

# 光学学报

## 海洋剖面激光雷达探测中颗粒物偏振散射问题

唐军武<sup>1,2</sup>, 朱培志<sup>2\*</sup>, 刘秉义<sup>1,2</sup>, 张洪玮<sup>3</sup>, 胡连波<sup>2</sup>, 陶邦一<sup>4</sup>, 廖然<sup>5</sup>, 孟凡谦<sup>2</sup>,  
何惠馨<sup>2</sup>, 陈树果<sup>1,2</sup>, 吴松华<sup>1,2</sup>, 马辉<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 青岛海洋科学与技术试点国家实验室“观澜号”海洋科学卫星工程部, 山东 青岛 266237;

<sup>2</sup> 中国海洋大学信息科学与工程学部, 山东 青岛 266100;

<sup>3</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>4</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;

<sup>5</sup> 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055

**摘要** 垂向层化是海洋水体的基本特征之一, 几乎所有海洋学科的测量与分析都需要直接或间接的剖面信息。激光雷达是目前唯一可以遥感方式获得百米级海洋剖面信息的手段, 激光雷达水体回波信号主要受水分子与水体颗粒物吸收、散射作用的共同影响。从激光雷达的后向 180° 散射信号中反演水体颗粒物成分时, 活体浮游植物及其降解物、无机颗粒(悬浮泥沙)、浮游动物、气泡等颗粒物在粒径、组分、形状、内部结构等方面的复杂性决定了水体光学特性的复杂性。180° 处的体散射系数  $\beta(\pi)$  是激光雷达水体探测的基本参数, 然而不同浮游植物颗粒的散射相函数在 180° 处相差 10 倍。目前的模拟仿真中采用的仅具有普适意义的 Petzold 体散射函数或 Voss & Fry 穆勒矩阵偏振参数, 与具体的遥感探测水体的体散射函数或穆勒参数有很大的差别。针对这个激光雷达中最重要的基础性问题之一, 也是主被动光学海洋观探测中的基本问题, 进行了综述, 并参考国际相关研究人员近些年的一些研究成果, 试图提出后续应当重点解决的理论与技术问题。

**关键词** 海洋光学; 海洋剖面激光雷达; 水体光学特性; 水体偏振光散射; 水体颗粒物光学特性

中图分类号 P733.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1200001

## Polarized Light Scattering of Particulate Matter in Detection of Oceanographic Profiling LiDAR

Tang Junwu<sup>1,2</sup>, Zhu Peizhi<sup>2\*</sup>, Liu Bingyi<sup>1,2</sup>, Zhang Hongwei<sup>3</sup>, Hu Lianbo<sup>2</sup>,  
Tao Bangyi<sup>4</sup>, Liao Ran<sup>5</sup>, Meng Fanqian<sup>2</sup>, He Huixin<sup>2</sup>, Chen Shuguo<sup>1,2</sup>,  
Wu Songhua<sup>1,2</sup>, Ma Hui<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Engineering Department of Guanlan Satellite for Ocean Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, Shandong, China;

<sup>2</sup> Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>4</sup> State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

<sup>5</sup> Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, Guangdong, China

**Abstract** Vertical stratification is one of the basic features of oceans, and almost all marine disciplines require direct

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-03-20; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1408000)、山东省重大科技专项(2018SDKJ0102)

通信作者: \*zhupeizhi@hotmail.com

or indirect profile information for measurement and analysis. LiDAR is the only remote sensing technology that can be used to obtain the profile information of oceans at a depth of over 100 m, and the echo signals of LiDAR are mainly affected by the joint absorption and scattering effect of water molecules and particulate matter in oceans. When the backscattered signals of LiDAR at  $180^\circ$  are used for the inversion of the components of the particulate matter in oceans, the complexity of water optical properties is determined by the complexity of particulate matter in aspects such as grain size, components, shapes, and internal structure. The particulate matter includes living phytoplankton and their degradation products, inorganic particles (suspended sediment), zooplankton, and air bubbles. The volume scattering coefficient  $\beta(\pi)$  at  $180^\circ$  is the basic parameter for the water body detection of LiDAR, and the scattering phase functions of different phytoplankton particles differ by a factor of 10 at  $180^\circ$ . In LiDAR simulations and calculations, researchers use the general-purposed volume scattering functions measured by Petzold and the polarization parameter of the Mueller matrix measured by Voss & Fry, which may cause significant divergence compared with specific *in-situ* results. Given this basic and paramount problem in LiDAR and also in active and passive optical ocean observing and detection, this paper gives a review in this regard. Moreover, the major theoretical and technological problems to be solved are put forward by referring to the relevant research results in recent years.

**Key words** ocean optics; oceanographic profiling LiDAR; water optical properties; polarized light scattering of water; optical properties of water particulate matter

## 1 引言

全球及海洋碳循环等大科学问题需要准确的上层海洋初级生产力估算,这需要对上层海洋生物光学剖面进行精细化的高效探测<sup>[1-2]</sup>。从探测机理来看,最佳探测手段之一是主被动海洋光学遥感,包括被动光学遥感(水色遥感)和基于偏振信号探测的激光雷达主动剖面探测。从水体后向散射光或激光回波信号中反演浮游生物量、颗粒有机碳等参数,以及矢量化模拟仿真海洋水体的三维光场等,都强烈依赖于对水体成分的后向散射,特别是近  $180^\circ$  后向散射偏振特性的掌握<sup>[3]</sup>。

海洋光学遥感与现场观探测理论与技术的基本问题之一是光的辐射传输问题。电磁波(光)在介质的辐射传输过程中,除了吸收和散射,介质对光的偏振态的改变也是其固有光学特性之一。介质对偏振光的散射作用可用斯托克斯(Stokes)矢量与穆勒矩阵(Mueller Matrix)的运算来表示。在偏振(矢量)辐射传输计算与探测中,介质的 Mueller 矩阵是其散射特性最基础、最完整的描述参数<sup>[4-8]</sup>,体现了介质中分子和大颗粒物的种类、粒径谱、形状、折射率等。因此,获取可完整描述水体偏振光散射特性的水体 Mueller 矩阵中的参数,就成为主被动海洋光学遥感理论与技术中重要的基础性工作<sup>[9-12]</sup>。

水体颗粒物散射是海洋光学遥感的基础,颗粒散射在不同角度(方向)上的巨大差异和不同类型颗粒散射特性差异又是遥感定量化和反演复杂问题的主要原因。随着海洋光学遥感的发展,被动的水色遥感和主动的光学探测与激光雷达遥感都从传统的

标量辐射技术向基于辐射偏振特性的矢量探测技术发展<sup>[1]</sup>。水体中的偏振光一般由 Stokes 矢量表示,辐射传输中的光偏振特性及强度的改变,除了吸收之外,主要由水体分子和颗粒物的偏振散射所决定,而水分子的散射特性相对固定,其辐射传输中的光偏振特性及强度的改变主要由水体颗粒物的散射特性(即 Mueller 矩阵)所决定。因此具有  $4 \times 4$  个元素的 Mueller 矩阵成为海洋主被动光学遥感研究中最关键和基础的固有光学参量(IOPs)之一,同时也是目前测量难度最大的参量。

国际上广泛认可的经典海洋水体 Mueller 矩阵数据是美国 TAMU 大学 Voss 和 Fry<sup>[9]</sup>的实测结果。但该数据是对太平洋、大西洋等海域 200 多个测量结果的平均,他们主要是在宏观上对海水 Mueller 矩阵参数进行共性特征的研究,对基于颗粒物偏振散射的海洋剖面激光雷达等新探测需求而言,需要开展新的系统化、精细化的基础性水体成分大角度范围尤其是接近  $180^\circ$  的体散射函数(VSF)及其偏振特性的测量与分析工作。

本文首先介绍了水体颗粒偏振光散射 Mueller 矩阵的定义及其物理意义,进而对 Mueller 矩阵在国内外测量技术及仪器的发展趋势和存在的问题进行了归纳,最后着重在测量分析和应用方面对其进行了综述,并提出后续发展的建议。

## 2 水体 Mueller 矩阵在海洋光学观探测中的意义

Stokes 矢量( $S=[I, Q, U, V]$ )最简单的形式可以表示为

$$\mathbf{S}_{\text{scat}} = \mathbf{L}(\pi - \alpha_2) \mathbf{M} \mathbf{L}(\alpha_1) \mathbf{S}_{\text{inc}}, \quad (1)$$

式中:  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为不同的旋转角度;  $\mathbf{S}_{\text{inc}}$  为入射光的 Stokes 矢量;  $\mathbf{S}_{\text{scat}}$  为散射光的 Stokes 矢量;  $\mathbf{L}$  为子午面下的旋转矩阵;  $\mathbf{M}$  为水体散射颗粒的 Mueller 矩阵, 可表示为

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

式中:  $m_{ij}$  描述介质的偏振光学特性, 其中  $m_{11}$  就是

传统意义的 VSF, 目前海洋光学界主要应用的仍是 Petzold<sup>[13]</sup> 提出的水体 VSF。

国际上最早测量海洋水体 Mueller 矩阵的是美国俄勒冈州立大学的 Beardsley<sup>[14]</sup>; 之后, Kadyshevich 等<sup>[15-17]</sup> 也在这方面进行了一些研究; 后续 Voss 和 Fry<sup>[9]</sup> 的实测结果得到广泛认可, 该组 Mueller 矩阵参数一直沿用至今 (部分测量结果如图 1 所示), 德国 Bremen 大学的 Kokhanovsky<sup>[18]</sup> 依此实验数据得到了一组参数化拟合公式, 这极大地方便了水体偏振光场的辐射传输计算与模拟仿真。

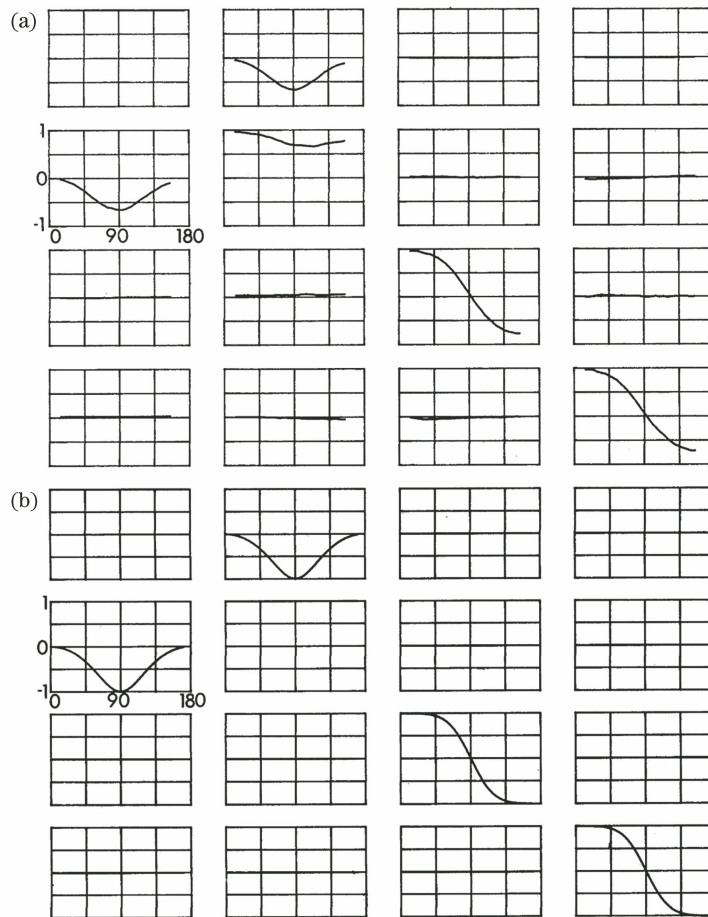


图 1 Voss & Fry 的 Mueller 矩阵参数 (每个图的  $x$  轴对应散射角,  $y$  轴对应归一化矩阵元素值)<sup>[9]</sup>。

