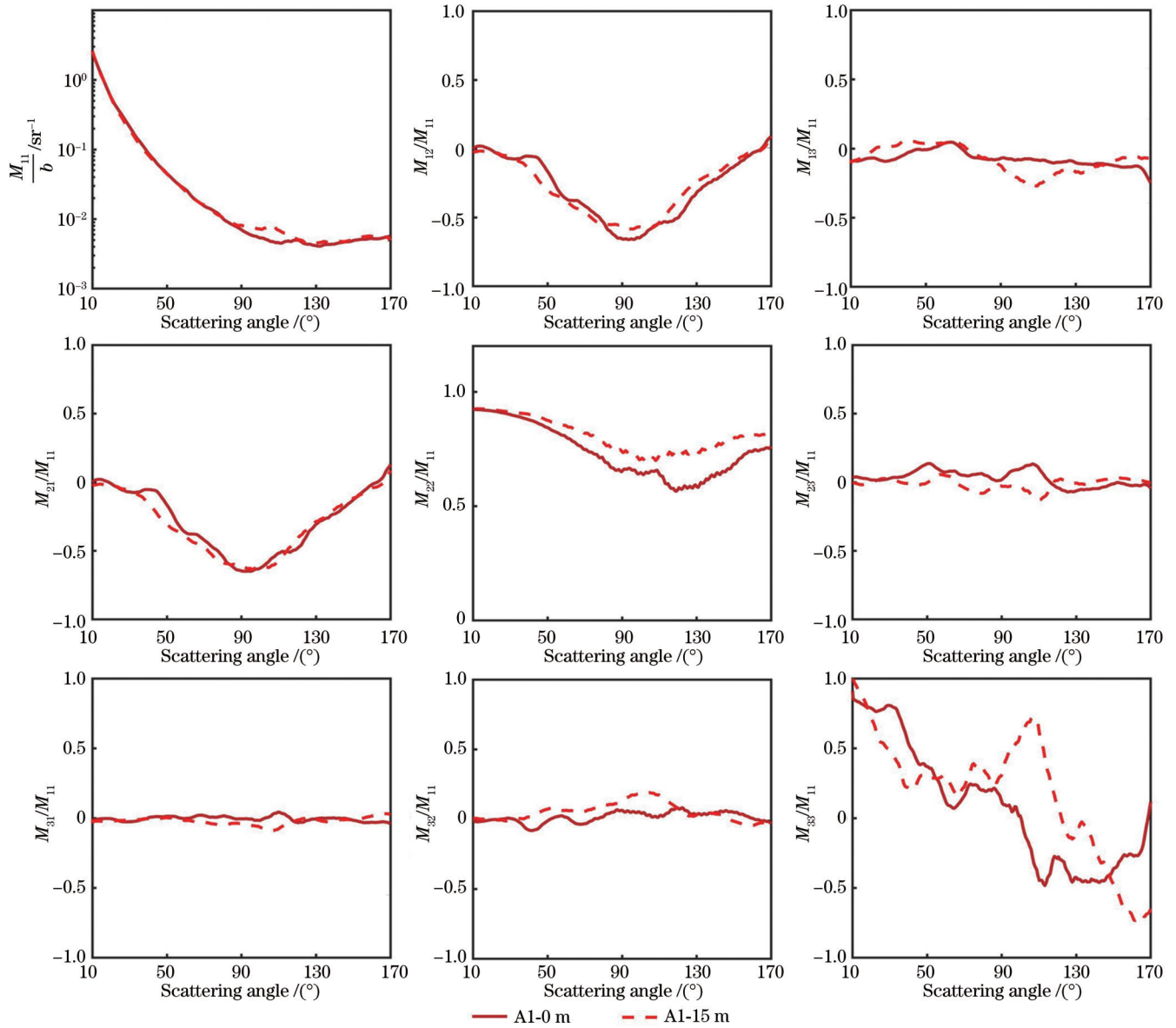


图 7 千岛湖 A1 站点偏振体散射测量结果  
Fig. 7 Polarized volume scattering measurement results at station A1 in Qiandao Lake



