

# 双波长水体颗粒体散射函数测量仪研制与测量

陶邦一<sup>1</sup>, 韩昶<sup>1,2</sup>, 厉运周<sup>3\*</sup>, 潘耀瑞<sup>1,4</sup>, 李常鹏<sup>1,4</sup>, 毛志华<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境监测预警全国重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 上海交通大学 海洋学院, 上海 200030; 3. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 海洋仪器仪表研究所 海洋动力-物理环境与智能感知全国重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

**摘要:** 水体颗粒物的体散射函数(VSF)是水体最主要的固有光学特性之一, 可用来表征水体颗粒物的含量、形状、粒径谱、组分等特性。目前国内尚缺乏覆盖多波长、广角度测量范围的 VSF 测量仪。本文基于双潜望镜式光路结构与旋转探测器相结合的探测方式, 构建了一套双波长(488 nm 和 532 nm)水体颗粒体散射函数测量系统, 实现了 1.5°~178.5° 范围内双波长水体颗粒体散射函数的测量。基于系统的光路结构以及辐射传输原理进行了对系统开展了基线校正、角度及幅值标定等校准实验。测量 3 μm 直径聚苯乙烯标准颗粒结果与米散射理论计算值吻合程度较高, 证明了系统测量 VSF 的准确性。基于此测量系统获取了我国东海及南海海域真实水体颗粒物双波长体散射函数测量数据, 分析了不同波长之间体散射函数特性的差异, 测量的 VSF 可以为辐射传输模型中 VSF 的参数化提供依据。同时, 还基于实测数据计算了不对称因子, 从体散射的角度分析了不同波长之间散射特征的差异。

**关键词:** 海洋光学; 体散射函数; 散射相函数; 不对称因子; 水体颗粒; 水体光学特性; 散射测量

中图分类号: P714

文献标志码: A

文章编号: 1002-4026(2025)06-0001-09

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Development of a dual-wavelength instrument for measuring the volume scattering function of aquatic particles

TAO Bangyi<sup>1</sup>, HAN Chang<sup>1,2</sup>, LI Yunzhou<sup>3\*</sup>, PAN Yaorui<sup>1,4</sup>, LI Changpeng<sup>1,4</sup>, MAO Zhihua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 3. State Key Laboratory of Physical Oceanography, Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266061, China; 4. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** The volume scattering function (VSF) of aquatic particles is one of the most important inherent optical

收稿日期: 2025-05-11 修回日期: 2025-09-23

基金项目: 齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合试点工程重大创新类项目(2025ZDY01); 山东省重点研发计划(2023ZLYS01); 国家重点研发计划(2022YFC3104200); 自然资源部第二海洋研究所科研基金项目(SZ2332)

作者简介: 陶邦一(1981—), 博士, 研究员, 研究方向为体散射函数测量。E-mail: taobangyi@sio.org.cn

\* 通信作者, 厉运周, 副研究员, 研究方向为海洋监测技术及仪器。E-mail: lyz@qlu.edu.cn

properties of water. However, a VSF measurement instrument in China that can cover multiple wavelengths and a wide angular range remains to be investigated. Herein, we developed a dual-wavelength (488 nm and 532 nm) aquatic particle VSF measurement system that integrates dual-periscope optical configuration with a rotating detector. This system enables VSF measurements across a scattering angle range of  $1.5^\circ \sim 178.5^\circ$  for both wavelengths. According to the optical configuration and radiative transfer principles of the system, baseline correction, angular calibration, and amplitude calibration experiments were conducted on the system. The measurement results for  $3 \mu\text{m}$  polystyrene standard particles agreed well with the Mie scattering theoretical values, demonstrating the VSF measurement accuracy of the system. The system was used to perform dual-wavelength VSF measurements of natural seawater particles from the East China Sea and South China Sea and to analyze the differences in VSF characteristics between the two wavelengths. The measured VSFs can provide a basis for VSF parameterization in the radiative transfer models. In addition, asymmetry factors were calculated from the measured data to analyze the differences in scattering characteristics between the two wavelengths from the volume scattering perspective.

**Key words** : ocean optics; volume scattering function; scattering phase function; asymmetry factor; aquatic particle; optical properties of water; scattering measurement

海洋主被动光学遥感领域中,水体颗粒体散射函数(VSF)是极其重要的固有光学量(IOP)之一<sup>[1-2]</sup>,它在水体光学辐射传输过程中发挥着主导作用。其定义为在某一散射角度下,每单位入射辐照度 $E$ 每单位散射体积 $V$ 所对应的散射光强 $I$ :

$$\beta(\theta; \lambda) = dI(\theta; \lambda) / (EdV) \quad (1)$$

散射相函数(SPF)是 VSF 的归一化形式,能够表征入射光与一定体积的水体相互作用后,在不同角度上散射光的光强分布情况<sup>[2]</sup>。在不同光学类型的水体中,颗粒类型、大小、形状和折射率的差异可以对海洋环境中的光散射产生重要影响<sup>[3]</sup>, VSF 能够提供有关海洋中悬浮物成分的折射率及其大小分布信息。此外,从米散射理论角度分析,散射尺度因子不仅与颗粒粒径密切相关,还显著受到激光入射波长的影响。蓝绿激光因在水中的衰减较慢,被视为海洋中的“透射窗口”<sup>[4]</sup>,而针对蓝绿光体散射特性的影响仍相对较少。