(a) 太平洋和大西洋的平均 Mueller 矩阵; (b) Rayleigh-Gans 近似下计算的粒子 Mueller 矩阵

Fig. 1 Mueller matrix parameters provided by Voss & Fry ( $x$  axis of each graph corresponds to scattering angle, and  $y$  axis corresponds to normalized matrix element value)<sup>[9]</sup>. (a) Average Mueller matrices of Pacific and Atlantic Oceans; (b) calculated Mueller matrices of particles in Rayleigh-Gans approximation

传统的、以太阳自然光为光源的被动海洋光学遥感 (即水色遥感) 经过 40 余年的发展, 已接近成熟, 其精确的海洋-大气系统辐射传输计算、遥感探测与反演精度的进一步提高等都有赖于充分利用大气-气海界面-海洋水体的偏振信息<sup>[1]</sup>。目前面向水体偏振光学遥感的基础性数据获取手段与水体成分

偏振散射特性研究的主要困难之一是缺少现场或实验室条件下易于使用的测量自然复杂水体的偏振多角度散射信号、进而完整获得可用于矢量辐射传输计算中基本参数的 Mueller 矩阵测量仪, 人们在水体散射及辐射传输研究中多数只能采用两组典型数据: Petzold<sup>[13]</sup> 得到的 VSF 及 Voss 和 Fry<sup>[9]</sup> 得到的



海洋水体 Mueller 矩阵参数。

虽然研究人员在 20 世纪 90 年代初中期就研制并发射了 POLDER-1/2 等具有水色偏振遥感能力的遥感器<sup>[19-20]</sup>,但国际海洋光学遥感界在 2000 年前后才开始新一轮水体 Mueller 矩阵相关的精细化分析测量工作<sup>[21]</sup>。

基于主动光源的激光雷达海洋生物光学剖面探测技术(即非面向浅海水体深度测量的海岛海岸带测绘技术),因其光源是高偏振度的激光,其剖面探测的基本机理基于不同水层、不同水体组分对偏振入射光的偏振或退偏振散射。自 20 世纪 70 年代开始,海洋剖面探测激光雷达一直处于实验阶段,这一方面是由于水体固有的强衰减特性所导致的激光雷达技术本身的限制(大动态范围、微弱信号检测、剖面探测深度浅),另一个方面是由于缺乏对激光回波偏振信号(如退偏比等)解译所需的不同水体成分偏振光散射特性的基础性测量(数据获取)手段及分析对比研究<sup>[22-23]</sup>。

海洋激光雷达是获取海水垂直结构信息的最有效的技术手段之一,利用偏振激光进行水体光学性质探测时,由于水中各种颗粒物的散射特性的不同,激光雷达回波信号中包含了不同散射角和偏振态的光信号。无论是在进行激光雷达回波信号模拟仿真时,还是利用激光雷达回波信号进行水体光学性质和水体颗粒物特性反演时,都将水中颗粒物偏振散射特性作为先决条件。因此亟须开发 Mueller 矩阵测量仪用于获取水体颗粒物  $4 \times 4$  Mueller 矩阵参数<sup>[24]</sup>。

在激光雷达测量过程中,多种波长、偏振状态的激光束在水体、光学元件和各种界面发生散射和折射,其光强和偏振状态受到各种因素的影响,从而发生复杂的变化。为了实现海洋水体生物光学参数的准确测量,必须建立仿真模拟平台。然而目前的模拟仿真中多采用仅具有普适意义的 Petzold<sup>[13]</sup>得到的 VSF 及 Voss 和 Fry<sup>[9]</sup>得到的 Mueller 矩阵偏振参数,这与具体的遥感探测水体的 VSF 或 Mueller 参数有很大的差别。

在现场水体成分光学观探测和水下激光影像等方面,现有标量化(非偏振)表观和固有光学参数(AOPs & IOPs)的测量需要进一步发展为矢量化(带偏振)的光学测量,以推动相关技术引领性的发展,但其应用潜力受到水体成分基础性散射特性缺乏的限制<sup>[25]</sup>,国内多用水体的偏振性质来克服水体颗粒物对成像质量的影响<sup>[26-27]</sup>。

### 3 水体 Mueller 矩阵测量技术与仪器的发展趋势

2000 年后,国内外很多研究人员,如 Lee 和 Lewis<sup>[28]</sup>、李彩等<sup>[29]</sup>、Sullivan 和 Twardowski<sup>[30]</sup>、Li 等<sup>[31]</sup>、Slade 等<sup>[21]</sup>、Chami 等<sup>[32]</sup>、Harmel 等<sup>[33]</sup>、Zhang 等<sup>[34-35]</sup>、郭乙陆等<sup>[36]</sup>开始了新一轮的 VSF 及 Mueller 矩阵测量仪器及相关水体颗粒偏振散射特性的测量分析工作,测量仪器的角度范围和偏振测量能力进一步得到提升。

理论上,每个 Mueller 矩阵参数的测量都需要涵盖  $0^\circ \sim 180^\circ$  的范围,才能为水体辐射传输计算提供全面的广场信息,因此一个 Mueller 矩阵测量仪的基础是 VSF 测量仪加上偏振组件。

由于 Mueller 矩阵测量必须有至少 4 次照明光偏振的改变,所以本质上 Mueller 矩阵测量是多次测量;而光的偏振态测量,即斯托克斯向量测量则可以有多种测量方法。在历史上,斯托克斯测量和 Mueller 矩阵测量经历了多种变化,从旋转偏振片或波片的分时测量<sup>[37-38]</sup>到分波前和分振幅的同时测量<sup>[39-40]</sup>;Mueller 矩阵的计算方法从旋转角度的傅里叶变换方法到仪器矩阵方法<sup>[41-42]</sup>;Mueller 矩阵的校准方法从仪器模型的多参数校准到特征值校准<sup>[43-44]</sup>。偏振测量以及 Mueller 矩阵测量、计算、校准方法的选择,取决于样品类型和测量目的。近年来,国内科学家也在偏振测量方面贡献了很多,包括偏振校准、快速测量等<sup>[45-46]</sup>。

为简明描述,本文将国际相关仪器/系统汇总了一个表格,具体参见表 1。徐聪辉和李彩<sup>[47]</sup>对此也从不同角度进行了一个很好的综述和梳理。

海洋 VSF 测量仪器自 20 世纪 50 年代开始发展至今已有 60 多年的历史,但技术成熟度依然较低,集中体现在后向大角度不足、缺少偏振信息等;光的偏振态测量分析技术已经非常成熟,但如何应用到水下污染环境、光学窗口水压下的偏振态变化检测等,都对偏振光的原位测量提出了新的挑战。

#### 3.1 商业化 VSF/Mueller 矩阵测量仪

目前还没有商业化的完整的 Mueller 矩阵参数测量仪。除个别仪器外,商业化的 VSF 测量仪普遍还不具备偏振探测能力。商业化的 VSF 测量仪器目前主要有三类:

1) 多波长、单个或几个固定角度设计。如美国 Hobilabs 公司的 HydroScat-6(6 波长,  $140^\circ$  固定角

表 1 国内外海洋光学领域主要 VSF 和 Mueller 矩阵测量系统一览表

Table 1 Main VSF and Mueller matrix measurement systems in field of marine optics at home and abroad

Serial number	Designer or manufacturer	Year	System or instrument	Application (Lab/ <i>in-situ</i> )	Angle range /( $^{\circ}$ )	Angular resolution /( $^{\circ}$ )
1	Tyler <i>et al.</i>	1958	Nephelometer	Lab	10–165	
2	Beardsley <i>et al.</i>	1968	Modified Brice-Phoenix light-scattering photometer/1 <sup>st</sup> Mueller Matrix of Sea Water	Lab	20–130	10
3	Petzold	1972	VSF	Lab	0, 1–10, 10–170	
4	Kullenberg <i>et al.</i>	1978	VSF	Lab/on-ship	8–160	1
5	Thompson <i>et al.</i>	1980	Photopolarimeter/1 <sup>st</sup> Mueller Matrix	Lab/on-ship	5–170	
6	Wyatt (America)	1993	DOWN-EOS	Lab	22.5–147	
7	Volten <i>et al.</i>	1998	VSF	Lab	20–160	
8	Lee & Lewis	2003	MVSM	<i>In-situ</i>	0.6–177.3	0.3
9	Li <i>et al.</i>	2005	VSF	<i>In-situ</i>	20–160	
10	Shao <i>et al.</i>	2006	VSF	Lab	0.5–179.5	0.5
11	Lotsberg <i>et al.</i>	2007	VSF	Lab	3–171	1
12	Stabo-Eeg <i>et al.</i>	2008	MME	Lab	16–160	
13	Zugger <i>et al.</i>	2008	VSF	Lab	1–170	
14	Sequoia (America)	2013	LISST-VSF	Lab/ <i>in-situ</i>	0.1–150	1
15	Wetlabs (America)	2009	MASCOT	Lab/ <i>in-situ</i>	10–170	10
16	Tan <i>et al.</i>	2013	I-VSF	Lab	8–172	1
17	Chami <i>et al.</i>	2014	POLVSM	Lab	1–179	1
18	Tian & Liao	2014	Polarization VSF	Lab	30–120	
19	Wang <i>et al.</i>	2018	3D VSF	Lab	18–160	
20	Guo & Tao	2020	VSFlab	Lab	2–178	1

度后向散射系数测量仪),美国 Seabird 子公司 Wetlabs 的 BB9 (9 波长,117°固定角度)、ECO-VSF (3 波长、100°/125°/150° 固定角度)等。

2) 部分角度范围、连续角度设计。如美国 Sequoia 公司的 LISST-100 (0.1°~15°)、LISST-VSF (0.1°~150°)等<sup>[21]</sup>,其具有有限的对 Mueller 矩阵元素  $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $m_{22}$  的测量能力。LISST-VSF 虽然能够进行原位测量,但有以下局限性:(1)测量角度范围有限,只能达到 150°,难以满足激光雷达 180°后向偏振散射特性研究的需要以及大角度范围偏振光散射(即 Mueller 矩阵)测量的需要;(2)具有有限的 2×2 Mueller 矩阵测量能力,无法进行全偏振信息测量,难以满足更精细的水体固有特性研究;(3)只具备单一波长(532 nm)的测量能力,无法满足海洋遥感对不同波长的研究需求。

3) 较大角度范围、多个固定角度设计。如美国 Wyatt 公司的只能在实验室内以 Bench-top 形式使用的 DOWN-EOS (18 个角度,22.5°~147°角度间隔可设)<sup>[48]</sup>、美国 Wetlabs 公司的可进行水下原位有限深度(≤50 m)测量的 MASCOT (18 个角度,

10°~170°,间隔 10°)等<sup>[30]</sup>。

上述商业化仪器中,除了 LISST-VSF 外都不具备偏振测量能力,主被动光学遥感探测中非常关键的大角度后向散射角度的测量也受到很大的限制,而水体不同浮游植物等颗粒物的 170°~180°后向散射相函数数值相差 10 倍<sup>[33]</sup>,如图 2 所示。

### 3.2 研究类 VSF/Mueller 矩阵测量仪

研究类 VSF 与 Mueller 矩阵测量仪的发展,受水色遥感、激光雷达光学遥感、水下偏振成像等需求的推动,自 2000 年后得到较大的发展,许多研究人员研制了多种可在实验室内测量最大后向散射接近 180°的 VSF (部分带偏振)的测量仪器,以 VSF 测量仪居多。

针对水体 VSF/Mueller 矩阵的测量研究最早由 Tyler 等<sup>[49]</sup>开始,其设计的广角散射仪基于旋转探测器的原理,覆盖了 10°~165°的角度范围并且经标定后用于自然水体 VSF 的定量测量。Beardsley<sup>[14]</sup>研制了一套用于实验室的基于旋转探测器原理的一阶 Mueller 矩阵测量仪,覆盖 20°~130°的测量范围。Petzold<sup>[13]</sup>研制了 0.1°~10°的前