形状的信息,  $M_{22}/M_{11}$  等于 1 代表球形, 而偏离 1 则意味着水体颗粒形状更为复杂, 如椭球形、圆柱形等。从图 7 可以看出: 在 A1 站点, 不同水深的  $M_{22}/M_{11}$  变化明显, 说明从剖面来看该站点水体的颗粒形状存在较大差异, 符合千岛湖水体的分层特性, 当 A1 站点处表层与 15 m 处的后向散射系数接近时,  $M_{22}$  可以提供更丰富的颗粒信息;  $M_{12}/M_{11}$  展示了水体偏振程度随散射角度变化而变化的情况, 偏振度变化曲线呈钟形, 在  $90^\circ$  附近达到极值, 这与 Zuger 等<sup>[17]</sup>对各种浮游植物的测量结果一致;  $M_{33}/M_{11}$  变化差异明显, 这是由于测得的  $M_{33}$  信号相较于偏振体散射函数的其他元素较弱, 测量过程中更容易受到藻类的漂移、PMT 的噪声影响等。此外, 尽管进行多次仪器校准, 但是在一些零件校准上(如入射棱镜和出射棱镜的俯仰角度的校准)仍会存在误差, 这是难以避免的, 那么这些因素可

能会导致  $M_{33}$  与相邻矩阵元素混合, 增大  $M_{33}$  的测量误差。

在 B1、B2、B3 处选取表层的水样进行测量, PVSFlab 仪器的测量结果如图 8 所示。在相同水平面下, 三个站点的  $M_{11}$  项较为接近, 但是从  $M_{22}$  项却可以看出 B1 与 B3 曲线接近, 而在  $90^\circ \sim 150^\circ$  范围内 B2 站点的  $M_{22}$  项明显低于其他两个站点。这在光谱图也有类似表现, 如图 5(c) 所示, B1 与 B3 站点的光谱曲线接近, 但是 B2 站点的光谱曲线在  $500 \sim 700$  nm 明显高于其他两个站点, 这反映出 B1 和 B3 站点的浮游藻类形状较为接近, 而 B2 站点的藻类形态特性则与它们存在一定差异。在 B1、B2 和 B3 站点上,  $M_{11}$  整体都较为接近, 但是  $M_{22}$  项却展示了不同站点藻类分布的差异性, 并从光谱图中得到验证。B 站点的  $M_{33}$  测量结果仍然存在较大误差, 原因与 A 站点类似。