相比于吸收、衰减系数等其他 IOP, VSF 变化动态范围大,同时测量难度也最大。早期对 VSF 开展系统研究的是美国 Scripps 研究所能见度实验室。该实验室采用旋转探测器原理构建的广角散射仪,能完成  $10^\circ \sim 165^\circ$  角度范围内的散射测量,为自然水体的 VSF 定量测量奠定基础。随后, Petzold<sup>[5]</sup> 于 1972 年在小角度和广角测量方面均取得突破,分别研制出  $0.1^\circ \sim 10.0^\circ$  前向小角度和  $10^\circ \sim 170^\circ$  广角 VSF 测量仪样机,并创新性地将两种测量方式结合,显著扩展了测量角度范围,其 VSF 测量成果多年来一直是海洋光学领域的权威数据。为实现多波长 VSF 测量, Kullenberg 开发了探测器旋转式体散射测量仪,可实现在 520 nm、650 nm 工作波长下,以  $1^\circ$  固定视场角和角度分辨率测量  $8^\circ \sim 160^\circ$  的 VSF。Lee 等<sup>[6-7]</sup> 通过旋转棱镜的方式研制出多光谱体散射函数测量仪(MVSM)实现了 VSF 水下原位测量,将测量角度范围拓展至  $0.6^\circ \sim 177.0^\circ$ ,分辨率提升至  $0.3^\circ$ 。Lotsberg 等<sup>[8]</sup> 搭建了两个同心容器体散射测量仪,通过在外容器中填充甘油来减少反射误差,成功实现了  $1^\circ$  角分辨率  $3^\circ \sim 171^\circ$  范围内的 VSF 测量,并利用滤光片覆盖了 442 nm、490 nm、550 nm 和 670 nm 等多波长测量需求。国内在体散射函数测量方面的工作起步相对较晚。中国科学院南海海洋研究所李彩团队<sup>[9]</sup> 采用多个固定角度阵列探测器组合的方式,建立了一套角度测量范围为  $20^\circ \sim 160^\circ$  的水下原位 VSF 测量仪。华中科技大学杨克诚和夏珉团队<sup>[10]</sup> 基于空间映射成像技术,通过对三维空间的散射光进行成像,实现了对微小颗粒(直径小于  $1 \mu\text{m}$ )  $18^\circ \sim 160^\circ$  散射角范围内的 VSF 测量,分辨率为  $1^\circ$ 。针对前向小角度 VSF 测量,自然资源部第二海洋研究所陶邦一团队<sup>[11]</sup> 以 BT-3000 激光粒度仪为基础,采用斜入射式光路结构扩展了前向小角度 VSF 的测量范围,最小角度可测量达到  $0.03^\circ$ ,最大可以测量到  $60^\circ$ 。但以上国内的设备使用激光光源均为单波长,我国海洋光学领域在不同波长体散射函数特性研究方面仍存空白。

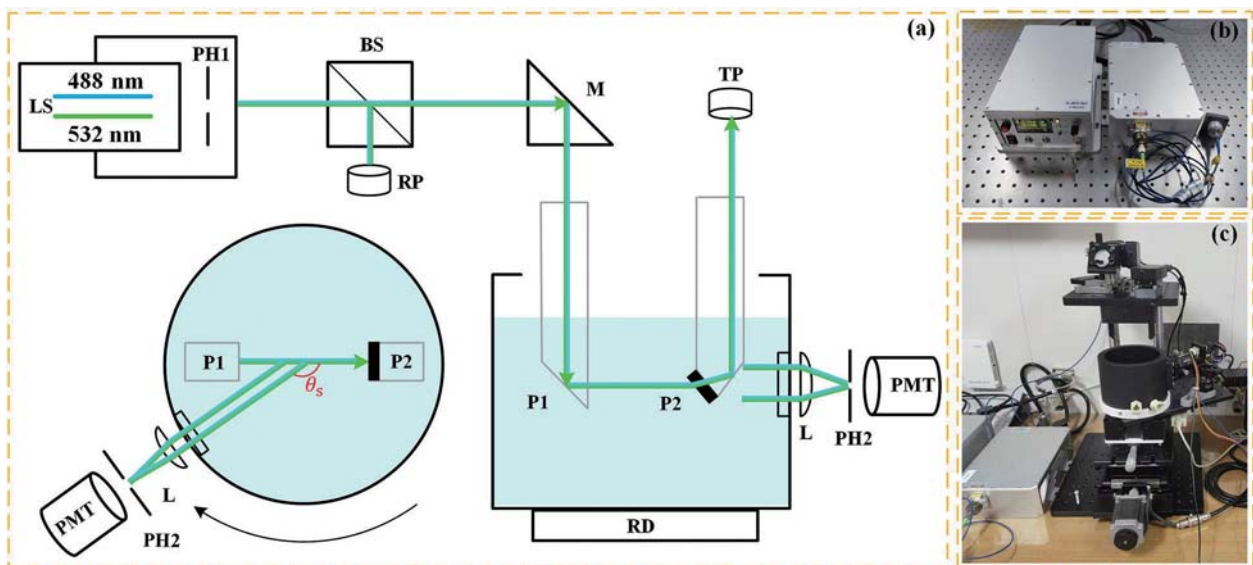
针对国内缺乏实测体散射函数数据支撑的对不同波长颗粒散射特性认知的问题,本文设计了一台双波