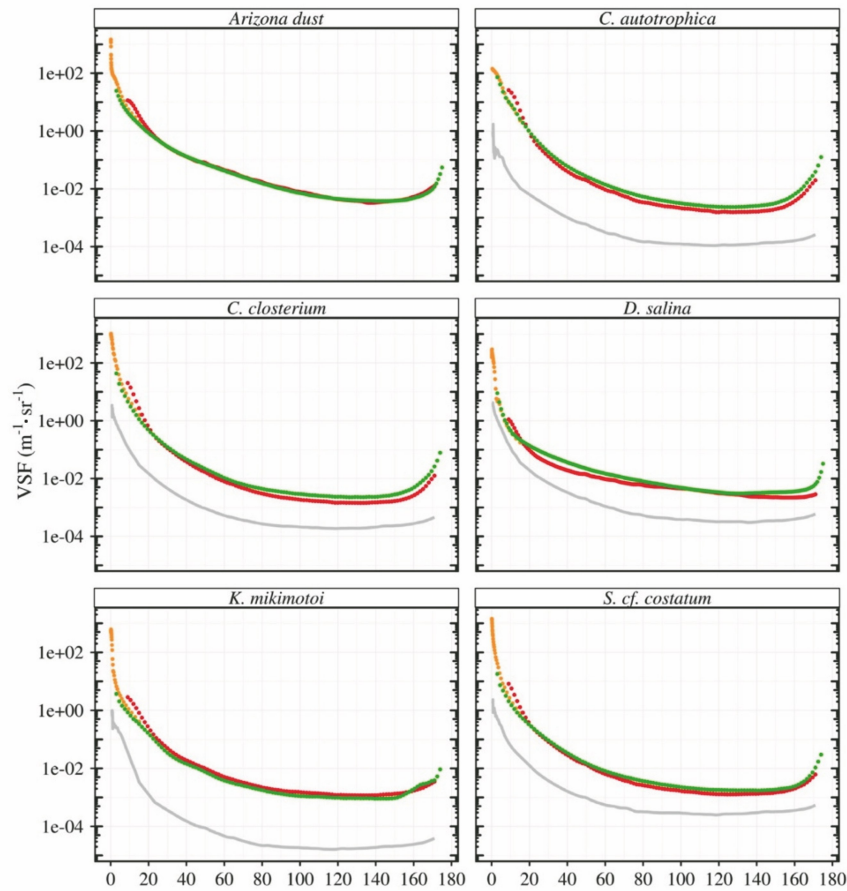


图 2 使用 I-VSF、LISST-VSF 与 POLVSM 测量 6 种样品(样品包括 1 种矿物粉尘与 5 种不同的藻类)的 VSF<sup>[33]</sup>  
 Fig. 2 VSF measured by I-VSF, LISST-VSF, and POLVSM for six samples [the one mineral-like sample (Arizona dust) and the five different algal samples]<sup>[33]</sup>

向小角度 VSF 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 VSF 测量仪样机,利用两种测量方式将测量角度扩大。利用上述样机首次对前向小角度和后向不同角度的水体 VSF 进行测量,其 VSF 测量结果(图 3)一直作为经典的海洋光学基本数据。

Kullenberg<sup>[50]</sup>设计了一款探测器旋转式体散射测量仪(工作波长为 520 nm、650 nm),测量角度范围为  $8^{\circ}\sim 160^{\circ}$ ,角度分辨率为  $1^{\circ}$ ,固定视场角为  $1^{\circ}$ 。Kullenberg 通过实验测试发现,探测器水下转动的角度误差对 VSF 的测量带来较大的影响,其中  $60^{\circ}\sim 100^{\circ}$  VSF 测量的最大误差可达到 25%,而  $90^{\circ}\sim 100^{\circ}$  VSF 测量的最大误差达到 40%, $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$  和  $110^{\circ}\sim 130^{\circ}$  VSF 测量的误差达到 15%。Thompson 等<sup>[51]</sup>研制了一套覆盖  $5^{\circ}\sim 170^{\circ}$  测量角度范围的一阶 Mueller 矩阵测量仪。Volten 等<sup>[52]</sup>研制了一套用于实验室的一阶 Mueller 矩阵测量仪,覆盖  $20^{\circ}\sim 160^{\circ}$  测量角度。Lotsberg 等<sup>[53]</sup>建立了一套体散射测量仪,该装置设置两个同心容器,通过在

外容器中充满与玻璃器皿折射率相近的甘油来减少入射光在内容器壁反射后在后向散射探测中引入的误差,实现了角分辨率为  $1^{\circ}$ 、角度范围为  $3^{\circ}\sim 171^{\circ}$  的测量,同时利用滤光片实现多波长(442, 490, 550, 670 nm)测量。Stabo-Eeg 等<sup>[54]</sup>建立了一套基于旋转探测器式的测量系统(MME),该系统的角度探测范围为  $16^{\circ}\sim 160^{\circ}$ ,且具有两个波长(473 nm 和 532 nm)的探测能力。Zugger 等<sup>[55]</sup>设计了一款测量波长为 532 nm、测量角度范围为  $1^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 、角度分辨率为  $1^{\circ}$  的体散射函数测量仪,其中设置了光阱以减小透射光对后向散射探测造成的影响。

新的研究类 VSF 与 Mueller 测量仪的设计思想基本上可归纳为以下 3 类:

1) 大角度范围多个固定散射角度设计<sup>[29-31]</sup>。这类仪器的特点是较易实现原位测量,但主要缺点是光源与探测器都是布置于围绕样品中心的一个平面内,因遮挡、杂光等问题,前向小角度( $<10^{\circ}$ )、后向大角度( $>170^{\circ}$ )的测量几乎无法实现。

2) 入射平面与测量平面分离的潜望式旋转棱



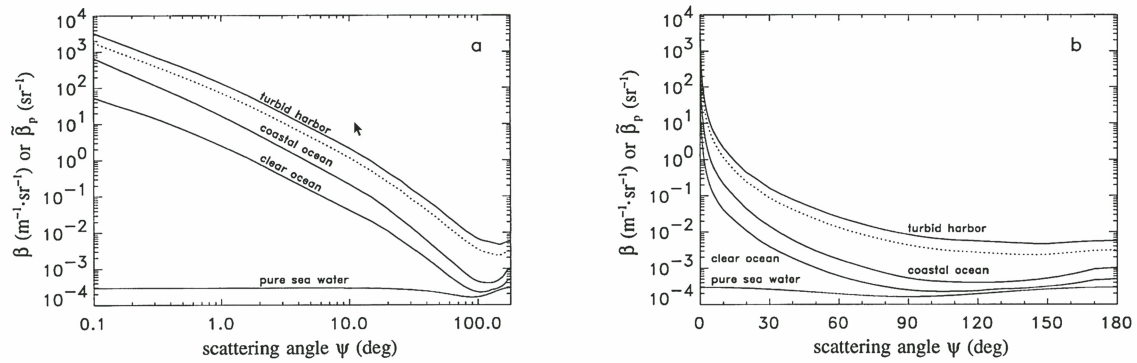


图 3 Petzold 实测体散射函数与散射相函数(实线为 4 种不同水体的体散射函数,从上到下分别为浑浊海港区、沿岸海水、清洁海水、纯海水;虚线为颗粒物散射相函数)<sup>[10]</sup>

Fig. 3 Volume scattering function and scattering phase function measured by Petzold (solid line is the volume scattering function of four different water bodies, i. e., turbid harbor, coastal ocean, clean ocean, and pure sea water, and dotted line is the particle scattering phase function)<sup>[10]</sup>

镜设计。为求最大的角度范围并减小前向/后向杂光的影响,自 Lee 和 Lewis<sup>[28]</sup> 提出多波长体散射测量仪(MVSM)之后,诸多新仪器的设计思想采用了入射平面与测量平面分离的旋转棱镜潜望式结构<sup>[32,36]</sup>,其核心思想是将强烈的前向散射光反射出去、拓展小角度和大角度的探测能力;这类仪器目前主要在实验室内以 Bench-top 形式进行测量分析。

3) 散射光二次曲面反射式设计。为提高角度分辨率并实现近 180°后向大角度的测量,研究人员基于二次曲面形式的反射镜收集大角度范围的散射光,如 Shao 等<sup>[56]</sup> 提出了一种新颖的 VSF 测量仪,不同于旋转式测量原理,通过椭圆反射镜将散射光进行二次反射并通过旋转通光孔径来收集每个角度的散射光,实现了 0.5°~179.5°角度范围的探测;Tan 等<sup>[57]</sup> 设计了基于双反射原理并利用 CCD 成像探测的 VSF 测量仪,实现了 8°~172°角度范围、分辨率为 1°的广角测量。Lotsberg 等<sup>[53-54]</sup> 基本上都实现了大角度范围,但在原位测量时这些装置虽然实现了大角度测量,但是在原位测量时,设置大面积的反射镜结构件暴露于水中,会引进大量杂散光,从而影响测量精度,因此这些装置并不适用于原位测量。

上述后两类仪器也同时实现了连续角度观测,这对于多样化水体颗粒物的体散射特性研究、理论模型与实测数据对比等有很大的帮助。

人们测量水体偏振性质的方法随着对水体光学性质的认识而发展。在早期,一般认为水体是均匀的、稳定不变的,所以大多测量方法采用分时测量方式<sup>[9,32,52,58]</sup>。但是,构成水体光散射信号主要来源的颗粒物处于悬浮、瞬变状态,所以水体是动态的。只有偏振测量速度大于水体偏振性质变化的速度,

才能有效减小偏振测量误差<sup>[59]</sup>。考虑到 Mueller 矩阵测量是多次测量,研究者们采用了多种方法,如提高起偏切换的速度<sup>[42,60-61]</sup>、采用偏振同步测量提高检偏的速度<sup>[60-63]</sup>。综合来说,发展快速偏振测量方法是水体偏振测量的必然趋势。

2000 年之后,VSF 测量仪的典型代表是 Lee 和 Lewis<sup>[28]</sup> 基于旋转探测器研制的多光谱 VSF 测量仪(MVSM),通过旋转棱镜的方式将测量角度范围增大至 0.6°~177°、分辨率提升至 0.3°,实现了水下原位测量,同时可以实现多波长(443,490,510,532,555,565,590,620 nm) VSF 函数的测量;在此原理基础上,Chami 等<sup>[32]</sup> 构建了一套更加新颖的偏振体散射测量仪(POLVSM),POLVSM 基于双潜望镜光学系统,其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了 1°~179°。通过更换激光器的方式实现了 440,532,660 nm 三个波长的测量,通过设计起偏与检偏模块,实现了 3×3 Mueller 矩阵测量。

我国自然资源部第二海洋研究所的陶邦一团队研制了一套基于旋转探测器与潜望镜式测量原理的 VSF 实验室测量样机(VSFlab)<sup>[36]</sup>,并设计了新的出射棱镜以减少透射光在后向散射中引入的杂散光,实现了 2°~178°角度范围内的 VSF 测量,并与 LISST-VSF 进行了对比,获得了较好的对比结果。多数装置虽然实现了大角度范围的测量,但并不具备 4×4 Mueller 矩阵测量的能力,并且旋转探测器的测量方式限制了这些装置原位测量的可能。

中国科学院南海海洋研究所曹文熙团队建立了一套 8 个固定角度的水下 VSF 测量仪,角度测量范

围为 $20^{\circ}\sim 160^{\circ}$ <sup>[29,31]</sup>;华中科技大学杨克诚、夏珉团队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,实现了水体中粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 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 $1^{\circ}$ <sup>[64-65]</sup>。清华大学马辉、廖然团队同样利用成像方式开展了颗粒的二维体散射高效测量,同时实现了 $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 范围的偏振体散射测量<sup>[66-67]</sup>。