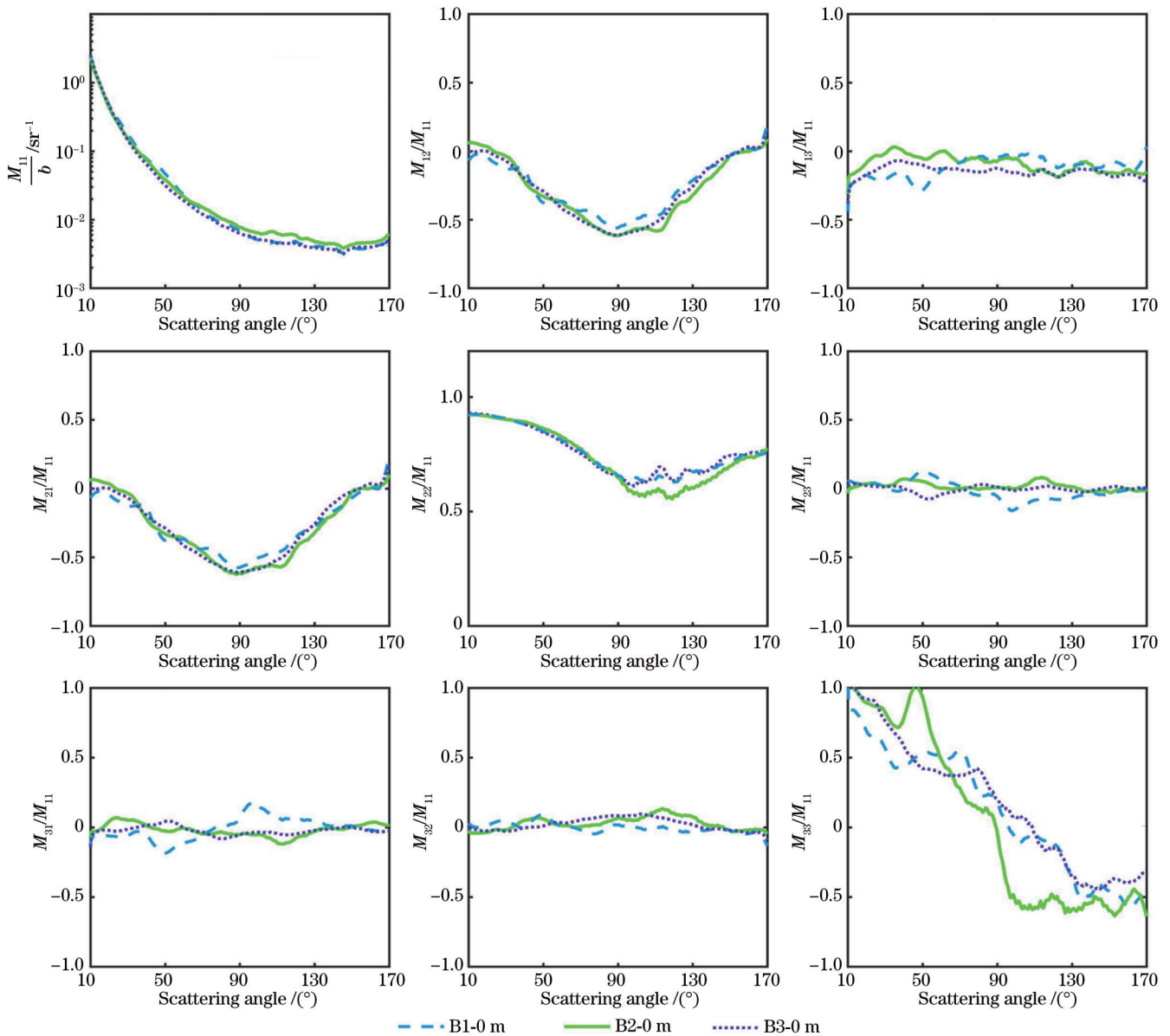


图 8 千岛湖 B1、B2、B3 站点偏振体散射测量结果

Fig. 8 Polarized volume scattering measurement results at stations B1, B2, and B3 in Qiandao Lake

## 4 结 论

设计了一套基于潜望镜式光路结构与旋转偏振探测器探测方式的水体颗粒偏振体散射特性测量系统,实现了 $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 范围内 $3\times 3$ 的偏振体散射函数测量。该系统采用偏振片和半波片组合的方式获得特定方向的起偏光,通过设计3种不同的起偏和检偏角度获得不同散射光组合,联立求解可获得颗粒物偏振体散射函数。为了获得准确的测量结果,对仪器的数据处理和校准程序提出了严格的方法,包括基线测量、角度与幅值标定、偏振标定和数据矫正,利用Mie散射理论获得精确的偏振体散射函数理论计算值,并对其与实验仪器测量结果进行对比,测量结果与理论计算值吻合良好,证明了实验样机测量结果的准确性。使用该套系统在千岛湖进行测试,获得了千岛湖水体颗粒 $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 范围内 $3\times 3$ 水体颗粒散射Mueller矩阵,通过与HS6测量的后向散射系数作对比,结果既验证了该套系统测量的准确性,也体现了千岛湖水体更丰富的颗粒特性信息。