长水体颗粒体散射函数测量仪,实现了对于 488 nm 以及 532 nm 在  $1.5^\circ \sim 178.5^\circ$  角度范围内 VSF 测量,并基于聚苯乙烯标准粒子开展了角度和幅值标定及验证实验。在中国东海及南海海域获得了自然水体颗粒双波长 VSF 测量数据,并进一步探讨了不对称因子( $g$ )在不同海域的分布情况。

## 1 实验系统

### 1.1 双波长体散射函数测量仪

双波长体散射函数测量仪(DW-VSFLab)采用激光入射面和探测面分离的设计,结合双潜望式光学系统,允许探测器绕入射光束自由旋转,可以在  $1.5^\circ \sim 178.5^\circ$  角度范围内实现角度分辨率为  $0.75^\circ$  的双波长(488 nm 和 532 nm) VSF 测量。设备光路示意图以及实物照片如图 1 所示,主要包括双波长激光入射子系统、双潜望镜子系统、样品池子系统以及散射光探测子系统 4 个模块组成。



注:(a)测量原理主视图以及散射光探测子系统俯视图;(b)双波长激光器照片;(c)双波长体散射函数测量仪于船载实验室安装实物图。

图1 双波长体散射函数测量仪光路结构示意图以及实物图

Fig.1 Schematic of the optical configuration and photographs of the DW-VSFLab

本研究中使用的激光入射光源采用的是长春新产业光电技术有限公司生产的型号为 CH81353 的双波长激光器(图 1(b)),该系统允许通过一个按钮即可实现波长的无缝切换,这种设计有效地消除了因重复移动而导致的测量误差。激光的发射波长包括 488 nm 和 532 nm,可以通过光纤束准直器随后照射到入射系统中,光束发散角为 1.1 mrad。入射系统平面包括一个光束调整架、针孔(PH1)、分束器(BS)、反射镜(M)以及两个硅探测器(一个参考探测器和一个出射光探测器)。准直光束通过 PH1 来锁定来自激光源的发散杂散光。穿过 BS 后,一束光作为参考并照射参考光电探测器(RP),而另一束光穿过反射镜达入射棱镜(P1)。随后,光束样品池(B)穿过样品,直射光从棱镜(P2)射出,并由透射率光电探测器(TP)检测,从而能够根据比尔-朗伯定律同步测量不同波长的衰减系数  $c_m(\lambda)$ :

$$c_m(\lambda) = -\ln(I(\lambda)/I_0(\lambda))/l, \quad (2)$$

其中  $I$  是 TP 接收到的经过路径长度  $l$  后的激光强度, $I_0$  是 RP 接收到的强度。不同方向的散射光经过透镜(L)和针孔(PH2)后被光电倍增管(PMT)接收。样品池配备了旋转电机(RD),可以带动探测器在水平方向上做  $180^\circ$  旋转,以检测不同散射角( $\theta_s$ )下的散射光。对每个样本进行了三次旋转测量,取平均值作为代表性的最终结果,单次 VSF 测量的旋转时间仅需 7 s。

出射棱镜(P2)是双潜望镜光路结构中的关键组成部分,它是由一块特定形状的棱镜与半衰片通过加拿大树胶粘合形成。由于 $180^\circ$ 附近的后向散射光强度仅为直射光光强的 $10^{-6}$ ,杂散光容易对实际散射光信号产生干扰。该棱镜的设计使得直射光和反射光先后经历两次衰减,降低了反射光回到样品池的强度,避免后向散射光探测时因参杂杂散光而高估。

## 1.2 数据标定与处理

DW-VSFLab 的标定是实验的重要组成部分,通常包含散射体积校正、纯水基线测量、角度与幅值标定等过程,需要借助超纯水、聚苯乙烯球形标准颗粒以及米散射理论计算模型进行。

### 1.2.1 散射体积校正

散射体积即入射激光照射样品的体积,一般随散射角呈现复杂变化。为了保证不同散射角 VSF 测量的准确性,散射体积需保持不变。基于入射光面积不变的原理,使用探测器接收散射光路来简化散射体积。探测器在不同散射角下接收到的散射光路径可以表示为正弦函数相对于散射体积 $90^\circ$ 的倒数。这一关系能够有效修正不同散射角下的散射体积,提高 VSF 测量精度。

### 1.2.2 纯水基线测量

基线测量的作用在于消除溶剂(通常是纯水或纯海水)的散射信号 $\beta_w(\theta;\lambda)$ 对总体散射函数 $\beta(\theta;\lambda)$ 的影响,从而准确地确定颗粒的体散射函数 $\beta_p(\theta;\lambda)$ ,如公式(3)所示:

$$\beta_p(\theta;\lambda) = \beta(\theta;\lambda) - \beta_w(\theta;\lambda) \quad (3)$$

在测量标准颗粒时,基线应为纯水,一般由净水系统(Milli-Q advantage A10)制备,并通过孔径为 $0.2 \mu\text{m}$ 过滤器(PN 12991, Pall Co.Ltd.)进一步过滤。在海上观测期间,将过滤并去除气泡获取的海水作为基线测量的对象。在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 角度区间内,散射信号相对较弱,容易受到探测器探测下限的限制而产生噪声。然而,颗粒的散射信号强度远高于基线信号,因此这些噪声并不会干扰颗粒散射光的有效探测。