### 3.3 仪器标定与数据处理方法

任何一台VSF/Mueller测量仪器的研制都伴随着仪器的标定与数据处理方法。对于VSF的标定就是将探测到的光信号量纲(通常为V)转化为VSF量纲( $\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ),所以标定方法研究也是仪器研制的一部分工作。

在VSF和Mueller测量仪的仪器标定和测量规范方面,通常标定方法分为两个步骤<sup>[32-33,58,68]</sup>:

1) 测量纯水或纯海水的散射信号。一般都是采用超纯水(Milli-Q)或 $0.2\ \mu\text{m}$ 孔径滤膜后的海水,这样一方面可去除纯水对散射信号的贡献,另一方面是检验仪器本身是否会产生不期望的杂散光<sup>[32]</sup>。由于气泡对散射信号造成较大的干扰<sup>[69]</sup>,在测量纯水之前一般需要进行除气泡处理。

2) 利用标准颗粒确定标定系数。标准颗粒是一种中心粒径、粒径谱、折射指数已知的颗粒,因此它的Mie散射结果也是一定的。在这些仪器标定过程中,标准颗粒的实际粒径与标称值的微小差异,如 $2\ \mu\text{m}$ 颗粒的 $0.02\ \mu\text{m}$ 差异,也是Mie散射计算与仪器数据在4个非0元素比对中需考虑的问题<sup>[58]</sup>。一般选用具有较为平缓的Mie散射结果的标准颗粒(如 $0.2\ \mu\text{m}$ )来制作标定系数<sup>[70]</sup>,然后利用具有角度特征明显的标准颗粒(如 $2\ \mu\text{m}$ 和 $3\ \mu\text{m}$ )进行角度标定。最后利用其他粒径的标准颗粒进行验证。

而针对Mueller矩阵的标定与VSF的标定方法类似,因为通常在标定时会利用Mueller矩阵的其他项(除了 $m_{11}$ )对 $m_{11}$ 进行归一化<sup>[9,52,71]</sup>,只要对 $m_{11}$ 进行标定即可,在对 $m_{11}$ 标定前先进行散射系数归一化处理,得到散射相函数,而VSF对散射系数归一化后得到的也是散射相函数。目前原位测量仪器最多实现 $2\times 2$  Mueller矩阵的测量,实验室样机最多实现 $3\times 3$  Mueller矩阵的测量,还未有 $4\times 4$  Mueller矩阵测量仪,更高维度的Mueller矩阵测量意味着更复杂的校正处理方法。

在实验室水体颗粒物的测量中,利用显微镜对

实验室培养藻或水样藻的活性进行检视也是必备步骤。目前,利用非光学手段(如库尔特计数器等)对水体样品的颗粒物粒子谱分布(PSD)进行分析,也是基本的实验/试验配套手段。

在Mueller矩阵测量仪数据的分析处理方面,Svensen等<sup>[58]</sup>采用了Cloude<sup>[72]</sup>针对Mueller矩阵参量所提出的系统化方法,对仪器和测量数据的噪声水平、矩阵参数合理性,以及强噪声信号滤波等进行了分析。

在全角度( $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ )VSF重构方面,受光学工程限制,VSF测量仪很难进行小角度散射测量,特别是小角度范围后向散射测量,即使可进行后向小角度测量,测量可靠性往往不高。比如,MVSM可测量的VSF最大角度为 $179^{\circ}$ ,但实验室定标和现场测量均发现大于 $173^{\circ}$ 的VSF数据具有明显异常<sup>[69,73]</sup>。同样地,商业化LISST-VSF可测量的VSF最大角度为 $155^{\circ}$ ,但由于镜面后向散射光的影响,大于 $147^{\circ}$ 的VSF测量数据明显高于理论值<sup>[70]</sup>。在激光雷达海色遥感应用中,需要后向 $180^{\circ}$ 散射的VSF,即 $\beta(\pi)$ 。因此,需要根据VSF测量仪测量的有限角度 $\beta(\theta_1\sim\theta_2)$ 扩展到全角度,即 $\beta(0^{\circ}\sim 180^{\circ})$ 。

Churnside<sup>[22]</sup>计算海水激光雷达比时,把利用MASCOT测量的全球 $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 范围内间隔 $10^{\circ}$ 的VSF数据<sup>[30]</sup>线性外插至 $180^{\circ}$ ,计算了颗粒物后向散射系数 $b_{\text{bp}}$ 与 $\beta$ 关系的拟合系数 $\chi(\pi)$ 。线性外插的 $\chi(\pi)$ 随后被应用到星载激光雷达CALIOP数据,用于估算全球海洋碳含量<sup>[74]</sup>和海水后向散射系数<sup>[75]</sup>。但实际上VSF并不是随角度线性变化的,特别是在前向和后向小角度散射时<sup>[32-33]</sup>。

Zhang等<sup>[76]</sup>提出一种基于散射理论的VSF重构方法,即基于散射理论和VSF仪测量有限角度的可靠VSF重构全角度( $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ )VSF。该方法的基本思想为:海洋粒子可分为上百个粒子亚群,每个粒子亚群有唯一的散射相函数,由散射相函数组成相函数库,测量的VSF则是相函数库中若干个粒子亚群的VSF之和。该方法的具体做法为:1) 假设海洋粒子为均质球形粒子;2) 基于Mie理论计算 $0.01\sim 200\ \mu\text{m}$ 单个粒子的相函数;3) 根据粒子的直径和折射率把粒子分为191个粒子亚群且每个粒子亚群服从log-normal分布;4) 计算每个粒子亚群的相函数并构建相函数库;5) 利用VSM现场测量的VSF数据、采用最小二乘法求解粒子散射系数,进而结合相函数库重构 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 全角度VSF。该方法不仅可重构全角度VSF,还可以反演海洋颗粒物



粒子浓度、粒径分布和折射率<sup>[69,77]</sup>,进而获取气泡和沉积物浓度<sup>[78-79]</sup>、有机/无机物浓度和叶绿素浓度<sup>[80-81]</sup>等。

## 4 水体颗粒物体散射与偏振特性测量分析与应用现状

海洋水体颗粒物的粒径、形状、组分、内部结构等宏观光学特性,具有重要而广泛的科学和应用价值。数十年来,人们研究了许多方法对此进行分类、溯源,预测其发展变化等,其中体散射函数 VSF 和 Mueller 矩阵参数仪器是有效的研究工具之一。

Kokhanovsky<sup>[82]</sup>对海洋与大气光学中的偏振问题进行了系统性梳理。Harmel 等<sup>[33]</sup>对利用偏振光进行空间海洋遥感的最新发展进行了很好的综述。Stramski 等<sup>[83]</sup>对海洋中水分子、溶解有机质、病毒、细菌、有机碎屑、浮游植物、浮游动物、无机颗粒、气泡等(1 nm~1 cm 级)的颗粒物进行了谱系化的全面总结。

### 4.1 颗粒物偏振特性研究

海洋粒子光偏振特性研究主要集中在对海水或浮游植物的 Mueller 矩阵参数测量,利用 Mueller 矩阵参数反演海洋粒子属性的研究相对较少。Beardsley<sup>[14]</sup>首先测量了海水的光偏振特性,并发现测量的 Mueller 矩阵参数沿对角线对称。理论上,朝向随机对称粒子的 Mueller 散射矩阵可简化为 6 个独立变量<sup>[84]</sup>。Voss 和 Fry<sup>[9]</sup>测量了大洋水体的 Mueller 散射矩阵参数,发现在测量误差范围内  $S_{43} = -S_{34} = 0, S_{33} = S_{44} (S_{ij} = m_{ij}/m_{11})$ 。随后, Fry 和 Voss<sup>[85]</sup>测量了 4 种浮游植物的 Mueller 矩阵参数,发现参数  $S_{22}$  明显小于 1,这表明浮游植物是非球形粒子(球形粒子  $S_{22} = 1$ ),并发现不同浮游植物的  $S_{33}$  和  $S_{44}$  参数不同。Quinby-Hunt 等<sup>[86]</sup>测量了小球藻的 Mueller 矩阵参数并与 Mie 理论计算结果进行比较,发现拟合多个 Mueller 矩阵参数比只拟合  $m_{11}$  一个参数能大大缩小粒子的可能范围,提高粒子反演准确性。Witkowski 等<sup>[87]</sup>测量 4 种单细胞浮游植物 Mueller 矩阵参数,并通过物理和化学方法改变其内部结构,重新进行测量,发现 4 种浮游植物 Mueller 矩阵的大部分参数不同并且改变内部结构后 Mueller 矩阵参数也会改变。Volten 等<sup>[52]</sup>测量了 15 种浮游植物和 2 种矿物粒子的 Mueller 矩阵参数  $S_{12}$ ,发现浮游植物之间以及浮游植物与矿物粒子之间的  $S_{12}$  参数数值均不同。Svensen 等<sup>[58]</sup>测量了 11 种浮游植物的 Mueller 矩

阵参数,发现不同浮游植物的  $S_{12}$  和  $S_{33}$  偏振参数明显不同。Chami 等<sup>[32]</sup>利用最新研制的 POLVSM 测量了拟菱形藻(浮游植物)和亚利桑那粉尘(矿物粒子)的 Mueller 矩阵参数,同样发现两者的  $S_{12}$  参数数值均明显不同。

Oishi<sup>[88]</sup>利用 Petzold<sup>[13]</sup>实测的三组 VSF 和 Mie 理论模拟计算了不同颗粒的 VSF,结果发现不同水体 120° 角度处的颗粒物体散射系数  $\beta(120^\circ)$  与颗粒物后向散射系数  $b_{bp}$  的相关性最大且关系稳定,因此可制作单个固定角度的散射测量仪,以实现水体后向散射系数的测量,由此可大大简化和推动水体后向散射系数的测量工作,其与吸收与衰减测量仪(Wetlabs ac-9)一起,开启了符合水色遥感半分析模型需要的海洋光学参数的测量工作。随后, Maffione 和 Dana<sup>[89]</sup>在此基础上设计制造了商业化后向散射测量仪中极为成功的 Hydrosat-6 (Hobilabs 公司),并根据实测数据和理论模拟分析的结果将后向散射探测的中心角度定在 140°。2000 年后, Lee 和 Lewis<sup>[28]</sup>设计的 VSM 和 Sullivan 和 Twardowski<sup>[30]</sup>设计的 MASCOT 可获得更大角度范围、更加准确和更多不同海域水体的体散射函数测量数据,人们在 2010 年前后又重新开始审视  $\chi$ -factor 的精度与有效性<sup>[46]</sup>。该工作肯定了 120° 及其附近角度散射与总后向散射系数的关系,同时也指出该角度散射主要与颗粒物的总量有关,而对颗粒物的组分、粒径谱等特性不敏感,这不利于对海洋颗粒物类型的精细化探测和反演。

Wang 等<sup>[63]</sup>研制了悬浮颗粒物偏振光散射装置,测量了单个悬浮海藻的偏振光散射斯托克斯向量,发现某些偏振参数(斯托克斯向量元的组合)可以用于区分海水中海藻、泥沙和微塑料等,并且某些偏振参数能表征海藻内部结构变化<sup>[90]</sup>。此外, Ma 等<sup>[91-93]</sup>利用 Mueller 显微镜测量了海藻的 Mueller 矩阵显微图像,发现偏振 Mueller 矩阵图像可明显改善海藻的识别和分类能力。对蓝藻气囊的静水压和超声处理实验发现,偏振参数可以很好地表征蓝藻细胞内气囊的消-生过程<sup>[94-95]</sup>。这些研究成果显示了偏振光技术在海洋颗粒物识别和分类上的潜力<sup>[96]</sup>。