### 参 考 文 献

- [1] Hovenier J W. Structure of a general pure Mueller matrix[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(36): 8318-8324.
- [2] Pezzaniti J L, Chipman R A. Mueller matrix imaging polarimetry [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1558-1568.
- [3] Chami M. Importance of the polarization in the retrieval of oceanic constituents from the remote sensing reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C5): C05026.
- [4] 唐军武, 陈戈, 陈卫标, 等. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 460-500.  
Tang J W, Chen G, Chen W B, et al. Three dimensional remote sensing for oceanography and the Guanlan Ocean profiling Lidar[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 460-500.
- [5] Kattawar G W. Genesis and evolution of polarization of light in the ocean[invited][J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 940-948.
- [6] Lee M E, Lewis M R. A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(4): 563-571.
- [7] 李彩, 柯天存, 曹文熙, 等. 水体体散射函数剖面仪[C]//2004全国光学与光电子学学术研讨会、2005全国光学与光电子学学术研讨会、广西光学学会成立20周年年会论文集. 北京: 中国兵工学会, 2004: 217-220.
- [8] Li C, Ke T C, Cao W X, et al. An instrument for measuring in-situ profiles of the volume scattering function of seawater[C]//2004 National Symposium on Optics and Optoelectronics, 2005 National Symposium on Optics and Optoelectronics, Proceedings of the 20th Anniversary Annual Meeting of Guangxi Optical Society. Beijing: China Ordnance Society, 2004: 217-220.
- [9] 王万研, 杨克成, 罗曼, 等. 水中悬浮颗粒的三维体散射函数测量[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0329001.  
Wang W Y, Yang K C, Luo M, et al. Measurement of three-dimensional volume scattering function of suspended particles in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0329001.
- [10] 郭乙陆, 陶邦一, 黄海清, 等. 水中颗粒物大角度范围体散射函数测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0203011.  
Guo Y L, Tao B Y, Huang H Q, et al. Wide angle volume scattering function measurement methods for particles in water [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203011.
- [11] Voss K J, Fry E S. Measurement of the Mueller matrix for ocean water[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(23): 4427-4439.
- [12] Chami M, Thirouard A, Harmel T. POLVSM (Polarized Volume Scattering Meter) instrument: an innovative device to measure the directional and polarized scattering properties of hydrosols[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26403-26428.
- [13] 杨志勇, 张志伟, 蔡伟, 等. 基于Mueller矩阵的目标偏振特性分析[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0112005.  
Yang Z Y, Zhang Z W, Cai W, et al. Analysis of polarization characteristics of targets based on Mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0112005.
- [14] 马愈昭, 高晨, 朱峻. 实际天气条件下气溶胶的散射偏振特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(21): 2101001.  
Ma Y Z, Gao C, Zhu J. Scattering polarization characteristics of aerosols under actual weather[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21): 2101001.
- [15] Wu C F, Tao B Y, Guo Y L, et al. Measurements of aquatic particle volume scattering function up to  $178.5^{\circ}$  in the East China Sea[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4): 1894.
- [16] Zhang X, Lewis M, Johnson B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(27): 6525-6536.
- [17] 曹爽, 韩冰, 朱建华, 等. 黄东海悬浮颗粒物质量比后向散射特性Mie理论模拟与实证分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1301002.  
Cao S, Han B, Zhu J H, et al. Mie theory simulation and empirical analysis of mass-specific backscattering properties of suspended particles in the Yellow and East China Seas[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1301002.
- [18] Zuger M E, Messmer A, Kane T J, et al. Optical scattering properties of phytoplankton: measurements and comparison of various species at scattering angles between  $1^{\circ}$  and  $170^{\circ}$  [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(1): 381-386.