### 1.2.3 角度与幅值标定

DW-VSFLab 在实际测量时的角度范围要大于 $180^\circ$ ,且散射角度与散射信号并未直接对应,因此角度标定的目的是确定初始和最终的采样点,同时纠正测量的角度偏差。该过程通过对检测到的 VSF 最大值或最小值进行二阶多项式曲线拟合赋值来完成。

幅值标定的目的是将散射光探测系统所接收的电信号(单位为 V)转化为 VSF(单位为 $\text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )。该步骤需要借助标准颗粒进行, $0.203 \mu\text{m}$ 标准颗粒的粒径远小于激光波长,其散射曲线比较平缓没有明显的角度特征,适合用于标定广角度范围的 VSF。具体可表示为公式(4):

$$\beta_{\text{Mie}}(\theta;\lambda) = \tilde{\beta}_{\text{Mie}}(\theta;\lambda) * b(\lambda) = \tilde{\beta}_{\text{Mie}}(\theta;\lambda) * c_m(\lambda) \quad (4)$$

其中, $\tilde{\beta}_{\text{Mie}}$ 表示由米散射理论计算获取的理论散射相函数, $b(\lambda)$ 为散射系数。表1为本文所使用标准颗粒的详细信息,从中可以看出, $0.203 \mu\text{m}$ 颗粒在相应测量波长折射率的虚部仅为 $0.00035 \pm 0.00015$ ,对 VSF 计算的影响极小,因此标准颗粒的吸收系数近似为0,故 $b(\lambda)$ 与 DW-VSFLab 测量获取的衰减系数( $c_m$ )可认为是相同的。

表1 本研究中所使用的聚苯乙烯标准颗粒详细参数

Table 1 Specifications of polystyrene standard particles used in this study

$\mu_{\text{ND}}/\mu\text{m}$	$\mu_{\text{D}}/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{D}}/\mu\text{m}$	$\delta_{\text{D}}/\mu\text{m}$	$n_{\text{p}}$
0.2	0.203	0.005 9	0.004	1.605 1/1.598 2+(0.000 35±0.000 15) i
3	2.994	0.030 0	0.029	

注: $\mu_{\text{ND}}$ 为标称直径, $\mu_{\text{D}}$ 为平均直径, $\sigma_{\text{D}}$ 为粒径标准偏差, $\delta_{\text{D}}$ 为95%置信水平 $\mu_{\text{D}}$ 的不确定度, $n_{\text{p}}$ 为颗粒在488 nm以及532 nm的复折射率。

通过线性回归模型计算幅值标定系数  $k(\theta; \lambda)$ , 其定义为由米散射理论计算的体散射函数与散射体积及衰减校正后的原始光电信号  $V(\theta; \lambda)$  之间的斜率, 计算公式如下:

$$k(\theta; \lambda) = \beta_{\text{Mic}}(\theta; \lambda) / V(\theta; \lambda) \quad (5)$$

为了确定每个散射角下的标定系数  $k(\theta; \lambda)$ , 我们进行了不同浓度的  $0.203 \mu\text{m}$  标准颗粒溶液的散射信号和衰减系数测量。实验步骤如下: 首先准备 100 mL 的  $0.203 \mu\text{m}$  标准颗粒母液, 每次取等量的母液加入样品池的纯水中, 每次添加母液后, 使用搅拌棒使将标准颗粒与纯水充分混合, 形成浓度梯度的标准颗粒溶液。需要注意的是, 为忽略多次散射影响, VSF 测量需根据设备的散射路径长度控制样品衰减系数以控制实验在单次散射近似的情况下开展。

广角度范围以及高角度分辨率的 VSF 测量可以使得颗粒散射系数  $b_p(\lambda)$  的计算更为准确。对于前向近  $0^\circ$  的 VSF, 采用 e 指数拟合的方法由  $1.5^\circ$  插值到  $0^\circ$ , 而对于  $178.5^\circ \sim 180.0^\circ$  的角度区间, 则使用线性拟合进行插值处理<sup>[12-14]</sup>。经过插值以获取  $0^\circ \sim 180^\circ$  的全角度 VSF, 通过对全角度 VSF 进行积分, 可以得到  $b_p(\lambda)$ , 进而可以准确计算相函数<sup>[15]</sup>。

$$b_p(\lambda) = 2\pi \int_0^\pi \beta_p(\theta; \lambda) \sin(\theta) d\theta \quad (6)$$

将纯水的影响考虑在内, 不对称因子  $g$  可以由如下公式计算得出:

$$g(\lambda) = 2\pi \int_0^\pi \frac{b_p(\lambda) \cdot \tilde{\beta}_p(\theta; \lambda) + b_w(\lambda) \cdot \tilde{\beta}_w(\theta; \lambda)}{b(\lambda)} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (7)$$