基于新的 VSF 测量仪器,近些年很多学者开展了一些海洋颗粒的粒径、折射率、组分(有机、无机)、形状等特性的基础应用研究。

Zhang 等<sup>[76]</sup>系统总结了海洋颗粒物粒径、组分(有机/无机)、复折射指数、形状与结构(球形、非球形、均质与多层细胞)等的历史结果,利用 VSM 仪

器<sup>[28]</sup>和 ac-9 仪器在 LEO-15 实验中获得 385 组 VSF 数据,并利用多种粒子亚群(图 4)构建了用于 VSF 积分反演的核函数,由此可从所测量的 VSF 中反演得到粒子的生物光学特征参数(小颗粒/有机/无机/气泡等多种粒子及其粒径谱、复折射指数等),后续其他 VSF 测量仪(如 LISST-VSF 等)得到的多个实验结果对该方法进行了检验<sup>[34,69,97-98]</sup>。其所采用的颗粒物 Mie 散射模型(球形、均质、变化的粒径谱与复折射指数)与实测结果,特别是总散射  $b_p$  或前向散射的结果很好地吻合。

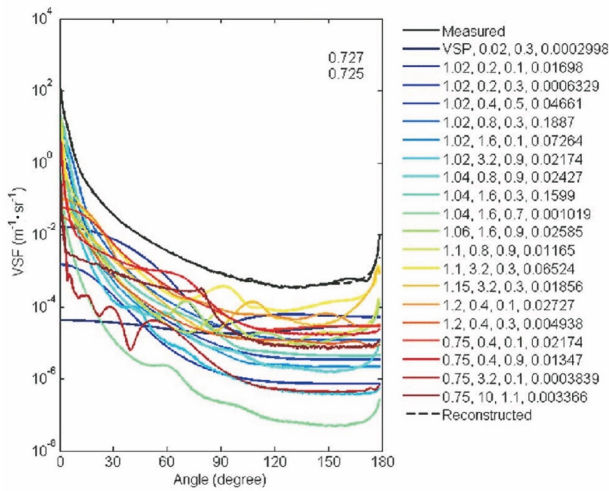


图 4 不同粒子亚群的 VSF 实测数据<sup>[76]</sup>

Fig. 4 Measured VSFs of different particle subpopulations<sup>[76]</sup>

Slade 等<sup>[21]</sup>使用 LISST-VSF 仪器在实验室中测量了散射角范围为  $0.1^\circ \sim 150^\circ$  的不规则淤泥和沙粒的 VSF,以及散射角范围为  $15^\circ \sim 150^\circ$  的退偏比。观测结果与 Mie 散射理论一致,即大颗粒前向散射更强。与 Petzold 的 VSF 相比,测得的结果在中间段角度( $40^\circ \sim 100^\circ$ )也有很大的提升。由于粒子的形状和组成对偏振有很大的影响,实验测得的线偏振度与理论预测结果有显著差异。

Koestner 等<sup>[97]</sup>利用 LISST-VSF 测量的标量 VSF 对同一个水样的三种粒级过滤样品的后向散射比例进行研究,表明了  $< 5 \mu\text{m}$  的小颗粒对后向散射有  $50\% \sim 80\%$  的贡献,且仅有后向散射比例信息对于区分颗粒物的组分和结构是不充分的。因此, Koestner 等<sup>[62,98]</sup>又利用 Mueller 矩阵元素的多角度偏振信息与颗粒物的粒径谱、组分的关系进行了较为深入的研究:1)在分析样品之前,他们针对 LISST-VSF 仪器系统偏振测量的特点,利用 VSF 相对平缓的小粒径标准颗粒( $100, 200, 400 \text{ nm}$ ),获

得了新的系统校准函数(因为  $\mu\text{m}$  级大粒径标准颗粒的 VSF 随角度的变化过于剧烈,不适用于仪器标定),提出了针对该仪器校正和测量的新规程(protocols),并利用独立的仪器(Wyatt 公司的 DOWN-EOS)进行了测量检验,所得结果对此类研究具有很好的指导意义;2)在 Mueller 矩阵测量数据处理方面,为使测量数据更加可靠,对其定标数据测量 128 次,对样品在全角度范围内重复测量 200~400 次,对于每个角度上的数值,先剔除粗大误差值后求平均,再对平均值曲线进行  $3^\circ, 3^\circ, 5^\circ$  滑动窗口滤波;3) Mueller 矩阵中的  $m_{11}, m_{12}$  和  $m_{22}$  参数可以很好地利用最大线偏振、后向散射的比例关系,将不同水样中的有机碳与总悬浮物的比例(POC/SPM)区分为明显的 3 类,尤其是利用  $20^\circ, 100^\circ$  角度  $m_{22}$  的比例,建立了比例与一系列水体组分特性的关系,包括 POC/SPM、浮游生物颗粒与总颗粒物吸收系数  $a_{\text{ph}}(440)/a_p(440)$  比例、叶绿素 a 与总悬浮物比例 Chl-a/SPM 等,并进一步指出利用偏振特性开展颗粒物组分与粒子谱特性探测的应用潜力,这个结果对未来海洋多角度偏振遥感器的参数设计提供了基础性理论依据。

上述观测研究表明,海洋粒子的粒径、组分和形状结构不仅改变粒子光散射强度,而且改变其偏振参数,即改变 Mueller 矩阵参数,特别是海洋粒子形状对 Mueller 矩阵参数较为敏感。2022 年美国 NASA 即将发射 PACE 卫星,其上携带两台偏振载荷,可进行大气和海洋的偏振测量,这为海洋粒子的偏振研究提出更高的要求。

#### 4.2 丢失散射谜题

在颗粒物散射理论与测量数据的自洽方面,“丢失散射谜题”是多年困扰海洋光学和水色遥感的重大基础性问题之一。该问题的一般表述是,在海洋水体测量或浮游植物光学特性测量与理论模型分析对比中,总是出现二者的颗粒物的总散射系数  $b_p$  (或光束衰减系数  $c_p$ ) 吻合则后向散射系数  $b_{\text{bp}}$  不吻合的现象;反过来,出现二者的  $b_{\text{bp}}$  吻合了则前向散射占主导作用的  $b_p$  或  $c_p$  又有很大的差异的现象。

在海洋生物光学模型研究领域,假设海洋悬浮颗粒为均质球体,利用 Mie 理论计算其参数是较为传统的做法<sup>[99-101]</sup>;该方法的前向散射模拟结果较好,但后向散射结果被严重低估,这导致实际观测值与理论值不匹配的“丢失散射谜题”<sup>[83]</sup>。早在 20 世纪 70 年代,许多学者就尝试采用多层细胞模型展开相关研究<sup>[86,102]</sup>,发现颗粒形状和结构特征会影响后



向散射,猜想细胞内部存在折射率的变化<sup>[103]</sup>。但受限于当时的技术水平和检验条件,“丢失散射谜题”未引起广泛关注。

以前人们普遍设想的是,该问题是由测量分析中忽略了的水体中大量 $<0.2\ \mu\text{m}$ 的有机和无机小颗粒物散射所导致,Organelli等<sup>[104]</sup>给出了比较可信的结论,并发表在*Nature Communication*上。该研究利用多个AMT(Atlantic Meridional Transection)航次的 $c_p$ 与 $b_{bp}$ 测量仪器和粒径谱仪(Coulter Counter MS3),对粒级过滤样品进行实验分析,并分别采用均质细胞模型Mie散射和双层细胞模型进行理论计算对比。其结论是:“丢失散射谜题”主要是由原来普遍采用的过于简化的“均质球形细胞”假设所致,建议采用结构更加复杂的细胞结构模型进行理论计算; $<0.2\ \mu\text{m}$ 粒径颗粒物散射在大洋水体中,可以忽略不计。其研究表明,当折射率为1.06时,同质均匀球体模型可精确再现 $c_p$ ,但 $b_{bp}$ 会严重偏低;当折射率增大到1.11、模型的后向散射系数与观测值相匹配时,其 $c_p$ 偏差增加了约10倍。而采用球层厚度与分层折射率组合的多层细胞模型可有效解决后向散射与光束衰减(总吸收与总散射)无法同时吻合的问题,为解决“丢失散射谜题”提供了新思路。

该研究还将双层模型Mie散射模拟计算的Mueller矩阵参数与Voss和Fry<sup>[9]</sup>得到的全球大洋实测Mueller结果进行了比对,进一步验证了其所设定的薄外壳高相对折射指数、细胞内部低折射指数的双层细胞模型的正确性;同时,该研究的结果还从理论上进一步明确了 $b_{bp}$ 较以前向散射为主要贡献的 $c_p$ 或 $b_p$ 对藻类颗粒物组分与结构更加敏感的结论,为后续光学遥感利用后向散射对藻类进行分类等提供了坚实的理论支持。遗憾的是,该研究没有同步进行水样的大角度范围VSF和偏振Mueller参数的分析测量工作。

### 4.3 被动水色遥感应应用

在被动水色遥感的应用方面,Zaneveld<sup>[105]</sup>提出了一个需要水体光场散射角度分布信息的分析模型,但当时有限的VSF测量,使得该模型没有得到很好的应用。Lee等<sup>[106]</sup>提出了对离水辐亮度进行角度修正的基于固有光学量的分析反演算法,并利用多角度辐射测量系统NuRADS及其偏振版POLRADS<sup>[107-108]</sup>对模型结果进行了验证。

随着2000年后不断增加的VSF测量,尤其是基于Lee和Lewis<sup>[28]</sup>提出的多波长体散射仪

(MVSM)、LISST-VSF、MASCOT等的测量数据,Twardowski和Tonizzo<sup>[3]</sup>在Zaneveld<sup>[105]</sup>工作的基础上,面向NASA新一代空间对地观测卫星计划之一——PACE(Plankton Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem)<sup>[109]</sup>,提出了结合VSF参数的ZTT(Zaneveld-Twardowski-Tonizzo)分析反演模型,使得水色反演分析模型的精度得到了很大的提高,作者认为ZTT模型的反演精度与全辐射传输方程求解的精度相当,模型误差仅受限于建立模型的配套数据集质量,而不是模型本身。

Boss等<sup>[110]</sup>利用LEO-15实验,采用4种不同设计思想和定标方法的散射仪器,包括Hobilabs公司的6波段后向散射计HydroScat-6(HS-6)、Wetlabs公司的吸收与衰减仪ac-9和3个固定角度的后向散射计Eco-VSF、当时最先进的接近全角度范围( $0.6^\circ\sim 177.3^\circ$ )体散射函数测量仪VSM(Lee和Lewis仪器<sup>[28]</sup>),获得了不同测量手段之间吻合度很好(仅有 $\pm 0.003$ 差异)的水体颗粒物后向散射比例,并将其应用于颗粒物组分和分布分析。该研究发现,后向散射比例可以作为区分不同组分水体的参数,并用于判断水团是以浮游生物还是无机颗粒物为主,该研究建立了后向散射比例与水体颗粒物宏观或体积组分粒子谱、等效折射指数等之间的关系。但在粒径谱分布、基于均质浮游植物细胞模型的水体颗粒物等效折射指数反演方面,该研究还存在一些不足。

Chami等<sup>[111]</sup>利用Lee和Lewis<sup>[28]</sup>设计的VSF仪器,在黑海近海开展了多波长(443,490,555 nm)且涵盖 $0.6^\circ\sim 177.3^\circ$ 大角度范围的VSF测量,并配合开展了固定角度散射( $140^\circ$ )、水体光谱吸收系数、水体叶绿素等成分浓度的分析,对不同水体的VSF差异、不同波长VSF之间的差异、不同观测角度的散射差异等进行了较为系统的分析,并利用Mie理论进行了计算,理论结果与实验结果一致。得到的重要结论为:1) VSF形状对颗粒物的粒子谱和选择性光谱吸收非常敏感;2)不同波长的VSF有较大差异,因而采用与波长无关的VSF进行辐射传输计算和模型反演存在很大问题;3)在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 范围内的几个不同散射角度处,该海域在443 nm,555 nm两个波长的VSF的比值有较为稳定的极大、极小值,其中极大值出现在 $120^\circ$ 附近;4)水体粒子谱应是指指数衰减的Junge谱和对数正态谱(log-normal)的叠加。