# Measurement of Polarized Volume Scattering Function of Particles in Water in a Wide Angle Range

Pan Yaorui<sup>1</sup>, Tao Bangyi<sup>2\*</sup>, Wu Chaofan<sup>1</sup>, Mao Zhihua<sup>1,2</sup>, Huang Haiqing<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang, China

## Abstract

**Objective** The polarized volume scattering function of particles in water is the most basic and complete parameter describing their scattering characteristics as it reflects the types, particle size spectra, shapes, and refractive indexes of the molecules and large particles in water. Therefore, the polarized volume scattering function of particles in water is of great research significance. This function is the most critical inherent optical parameter in the study of active and passive ocean optical remote sensing. Nevertheless, it is also the inherent parameter most difficult to measure. To solve the problem that no instrument is currently available in China for measuring the polarized volume scattering function of particles in water in a large angle range, this paper develops a measurement system for the polarized volume scattering characteristics of particles in water on the basis of a periscope-like optical path structure and the detection method of the rotating polarization detector. It further verifies the applicability of an output prism obtained by the half attenuation bonding method to the measurement of the polarized volume scattering characteristics in a large angle range and achieves the measurement of the  $3 \times 3$  scattering Mueller matrix of particles in water in the range of  $10^\circ$ – $170^\circ$ .

**Methods** In this study, pure water was used for baseline measurements, and the scattering characteristics of particles were determined by removing the contribution of the pure water signal to the total signal. According to the characteristics of standard particles in the Mie scattering theory, a standard particle (diameter of  $0.2 \mu\text{m}$ ) with relatively gentle Mie scattering results was used for amplitude calibration and calibration coefficient determination, and another one (diameter of  $2 \mu\text{m}$ ) with salient angle characteristics was used for angle calibration. Polarization was performed with a Stokes meter. The scattered light received by the detector suggests that the scattering optical paths detected at all angles are not the same, and the attenuation transmission distances in water are also different, which necessitates the normalization of the scattering optical path and the correction of the attenuation optical path.

**Results and discussions** A new type of exit prism with simpler processing was designed in this paper. The prism was developed by bonding a neutral density filter with a prism cut into a specific shape. The new prism designed could effectively reduce the influence of stray light on the measurement of large-angle backscattering and small-angle forward scattering. In Fig. 3, the measurement accuracy of the new prism is verified by comparing the measurement results of the old and new prisms. Fig. 5 compares the measured results of  $3\text{-}\mu\text{m}$  diameter polystyrene standard particles with the theoretically calculated values and reveals that they are in good agreement with each other, which proves the reliability of the system in measuring the polarized volume scattering function. Finally, the system was tested in the natural water body of the Qiandao Lake, and the  $3 \times 3$  scattering Mueller matrix of particles in water within the range of  $10^\circ$ – $170^\circ$  was obtained for the first time in China, as shown in Fig. 7 and Fig. 8. A comparison with the spectral shapes measured by HS6 indicates that the particle types at different depths at the same station are different, and the surface particle types at different stations are also different. The results show that polarized scattering characteristics can provide more abundant information of particle characteristics.

**Conclusions** In this study, a measurement system based on a periscope-like optical path structure and the rotating polarization detector was designed to measure the polarized volume scattering function of particles in water, and the measurement of the  $3 \times 3$  polarized volume scattering function in the range of  $10^\circ$ – $170^\circ$  was thereby achieved. Moreover, a new type of exit prism with simpler processing was designed, and the measurement accuracy of the new prism was verified. To obtain accurate measurement results, this paper proposes strict methods for data processing and calibration procedures of the instrument, including baseline measurement, angle and amplitude calibration, polarization calibration, and data correction. An accurate theoretically calculated value of the polarized volume scattering function was obtained by applying the Mie scattering theory and compared with the measurement results of the experimental instrument. The measurement results are in good agreement with the theoretically calculated value. The accuracy of the measurement results of the experimental prototype is thus ensured. The system was further tested in the Qiandao Lake, and a  $3 \times 3$  scattering Muller matrix of particles in water was obtained in the range of  $10^\circ$ – $170^\circ$  in this lake.

**Key words** particles in water; polarization; Mueller matrix; volume scattering function