其中,  $b(\lambda)$  以及  $b_w(\lambda)$  分别为散射系数以及纯水的散射系数,  $\beta_w$  为纯水的散射相函数。

### 1.3 研究区域

实验于 2023 年 8 月 20 日至 11 月 9 日在南海 (SCS) 和东海 (ECS) 海域分别开展了两次海上观测实验。两个实验航次共对 51 个站点进行了采样, 其中, 东海实验区属于悬浮泥沙浓度高且颗粒较大的沿海区域, 共包含 20 个采样站, 其地理范围为纬度  $28^\circ\text{N}$  至  $31^\circ\text{N}$ 、经度  $121.5^\circ\text{E}$  至  $123.5^\circ\text{E}$ 。南海实验区面积更广, 共包含有 31 个采样点, 覆盖纬度  $12^\circ\text{N}$  至  $21^\circ\text{N}$ 、经度  $112^\circ\text{E}$  至  $124^\circ\text{E}$  的海域。对于所有站点, 我们均使用温盐深剖面仪 (CTD) 海水采样器收集表层水样。在南海站点, 由于平均水深约为 1 500 m, 我们选取了 5 m 深处的样本作为表层样本; 而在东海站点, 因平均水深仅约 30 m, 我们从 2 m 深处采集了表层样本。在测量之前, 使用磁力搅拌器将水样充分混合。根据水样的衰减系数对样品进行适当稀释, 使其满足单次散射的要求。此外, 气泡对测量结果会产生较大影响, 在样品的收集、转移和稀释过程中, 需尽量避免气泡的产生。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 仪器标定结果

$3 \mu\text{m}$  标准颗粒粒径相较于入射激光波长要明显较大, 因此基于米散射理论计算的 VSF 曲线会出现呈涟漪状的极小值与极大值相间分布。由此角度分布特征可以开展角度标定实验。将计算得到的  $k$  应用于  $3.0 \mu\text{m}$  标准颗粒测量时, 其结果如图 3 所示, 在 488 nm 和 532 nm 波长处的 VSF 测量结果与米散射理论曲线保持高度一致, 其绝对百分差 (APD) 分别约为 15.1% 和 15.0%。图 2 (c) 和 (d) 还展示了在  $6^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $150^\circ$  和  $178^\circ$  不同的散射角度下, 原始光电信号和理论体散射函数之间的相关性。结果表明决定系数  $R^2$  都大于或等于 0.96, 充分证明了该标定方法的可行性。