Svensen等<sup>[58]</sup>利用Stabo-Eeg等<sup>[54]</sup>制作的一



台大角度范围( $16^{\circ}\sim 160^{\circ}$ )的 Mueller 矩阵测量仪(MME),对 11 种藻类的 Mueller 参数进行了测量,特意选择了在形状、细胞壁组分、大小、折射指数方面存在很大差异的藻种;测得水体 Mueller 矩阵的主要元素  $m_{11}$ 、 $m_{12}/m_{21}$ 、 $m_{33}/m_{44}$  都有很大的差异。该研究对 Mueller 矩阵测量仪的系统误差因素进行了分析,包括偏振组件(PSG、PSA)、大角度范围长时间测量序列中信号强度变化等,所得结果与 Voss 和 Fry<sup>[9]</sup>的结论一致,他们也再次明确测量过程中的最大噪声来自样品池中浮游生物在激光束附近的漂动;在数据分析处理等方面,借鉴了 Cloude<sup>[72]</sup>针对 Mueller 矩阵参量所提出的系统化分析方法,对仪器和测量数据的噪声水平、矩阵参数合理性进行了估算,并对水样中藻类的趋光性游动所产生的时间序列散射信号的强噪声进行了滤波;在利用 Mie 理论模拟计算 Mueller 参数时,他们采用了均质细胞模型,导致前向和后向散射难以同时精确再现,即出现“丢失散射谜题”。

该研究针对水样中藻细胞在激光束附近游动、进而导致仪器在旋转角度测量的时间序列信号剧烈变化(大噪声)的问题,在利用 Cloude<sup>[72]</sup>提出的针对 Mueller 矩阵的数据处理方法对数据进行滤波处理的基础上,提出了未来应采用快速 Mueller 矩阵测量系统(fast MME)的建议,参见文献[61, 86, 112]等。

Chami 等<sup>[32]</sup>利用其研制的 VSF 与 Mueller 矩阵测量仪 POLVSM(角度范围为  $1^{\circ}\sim 179^{\circ}$ ,不确定度为  $\pm 4.3\%$ ),开展了水溶胶的角度与偏振散射特性的测量分析。在精细优化和完善仪器杂光(尤其是小角度、大角度),仪器组部件的偏振响应设计和光束衰减修正,纯水与多种标准颗粒定标等工作的基础上,配合 Coulter Counter 粒子谱分析和 ac-9 等,将仪器测量的活体藻细胞和非球形气溶胶类无机颗粒的 Mueller 矩阵参数(角度偏振散射数据)与基于多层球形细胞模型和球形无机颗粒 Mie 散射计算的结果进行了比对;实验中的无机颗粒粒子谱符合指数为 3.4 的 Junge 谱,均值粒径为  $0.7\ \mu\text{m}$ ,接近一般大洋中由大气气溶胶颗粒沉降形成的无机颗粒物;培养藻类的粒子谱为接近自然水体的对数正态分布(log-normal)。该研究给出了很多有意义的结论:

1) 自然水体有机/无机颗粒物粒径的多尺度分布,导致 Mueller 矩阵参数比单一粒径颗粒物的散射相函数要平滑得多。

2) 生物体产生的颗粒(如浮游植物及其降解颗粒)在  $150^{\circ}\sim 180^{\circ}$  之间的后向散射在接近  $180^{\circ}$  方向上有快速增强,甚至达到一个数量级以上的变化,这之前人们普遍认为的大角度后向散射相对平缓、与  $120^{\circ}\sim 150^{\circ}$  之间数值接近的看法有很大不同。该研究利用非生物性颗粒和标准颗粒,排除了仪器系统在  $180^{\circ}$  附近的强烈杂光影响;这个结果之后也得到了 Harmel 等<sup>[33]</sup>及其他不同研究人员采用不同仪器分析测量的重复验证,最高达 1.5 个数量级的变化;而无机颗粒的 VSF 在  $150^{\circ}$  之后的大角度上变化相对比较平缓。

3) 利用 VSF 测量的结果,对不同颗粒物水样的后向散射比例进行了分析,其实验藻种(一种菱形藻)的后向散射比例为  $0.44\%$ ,与我国学者周雯等<sup>[113-114]</sup>利用 AC-S 和 BB9 测量仪获得的培养藻的结果相吻合。

4) 分析了不同 Mueller 矩阵元素  $m_{ij}$  随角度的变化特征及其与颗粒物的物理、生物化学特性之间的关联。如对于  $m_{12}$ (不同角度散射偏振度),在  $90^{\circ}$  处浮游植物与无机颗粒物的偏振度都达到最大化,但浮游植物颗粒的偏振度高达  $80\%$  而无机颗粒的偏振度只有  $50\%$ ,这和物理光学中散射偏振度与相对折射指数成反比的关系一致;另外,颗粒的偏振度与粒径谱有很大关系,小颗粒散射的偏振度较大颗粒大,或大颗粒的退偏比要大于小颗粒,因此最后的综合偏振响应是相对折射指数与粒径谱的共同作用。这意味着若要讨论水体对偏振信号的作用问题,独立于光学特性假设的粒子谱分布测量手段是必需的基本测量要素。

5) 颗粒形状信息在 Mueller 矩阵元素  $m_{22}$  中的体现。如果是球形粒子,其  $m_{22}/m_{11}$  一般为 1,与 1 的偏离越大,颗粒物形状的复杂度或与球形的差异越大;对于不同形状的颗粒,其  $m_{22}/m_{11}$  偏离 1 的角度也有很大的不同;实验表明,有机、无机颗粒的  $m_{22}/m_{11}$  偏离 1 的程度都达到了  $25\%$ ,但有机颗粒的  $m_{22}/m_{11}$  随角度的变化更加剧烈,而大气沉降到自然水体中的无机颗粒随角度的变化相对平缓。

6) 该研究中,无机颗粒的多个 Mueller 矩阵元素( $m_{12}$ 、 $m_{22}$ )测量值与 Mie 理论高度吻合,但藻类颗粒的差异较大,前向吻合了则后向出现较大差异,作者猜测应该采用更加复杂的多层细胞模型,即细胞壁与细胞质的相对折射指数不同,才有可能实现实测结果与 Mie 理论模型的吻合。

Harmel 等<sup>[33]</sup>为对三种不同设计思想的 VSF

测量仪器进行比对,提出一套严格的实验室水体颗粒物散射特性测量与分析规范,并对5种差异较大的培养藻、一种接近自然无机颗粒的标准颗粒 Arizona Dust 的散射相函数及其偏振特性进行了测量和分析研究。该研究表明,在跨越7个数量级的 VSF 和 Mueller 参数测量中,三种仪器的相对误差在所有的角度范围达到 10%~60% 的水平,前向散射相对差异较小而后向散射的信号微弱,导致相对误差变大,且不同仪器所测得的后向散射比例的相对误差仅为 3.5%,这是非常令人满意的结果。藻类在实验测量过程中不断游动、旋转角度方式的大角度范围的 VSF/Mueller 测量时间较长,使得藻类发生生理变化,对藻类测量的稳定性大大低于对无机颗粒的测量稳定性。因此,无机颗粒的比测,应作为不同 VSF 类散射测量仪器比较的一项重要内容;该研究用 Mie 理论很好地再现了无机颗粒的测量结果。

Poulin 等<sup>[115]</sup>在实验室中观察了浮游植物大小分布、叶绿素(Chl)、碳(C)和氮(N)含量、生物体内荧光,以及相关的光学吸收和散射特性的日变化,以帮助进行原位和空间观测。实验观察了颗粒物吸收系数( $a_p$ )、散射系数( $b_p$ )、衰减系数( $c_p$ )和后向散射系数( $b_{bp}$ )与有机碳 C 和 Chl 浓度相关的日变化。其中  $b_{bp}$  的相对变化略低于  $c_p$ ,后向散射比例  $b_{bp}/b_p$  等光学参数与 C、Chl 的变化程度并不一致,其误差来源之一是用单一角度测量所确定的后向散射系数对生物量变化不够敏感,因而建议后续应完整测量体散射函数及其昼夜变化。

#### 4.4 矢量辐射传输与偏振遥感探测方面

海洋激光雷达是获取海水垂直结构信息的最有效的技术手段之一,利用偏振激光进行水体光学性质探测时,由于水中各种颗粒物的散射特性的不同,激光雷达回波信号中包含了不同散射角和偏振态的光信号。在进行激光雷达回波信号模拟仿真时,对激光雷达探测能力和测量精度的评估,都非常依赖于水中颗粒物偏振散射特性的输入。

美国得克萨斯农工大学研究团队一直致力于基于 Monte Carlo 仿真的激光偏振特性研究。Kattawar 和 Adams<sup>[116]</sup>利用 Monte Carlo 技术实现包含随机界面的不均匀大气-海洋系统中任意位置的完整 Stokes 矢量计算,模拟了实验室制备的悬浮液的后向散射光的偏振各向异性,这为激光雷达用于海洋颗粒物探测提供了新思路<sup>[117]</sup>;之后对地中海测得的辐射度和偏振度进行模拟,证明 Monte

Carlo 方法可模拟偏振光在水下的传输过程<sup>[118]</sup>。利用 Monte Carlo 方法模拟浑浊介质中偏振激光的散射,证明非相干光散射理论可用于描述粒子在浑浊介质中的后向散射<sup>[119]</sup>。利用基于时间分辨的 Monte Carlo 技术分别模拟偏振光在混浊介质、双折射混浊介质和聚苯乙烯微球溶液中的传播,以研究入射光的偏振态和散射体的大小对偏振度传播的影响<sup>[120]</sup>,分析双折射混浊介质中后向散射光的偏振模式和偏振态的空间分布<sup>[121]</sup>,比较单次散射和多次散射后的偏振分布<sup>[122]</sup>。针对界面层上下偏振光场结构分布,对比 Monte Carlo 模拟和多分量近似方法,计算简单大气-海洋系统的有效散射 Mueller 矩阵,结果表明两种方法都可准确预测混浊介质的散射特性<sup>[123]</sup>。利用三维 Monte Carlo 仿真方法实现探测器在不均匀介质中任意位置的有效 Mueller 矩阵计算,这有助于研究不同区域之间的辐射耦合过程<sup>[124]</sup>,提出基于混合矩阵算子的 Monte Carlo 混合方法(HMOMC),用于解算三维大气-海洋系统矢量辐射传输方程<sup>[125]</sup>,对 HMOMC 方法的改进显著地提高三维大气-地-海耦合系统中求解矢量辐射传输方程的计算效率<sup>[126]</sup>。

此外,Ambirajan 等<sup>[127]</sup>为分析圆偏振光束的多次散射,开发窄偏振光束多次散射的 Monte Carlo 估计器。Krekov 等<sup>[128-129]</sup>对不同类型水体激光雷达返回信号的深度剖面 and 偏振特性进行了 Monte Carlo 模拟,证明了偏振激光雷达可用于检测不同来源水体的不均匀性。NOAA 的 Stegmann 等<sup>[130]</sup>利用优化的 Monte Carlo 矢量求解程序,模拟激光在大气-海洋耦合模型中的传播过程,研究浮游植物形态变化及其垂直分布对激光雷达衰减后向散射和退偏比的影响。国内中国海洋大学和浙江大学等单位也利用 Monte Carlo 技术对海洋激光雷达信号及其偏振特性展开了相关研究<sup>[131-133]</sup>。