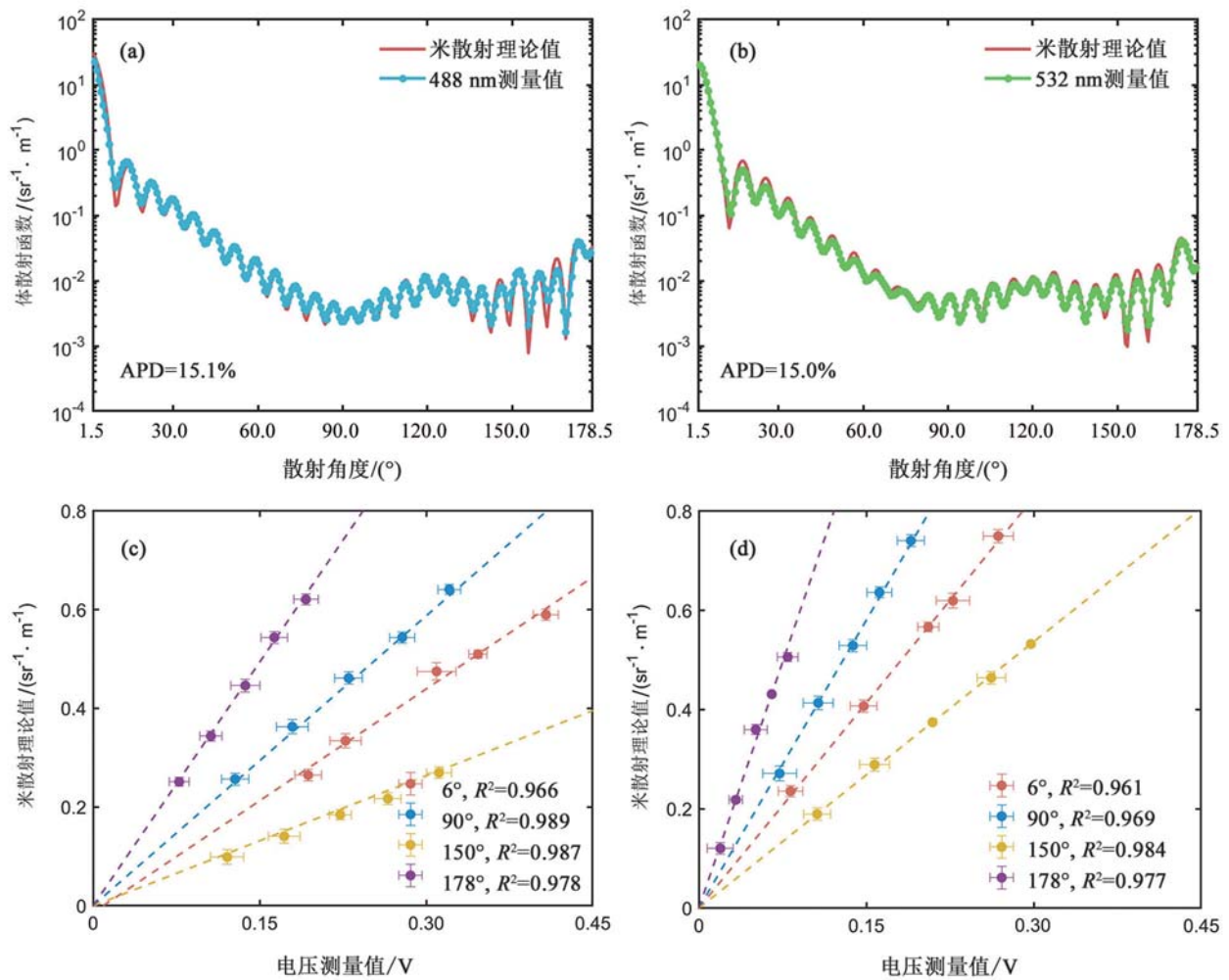


图2 采用  $3\ \mu\text{m}$  标准颗粒标定 DW-VSFLab 的结果

Fig.2 Calibration results of the DW-VSFLab using  $3\ \mu\text{m}$  standard particles

## 2.2 体散射函数测量结果

如图3(a)以及(c)所示为ECS和SCS中VSF的测量结果。值得注意的是,南海VSFs的最低值可以达到 $10^{-4}$ ,而东海VSFs的最低值为 $10^{-3}$ ,东海海域实验站位所获取的后向散射强度较弱,相较于前向散射要低5~6个数量级。这表明南海的颗粒散射系数相比东海更低。从前向VSF来看,ECS比SCS表现出更强的散射能量,这是由于东海中的粒径普遍比南海的平均粒径大。此外,无论在东海还是南海海域,观测到的后向体散射函数的强度明显低于前向区域。在近岸富含无机颗粒的实验站位,这种差异约有4个数量级,在南海开阔大洋海域,这种差异可以达到近6个数量级。此外,在大于 $150^\circ$ 的后向散射角度范围内,VSF随着角度增加,与前人的结论保持一致<sup>[11]</sup>。

散射相函数对不同类型的颗粒表现出不同的特征响应。由SCS和ECS中测量的体散射函数计算获取的全角度散射相函数结果分别如图3(b)和(d)所示。在东海,488 nm和532 nm的散射相函数在 $0^\circ$ 和 $30^\circ$ 之间存在差异,其中488 nm的下降斜率明显大于532 nm的下降斜率,这与东海其他区域的观测结果存在偏差。从 $30^\circ$ 到 $90^\circ$ ,两个波长的SPF无显著性差异。然而,在 $30^\circ\sim 90^\circ$ 的角度范围内,不同波长处的SPF形状存在明显差异。在南海海域,蓝绿波段相函数的形状在前向( $0^\circ\sim 60^\circ$ )是相似的。在 $60^\circ\sim 150^\circ$ 范围内,488 nm的变化率大于532 nm的变化率。超过 $150^\circ$ 后,两个波长均呈现增加趋势,且488 nm处的斜率高于532 nm处的斜率。显然,532 nm比488 nm在 $30^\circ$ 之前表现出更大的斜率,表明更强的前向散射。