另外,利用激光雷达回波信号进行水体光学性质和水体颗粒物特性反演时,根据水中激光传输过程,激光雷达探测的水体散射信号主要来自 180° 的后向散射,因此激光雷达测量的散射系数更接近  $\beta(\pi)$ <sup>[132]</sup>。目前利用激光雷达反演水体颗粒物散射系数  $b_{bp}$  的算法均依赖于  $\beta(\pi)$  与  $b_{bp}$  的关系<sup>[74,134]</sup>,该经验关系的准确性严重影响激光雷达  $b_{bp}$  的反演精度,而  $\beta(\pi)$  的数值在接近 180° 时存在较大起伏<sup>[33,76]</sup>,通过获取准确的颗粒物散射相函数能够提高激光雷达的  $b_{bp}$  反演精度。因此亟须开发 Mueller 矩阵测量仪用于获取水体颗粒物  $4 \times 4$

Mueller 矩阵参数<sup>[24]</sup>。

## 5 结束语

海洋水体颗粒物偏振光散射作为海洋光学研究的基本问题之一,还有待进一步的研究。工具决定生产力,目前国际上仅有部分 Mueller 矩阵参数、部分角度范围的 VSF 及 Mueller 矩阵测量仪,还没有包含 Mueller 矩阵完整水体偏振参数 ( $m_{11}$ 、 $m_{12}/m_{21}$ 、 $m_{22}$ 、 $m_{33}$ 、 $m_{44}$ ) 的商业化仪器系统;现有科研用的系统中存在角度范围与间隔稀疏、偏振信息不全、系统前向/后向杂光抑制不佳等缺陷;曾经提出的一些方案也由于方案本身的缺陷或可靠性、经费等问题没有被进一步地研发和应用。

为了解决这一问题,应大力鼓励水体 Mueller 矩阵测量仪的研发工作,研制具有全偏振、近  $0^\circ \sim 180^\circ$  连续大角度范围的多波长体散射函数与 Mueller 矩阵测量仪,并开展配套的仪器定标与水体 VSF & Mueller 矩阵参数分析方法、水体成分特性与 Mueller 矩阵参数的初步关联分析应用等研究,为我国和国际水体光学观测理论与技术的发展提供基础性测量与分析工具。总之,大角度甚至接近全角度范围的 VSF 与 Mueller 矩阵测量仪是非常具有基础性和重要性的海洋光学分析测量仪器,在海洋光学理论与技术发展中具有不可替代的重要价值。

在 Organelli 等<sup>[104]</sup>的基础上,利用 Mueller 矩阵测量仪,开展水样大角度范围 Mueller 矩阵测量、粒径谱测量和传统光衰减/吸收/散射等测量,利用多层细胞模型和 Mie 散射理论模型进行分析对比,向海洋光学散射理论与实测结果相一致的目标更进一步也是十分重要的工作。

Mueller 矩阵测量仪的测量过程中,各种波长、偏振状态的激光束在水体、光学元件和各种界面发生散射和折射,其光强和偏振状态受到各种因素的影响,从而发生复杂的变化。因此建立仪器仿真模拟平台能够更好地指导海洋水体散射 Mueller 矩阵测量仪的研制方案设计,实现水体散射 Mueller 矩阵的准确测量。

总的来说,未来可开展如下研究:

1) 基于 Mueller 矩阵测量仪进行海洋颗粒物识别和分类。海洋颗粒物形状对偏振较为敏感,结合其折射率,可对海洋颗粒物进行识别和分类。

2) 海洋颗粒物粒径分布高精度反演。利用 VSF 结合偏振参数可有效提高海洋颗粒物粒径分

布反演精度。

3) 基于 Mueller 矩阵参数的生物光学算法和大气校正算法的研发。偏振载荷是未来海色卫星传感器的一个发展方向,基于 Mueller 矩阵测量仪,可进一步实现基于 Mueller 矩阵参数的生物光学算法和大气校正算法研发,进而为未来偏振海色卫星传感器业务化运行提供支持。

## 参 考 文 献

- [1] Jamet C, Ibrahim A, Ahmad Z, et al. Going beyond standard ocean color observations: lidar and polarimetry[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 251-275.
- [2] Schullien J A, Behrenfeld M J, Hair J W, et al. Vertically-resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13577-13587.
- [3] Twardowski M, Tonizzo A. Ocean color analytical model explicitly dependent on the volume scattering function[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2684.
- [4] Hecht E. *Optics* [M]. 4th ed. Boston: Addison-Wesley, 2001.
- [5] Chipman R A. *Handbook of optics* [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [6] Chipman R A. *Handbook of optics* [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [7] Hovenier J W. Structure of a general pure Mueller matrix[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(36): 8318-8324.
- [8] Savenkov S N. Light scattering reviews 9: light scattering and radiative transfer [M] // Kokhanovsky A A. *Principles of the Mueller matrix measurements*. Heidelberg: Springer, 2015: 213-255.
- [9] Voss K J, Fry E S. Measurement of the Mueller matrix for ocean water[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(23): 4427-4439.
- [10] Mobley C. *Light and water: radiative transfer in natural waters* [M]. New York: Academic Press, 1994.
- [11] Schott J R. *Fundamentals of polarimetric remote sensing* [M]. Bellingham: SPIE, 2009.
- [12] Gordon H R. *Physical principles of ocean color remote sensing* [M]. Coral Gables: University of Miami, 2019.
- [13] Petzold T J. *Volume scattering functions for selected ocean waters* [R]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1972.
- [14] Beardsley G F. *Mueller scattering matrix of sea*



- water [J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58(1): 52-56.
- [15] Kadyshevich E A, Lyubovtseva Y S, Plakhina I N. Measurement of matrices for light scattered by sea water [J]. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 1971, 7(5): 367-371.
- [16] Kadyshevich E A, Lyubovtseva Y S, Rosenbergg G V. Light-scattering matrices of Pacific and Atlantic Ocean waters [J]. Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics, 1976, 12(2): 106-111.
- [17] Kadyshevich E A. Phase matrices of light scattering by waters of the Baltic Sea [J]. Izvestiya Akademii Nauk SSSR Fizika Atmosfery I Okeana, 1977, 13: 108-110.
- [18] Kokhanovsky A A. Parameterization of the Mueller matrix of oceanic waters [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C6): 3175.
- [19] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, et al. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 598-615.
- [20] Leroy M, Lifermann A. The POLDER instrument: mission and scientific results [C] // IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120), July 24-28, 2000, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2000: 62-64.
- [21] Slade W H, Agrawal Y C, Mikkelsen O A. Comparison of measured and theoretical scattering and polarization properties of narrow size range irregular sediment particles [C] // 2013 OCEANS - San Diego, September 23-27, 2013, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013.
- [22] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. Optical Engineering, 2013, 53(5): 051405.
- [23] Hostetler C A, Behrenfeld M J, Hu Y X, et al. Spaceborne lidar in the study of marine systems [J]. Annual Review of Marine Science, 2018, 10: 121-147.
- [24] 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.
- [25] 胡浩丰, 李校博, 刘铁根. 基于偏振成像的水下图像复原技术研究最新进展 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 0603006.
- Hu H F, Li X B, Liu T G. Recent advances in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 0603006.
- [26] 赵一鸣, 江月松, 张绪国. 激光偏振主动探测及成像系统的误差研究以及系统的改进 [J]. 光学技术, 2009, 35(6): 851-858.
- Zhao Y M, Jiang Y S, Zhang X G. Numerical research of the error of the laser polarization active imaging system [J]. Optical Technique, 2009, 35(6): 851-858.
- [27] Hu H F, Zhao L, Li X B, et al. Underwater image recovery under the nonuniform optical field based on polarimetric imaging [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 17481845.
- [28] 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.
- [29] 李彩, 柯天存, 曹文熙, 等. 水体体散射函数剖面仪 [J]. 光学技术, 2005, 31: 211-214.
- Li C, Ke T C, Cao W X, et al. An instrument for measuring *in-situ* profiles of the volume scattering function of seawater [J]. Optical Technique, 2005, 31: 211-214.
- [30] Sullivan J M, Twardowski M S. Angular shape of the oceanic particulate volume scattering function in the backward direction [J]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6811-6819.
- [31] Li C, Cao W, Yang Y. Optical scattering property: spatial and angle variability in Daya Bay [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(S2): S20101.
- [32] 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.
- [33] Harmel T, Hieronymi M, Slade W, et al. Laboratory experiments for inter-comparison of three volume scattering meters to measure angular scattering properties of hydrosols [J]. Optics Express, 2015, 24(2): A234-A256.
- [34] Zhang X D, Hu L B, Xiong Y H, et al. Experimental estimates of optical backscattering associated with submicron particles in clear oceanic waters [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(4): e2020GL087100.
- [35] Zhang X D, Hu L B, Gray D, et al. Shape of

- particle backscattering in the North Pacific Ocean: the  $\chi$  factor [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(5): 1260-1266.
- [36] 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.
- [37] Bickel W S, Bailey W M. Stokes vectors, Mueller matrices, and polarized scattered light [J]. *American Journal of Physics*, 1985, 53(5): 468-478.
- [38] Hielscher A, Eick A, Mourant J, et al. Diffuse backscattering Mueller matrices of highly scattering media[J]. *Optics Express*, 1997, 1(13): 441-453.
- [39] Azzam R M A. Division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) for the simultaneous measurement of all four stokes parameters of light [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1982, 29(5): 685-689.
- [40] Chang J T, He H H, Wang Y, et al. Division of focal plane polarimeter-based  $3 \times 4$  Mueller matrix microscope: a potential tool for quick diagnosis of human carcinoma tissues[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(5): 056002.
- [41] Azzam R M. Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal [J]. *Optics Letters*, 1978, 2(6): 148-150.
- [42] Alali S, Gribble A, Vitkin I A. Rapid wide-field Mueller matrix polarimetry imaging based on four photoelastic modulators with no moving parts [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1038-1041.
- [43] Goldstein D H, Chipman R A. Error analysis of a Mueller matrix polarimeter [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(4): 693-700.
- [44] Compain E, Poirier S, Drevillon B. General and self-consistent method for the calibration of polarization modulators, polarimeters, and Mueller-matrix ellipsometers[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(16): 3490-3502.
- [45] Hu H F, Ossikovski R, Goudail F. Performance of Maximum Likelihood estimation of Mueller matrices taking into account physical realizability and Gaussian or Poisson noise statistics [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 5117-5129.
- [46] Zhang X D, Boss E, Gray D J. Significance of scattering by oceanic particles at angles around 120 degree[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31329-31336.
- [47] 徐聪辉, 李彩. 广角水体体散射函数测量技术及其应用研究进展[J]. *遥感学报*, 2019, 23(6): 1078-1090.
- Xu C H, Li C. Progress of measurement technology and application of general-angle Volume Scattering Function of water[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1078-1090.
- [48] Babin M, Stramski D, Reynolds R A, et al. Determination of the volume scattering function of aqueous particle suspensions with a laboratory multi-angle light scattering instrument [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3853-3873.
- [49] Tyler J E, Richardson W H. Nephelometer for the measurement of volume scattering function *in situ* [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1958, 48(5): 354-357.
- [50] Kullenberg G. Light-scattering observations in frontal zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1978, 83(C9): 4683-4690.
- [51] Thompson R C, Bottiger J R, Fry E S. Measurement of polarized light interactions via the Mueller matrix[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(8): 1323-1332.
- [52] Volten H, de Haan J F, Hovenier J W, et al. Laboratory measurements of angular distributions of light scattered by phytoplankton and silt [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(6): 1180-1197.
- [53] 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.
- [54] Stabo-Eeg F, Kildemo M, Nerbo I S, et al. Well-conditioned multiple laser Mueller matrix ellipsometer[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(7): 073604.
- [55] 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.
- [56] Shao B, Jaffe J S, Chachivilis M, et al. Angular resolved light scattering for discriminating among marine picoplankton: modeling and experimental measurements[J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 12473-12484.
- [57] Tan H, Doerffer R, Oishi T, et al. A new approach to measure the volume scattering function [J].