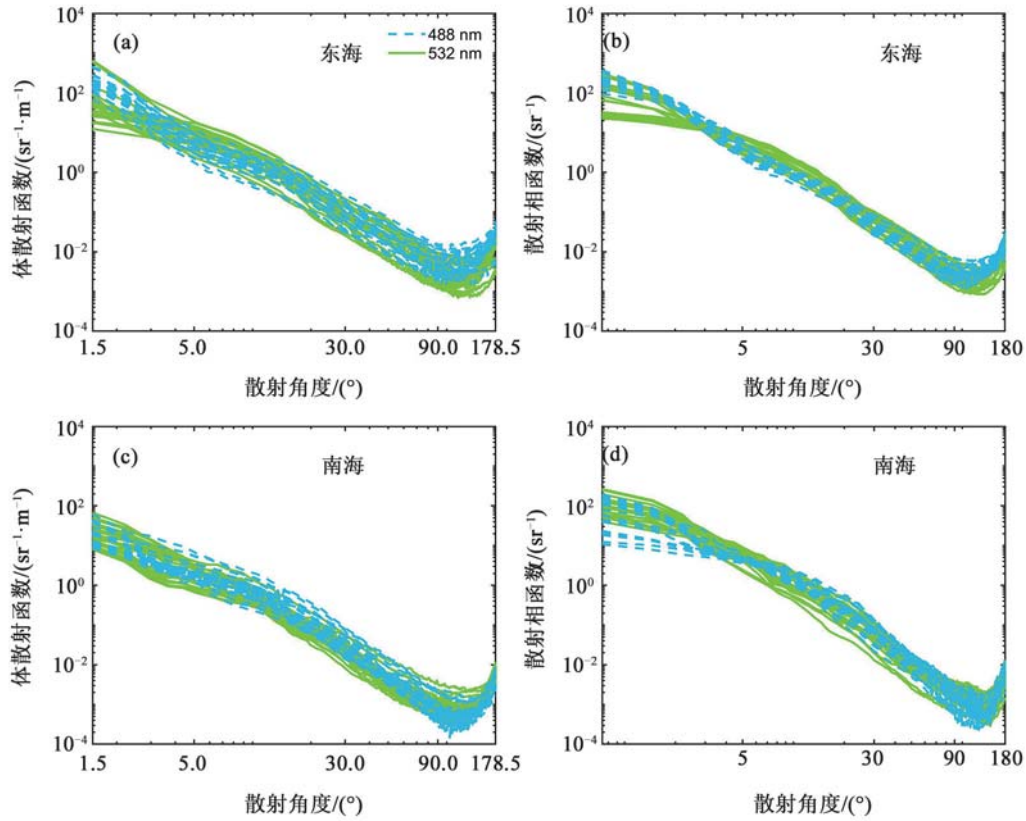


图 3 东海及南海海域体散射函数与散射相函数的测量结果

Fig.3 Experimental results of the VSF and SPF in the ECS and SCS

此外,我们进一步讨论了 VSF 在不同光学类型水体中的波长差异,如图 4 所示。通过将 VSF 以  $90^\circ$  的角度进行归一化,可以清晰地观察到清洁水体(南海)和浑浊水体(东海)之间的结果存在明显差异。清洁水体显示出更强的对称性,而浑浊水体前向和后向散射的差异更大,对称性较低。无论在何种类型的水体下,短波长的 VSF 几乎均关于  $\theta = 90^\circ$  对称,推测是由于对称分子散射在短波长下对总散射的贡献更大。

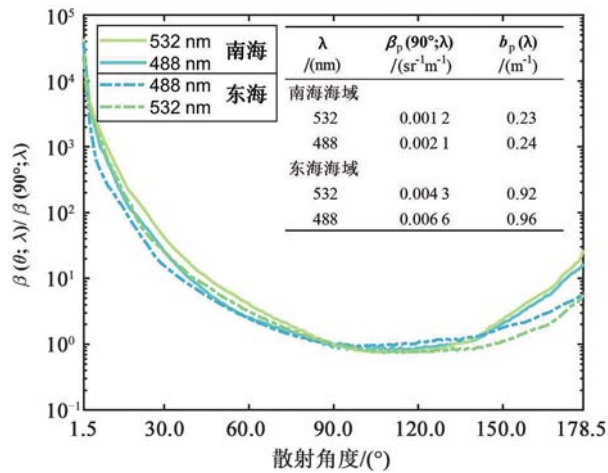


图 4 东海与南海海域体散射函数的波段差异

Fig.4 Wavelength-dependent differences between VSFs measured in clear (SCS) and turbid (ECS) waters

### 2.3 不对称因子

根据公式(7)由双波长体散射函数计算了东海及南海海域不同波长的不对称因子  $g$ 。根据 Petzold 测得的典型水样的体散射函数所计算的  $g$  分别为 0.869、0.940、0.916 和 0.921。实验区域内所有测量站点的  $g$  的范围在 0.861~0.974, 与 Petzold 所得的结果相近。 $g$  接近 1, 表明海水中往往会表现出强烈的前向散射。此外可以发现, 清洁海洋水体的  $g$  小于 0.9, 而近海水样、浑浊的港口水样和颗粒物水样以及温州沿海和长江口的水样都包含大量的颗粒物(泥沙、藻类等), 说明  $g$  的大小也就是前向散射的强度与水体内的颗粒物息息相关。与固有光学量(如吸收、衰减系数)的表现不同, 不同波长的不对称因子在不同海域均展示出相同的大小关系, 即  $g(532)$  始终要高于  $g(488)$ 。其原因在于  $g$  主要受较大颗粒(如浮游植物、矿物颗粒)的前向散射主导, 根据米散射理论, 绿光波段前向散射能量更大; 而吸收系数和后向散射系数等常规固有光学量, 其蓝绿光之间的差异主要是由纯水的吸收系数导致, 绿光波段纯水吸收系数要高于蓝波段, 在水体较为清澈的海域, 由纯水吸收系数导致的绿光波段对应的总吸收系数会高于蓝光波段。

不同水体光学类型中, 不同波段不对称因子的差异也不同。如图 5 所示在东海区域,  $g(488)$  的范围为 0.902~0.966, 而  $g(532)$  的范围为 0.916~0.974,  $g(532)$  的平均比  $g(488)$  高出 1.1%。两者的最大值均出现在近岸区域, 随着水深的增加,  $g$  逐渐减小。而在南海海域,  $g(532)$  仍高于  $g(488)$ 。具体而言,  $g(488)$  的范围为 0.861~0.932, 平均值为 0.90, 而  $g(532)$  则在 0.874~0.935 范围内变化, 平均值为 0.92。需要注意的是, 在吕宋海峡以东和南海南部海盆深水区等水体最为清洁区域( $c$  均小于 0.2),  $g$  要明显较小,  $g(488)$  为 0.861, 而  $g(532)$  等于 0.879。且通过变化率(PD)可以看出,  $g(532)$  与  $g(488)$  之间的差异也要明显高于其他区域。这是由于在南海中部这类以细颗粒物质和浮游植物为主的清洁水体中, 颗粒物粒径分布相对较窄, 其散射的波长依赖性(即散射强度随波长变化的特征)更为显著, 从而导致蓝绿波段  $g$  值出现较明显的差异。清洁水体中前向散射的能量相比浑浊水体中要更弱, 而不对称因子主要由  $60^\circ$  之前的前向散射能量主导, 故清洁水体中的  $g$  往往要低于浑浊水体。

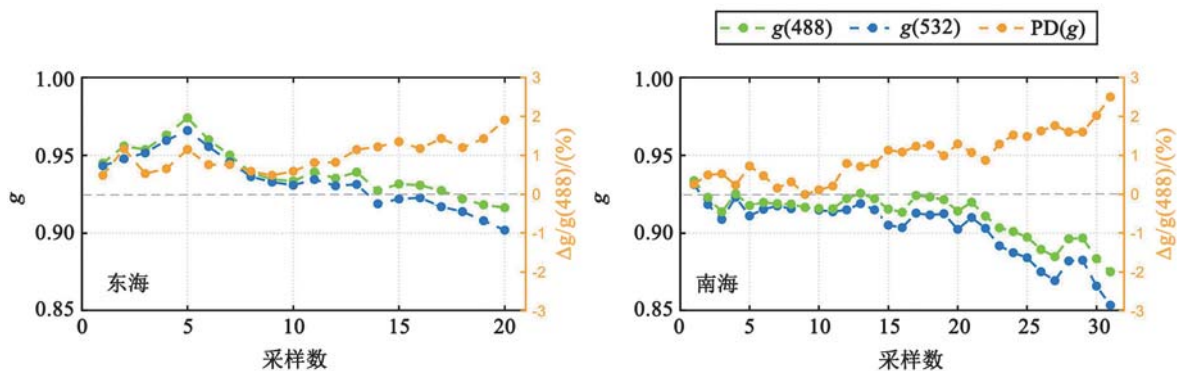


图5 东海及南海海域不同区域范围不对称因子变化

Fig.5 Values of  $g(488)$ ,  $g(532)$ , and  $PD(g)$  in different areas of the ECS and SCS

### 3 结论

本文基于潜望镜式光路结构与旋转探测器相结合的方式设计了一套双波长水体颗粒体散射函数测量系统, 可以完成 488 nm 以及 532 nm 在  $1.5^\circ \sim 178.5^\circ$  角度范围内的 VSF 测量。为确保测量结果的准确性, 开展了包括基线测量、角度与幅值标定在内的一系列标定实验, 将实验设备测量结果与利用米散射理论精确计算的 VSF 理论值进行对比, 不同波长的测量平均百分比误差均只有近 15%。使用该设备获取了东海和南海水体颗粒广角度范围水体颗粒双波长 VSF 观测数据, 并计算了散射不对称因子, 可以发现散射特性与吸收、衰减系数的表现不同, 532 nm 对应的不对称因子往往高于 488 nm, 表明不同波长之间的颗粒散射特性存在差异, 为海洋光学研究提供了新的视角。

## 参考文献:

- [1] MOBLEY C.D. Light and water: Radiative transfer in natural waters[M]. New York:Academic Press, 1994.
- [2] 唐军武, 朱培志, 刘秉义, 等. 海洋剖面激光雷达探测中颗粒物偏振散射问题[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 20. DOI:10.3788/AOS202242.1200001.
- [3] STRAMSKI D, BOSS E, BOGUCKI D, et al. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean[J]. Progress in Oceanography, 2004, 61(1): 27-56. DOI:10.1016/j.pocean.2004.07.001.
- [4] HAN C, TAO B Y, PAN Y R, et al. Comparative analysis of diffusion length based on the volume scattering function measurements from the East and South China Seas[J]. Frontiers in Marine Science, 2024, 11: 1465899. DOI:10.3389/fmars.2024.1465899.
- [5] PETZOLD T J. Volume scattering functions for selected ocean waters[D]. San Diego: University of California, 1972.
- [6] LEE M E, KORCHEMKINA E N. Volume scattering function of seawater[M]//Springer Series in Light Scattering. Cham: Springer International Publishing, 2017: 151-195. DOI:10.1007/978-3-319-70808-9\_4.
- [7] 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. DOI:10.1175/1520-0426(2003)20<563: anmftm>2.0.co;2.
- [8] LOTSBERG J K, MARKEN E, STAMNES J J, et al. Laboratory measurements of light scattering from marine particles[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2007, 5(1): 34-40. DOI:10.4319/lom.2007.5.34.
- [9] 李彩, 曹文熙, 柯天存, 等. 水体体散射函数测量技术研究进展 [J]. 热带海洋学报, 2013, 32(5): 65-72. DOI:10.3969/j.issn.1009-5470.2013.05.009.
- [10] WANG Wanyan, YANG Kecheng, LUO Man, et al. Measurement of three-dimensional volume scattering function of suspended particles in water[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0329001.
- [11] WU C F, TAO B Y, PAN Y R, et al. Forward volume scattering function ( $0.03^{\circ}$ — $60^{\circ}$ ) measured using an oblique-incidence particle sizer[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12848. DOI:10.1364/oe.454837.
- [12] ZHANG X D, GRAY D J, HUOT Y, et al. Comparison of optically derived particle size distributions: Scattering over the full angular range versus diffraction at near forward angles[J]. Applied Optics, 2012, 51(21): 5085. DOI:10.1364/ao.51.005085.
- [13] ZHANG X D, TWARDOWSKI M, LEWIS M. Retrieving composition and sizes of oceanic particle subpopulations from the volume scattering function[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): 1240. DOI:10.1364/ao.50.001240.
- [14] 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. DOI:10.3390/app12041894.
- [15] HAN C, TAO B Y, LI Y Z, et al. Improved determination of particle backscattering coefficient using four-angle volume scattering measurements[J]. Remote Sensing, 2025, 17(17): 2990. DOI:10.3390/rs17172990.