- Optics Express, 2013, 21(16): 18697-18711.
- [58] Svensen Ø, Stamnes J J, Kildemo M, et al. Mueller matrix measurements of algae with different shape and size distributions[J]. Applied Optics, 2011, 50(26): 5149-5157.
- [59] Liao R, Ma H. Study on errors of nonsimultaneous polarized-light scattering measurements of suspended rod-shaped particles[J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 418-424.
- [60] Zhang S, Jiang H, Gu H G, et al. High-speed Mueller matrix ellipsometer with microsecond temporal resolution[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 10873-10887.
- [61] Aas L M S, Ellingsen P G, Kildemo M, et al. Dynamic response of a fast near infra-red Mueller matrix ellipsometer[J]. Journal of Modern Optics, 2010, 57(17): 1603-1610.
- [62] Koestner D, Stramski D, Reynolds R. Measurements of the volume scattering function and the degree of linear polarization of light scattered by contrasting natural assemblages of marine particles [J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2690.
- [63] Wang Y, Liao R, Dai J C, et al. Differentiation of suspended particles by polarized light scattering at 120° [J]. Optics Express, 2018, 26(17): 22419-22431.
- [64] Dai J, Li W, Gong B Y, et al. Measurement of the light scattering of single micrometer-sized particles captured with a microfluidic trap [J]. Optics Express, 2015, 23(23): 30204-30215.
- [65] 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.
- [66] Liao R, Roberts P L D, Jaffe J S. Sizing submicron particles from optical scattering data collected with oblique incidence illumination [J]. Applied Optics, 2016, 55(33): 9440-9449.
- [67] Tian X R, Ran L, Tao Y, et al. Obtaining shape information of marine microorganisms using polarized-light scattering [C] // 2013 OCEANS-San Diego, September 23-27, 2013, San Diego, CA. New York: IEEE Press, 2013.
- [68] Hu L B, Zhang X D, Xiong Y H, et al. Variability of relationship between the volume scattering function at 180° and the backscattering coefficient for aquatic particles [J]. Applied Optics, 2020, 59(10): C31-C41.
- [69] Zhang X. Light scattering by microbubbles in the ocean [D]. Nova Scotia: Dalhousie University of Canada, 1999.
- [70] Hu L B, Zhang X D, Xiong Y H, et al. Calibration of the LISST-VSF to derive the volume scattering functions in clear waters [J]. Optics Express, 2019, 27(16): A1188-A1206.
- [71] Gogoi A, Buragohain A K, Choudhury A, et al. Laboratory measurements of light scattering by tropical fresh water diatoms [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(14/15/16): 1566-1578.
- [72] Cloude S R. Conditions for the physical realisability of matrix operators in polarimetry [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1166: 177-187.
- [73] Berthon J F, Shybanov E, Lee M E G, et al. Measurements and modeling of the volume scattering function in the coastal northern Adriatic Sea [J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 5189-5203.
- [74] Behrenfeld M J, Hu Y X, Hostetler C A, et al. Space-based lidar measurements of global ocean carbon stocks [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(16): 4355-4360.
- [75] Lu X M, Hu Y X, Pelon J, et al. Retrieval of ocean subsurface particulate backscattering coefficient from space-borne CALIOP lidar measurements [J]. Optics Express, 2016, 24(25): 29001-29008.
- [76] 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): 1240-1259.
- [77] 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): 5085-5099.
- [78] Twardowski M, Zhang X D, Vagle S, et al. The optical volume scattering function in a surf zone inverted to derive sediment and bubble particle subpopulations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C7): C00H17.
- [79] Czerski H, Twardowski M, Zhang X, et al. Resolving size distributions of bubbles with radii less than 30 μm with optical and acoustical methods [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C7): C00H11.
- [80] Zhang X D, Huot Y, Bricaud A, et al. Inversion of spectral absorption coefficients to infer phytoplankton size classes, chlorophyll concentration, and detrital matter [J]. Applied Optics, 2015, 54(18): 5805-5816.



- [81] Zhang X D, Stavn R H, Falster A U, et al. Size distributions of coastal ocean suspended particulate inorganic matter: amorphous silica and clay minerals and their dynamics[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 189: 243-251.
- [82] Kokhanovsky A A. Light scattering reviews 10: light scattering and radiative transfer [M]. Heidelberg: Springer, 2016.
- [83] 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.
- [84] van de Hulst H C, Twersky V. Light scattering by small particles[J]. *Physics Today*, 1957, 10(12): 28-30.
- [85] Fry E S, Voss K J. Measurement of the Mueller matrix for phytoplankton [J]. *Limnology and Oceanography*, 1985, 30(6): 1322-1326.
- [86] Quinby-Hunt M S, Hunt A J, Lofftus K, et al. Polarized-light scattering studies of marine *Chlorella* [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(8): 1587-1600.
- [87] Witkowski K, Król T, Zielirinki A, et al. A light-scattering matrix for unicellular marine phytoplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(5): 859-869.
- [88] Oishi T. Significant relationship between the backward scattering coefficient of sea water and the scatterance at 120 degrees [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(31): 4658-4665.
- [89] Maffione R A, Dana D R. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(24): 6057-6067.
- [90] Wang Y, Dai J C, Liao R, et al. Characterization of physiological states of the suspended marine microalgae using polarized light scattering [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(5): 1307-1312.
- [91] Li X P, Liao R, Zhou J L, et al. Classification of morphologically similar algae and cyanobacteria using Mueller matrix imaging and convolutional neural networks [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6520-6530.
- [92] Li X P, Liao R, Ma H, et al. Polarimetric learning: a Siamese approach to learning distance metrics of algal Mueller matrix images[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3829-3837.
- [93] Liu Z D, Liao R, Wan J C, et al. Polarization staining and high-throughput detection of marine microalgae using single cell average Mueller matrices [J]. *Optik*, 2019, 180: 84-90.
- [94] Li J J, Liao R, Tao Y, et al. Evaluation for gas vesicles of sonicated cyanobacteria using polarized light scattering[J]. *Optik*, 2020, 216: 164835.
- [95] Li J J, Liao R, Tao Y, et al. Probing the cyanobacterial microcystis gas vesicles after static pressure treatment: a potential *in situ* rapid method [J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4170.
- [96] 李嘉晋, 廖然, 马辉. 海洋颗粒物的原位细致分类、应用与展望[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600005. Li J J, Liao R, Ma H. *In situ* fine classification, application, and expectation of marine particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600005.
- [97] Koestner D, Stramski D, Reynolds R A. Assessing the effects of particle size and composition on light scattering through measurements of size-fractionated seawater samples [J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65(1): 173-190.
- [98] Koestner D, Stramski D, Reynolds R A. Polarized light scattering measurements as a means to characterize particle size and composition of natural assemblages of marine particles[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8314-8334.
- [99] Brown O B, Gordon H R. Two component Mie scattering models of sargasso sea particles [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(10): 2461-2465.
- [100] Zaneveld J R V, Roach D M, Pak H. The determination of the index of refraction distribution of oceanic particulates [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(27): 4091-4095.
- [101] Morel A, Bricaud A. Inherent optical properties of algal cells including picoplankton: theoretical and experimental results [J]. *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1986, 214: 521-559.
- [102] Mueller J L. The influence of phytoplankton on ocean color spectra [D]. Corvallis: Oregon State University of the United States of America, 1974.
- [103] Kitchen J C, Zaneveld J R V. A three-layered sphere model of the optical properties of phytoplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(8): 1680-1690.
- [104] Organelli E, Dall'Olmo G, Brewin R J W, et al. The open-ocean missing backscattering is in the structural complexity of particles [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 5439.
- [105] Zaneveld J R V. A theoretical derivation of the dependence of the remotely sensed reflectance of the ocean on the inherent optical properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100(C7): 13135-13142.
- [106] Lee Z P, Du K P, Voss K J, et al. An inherent-

- optical-property-centered approach to correct the angular effects in water-leaving radiance [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3155-3167.
- [107] Voss K, Chapin A. Upwelling radiance distribution camera system, NURADS [J]. *Optics Express*, 2005, 13(11): 4250-4262.
- [108] Voss K J, Souaidia N. POLRADS: polarization radiance distribution measurement system [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19672-19680.
- [109] Chowdhary J, Zhai P W, Boss E, et al. Modeling atmosphere-ocean radiative transfer: a PACE mission perspective[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 100.
- [110] Boss E, Pegau W S, Lee M, et al. Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109 (C1): C01014.
- [111] Chami M, Shybanov E B, Khomenko G A, et al. Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment[J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (15): 3605-3619.
- [112] Erbe A, Sigel R. Ellipsometric light scattering to probe the interface of colloids-current applications and future challenges[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2010, 5: 02001.
- [113] 周雯, 孙兆华, 曹文熙, 等. 浮游植物的吸收-衰减特性及其与粒径间的关系[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3347-3352.
- Zhou W, Sun Z H, Cao W X, et al. Variations in the optical absorption and attenuation properties of cultured phytoplankton and their relationships with cell size [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3347-3352.
- [114] 王桂芬, 曹文熙, 殷建平, 等. 海洋颗粒有机碳浓度水色遥感研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31 (6): 48-56.
- Wang G F, Cao W X, Yin J P, et al. Progress on ocean-color remote sensing of particulate organic carbon [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(6): 48-56.
- [115] Poulin C, Antoine D, Huot Y. Diurnal variations of the optical properties of phytoplankton in a laboratory experiment and their implication for using inherent optical properties to measure biomass [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 711-729.
- [116] Kattawar G W, Adams C N. Stokes vector calculations of the submarine light field in an atmosphere-ocean with scattering according to a Rayleigh phase matrix: effect of interface refractive index on radiance and polarization [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(8): 1453-1472.
- [117] Adams J T, Kattawar G W. Polarimetric lidar returns in the ocean: a Monte Carlo simulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2963: 54-59.
- [118] Adams J T, Aas E, Højerslev N K, et al. Comparison of radiance and polarization values observed in the Mediterranean Sea and simulated in a Monte Carlo model[J]. *Applied Optics*, 2002, 41 (15): 2724-2733.
- [119] Raković M J, Kattawar G W, Mehrubeoglu M B, et al. Light backscattering polarization patterns from turbid media: theory and experiment [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3399-3408.
- [120] Yao G, Wang L. Propagation of polarized light in turbid media: simulated animation sequences [J]. *Optics Express*, 2000, 7(5): 198-203.
- [121] Wang X, Wang L. Propagation of polarized light in birefringent turbid media: time-resolved simulations [J]. *Optics Express*, 2001, 9(5): 254-259.
- [122] Wang X D, Wang L V, Sun C W, et al. Polarized light propagation through scattering media: time-resolved Monte Carlo simulations and experiments [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8: 608-617.
- [123] Tynes H H, Kattawar G W, Zege E P, et al. Monte Carlo and multicomponent approximation methods for vector radiative transfer by use of effective Mueller matrix calculations [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(3): 400-412.
- [124] Zhai P W, Kattawar G W, Yang P. Impulse response solution to the three-dimensional vector radiative transfer equation in atmosphere-ocean systems. I. Monte Carlo method [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(8): 1037-1047.
- [125] Zhai P W, Kattawar G W, Yang P. Impulse response solution to the three-dimensional vector radiative transfer equation in atmosphere-ocean systems. II. The hybrid matrix operator: Monte Carlo method [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(8): 1063-1071.
- [126] You Y, Zhai P W, Kattawar G W, et al. Polarized radiance fields under a dynamic ocean surface: a three-dimensional radiative transfer solution [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(16): 3019-3029.
- [127] Ambirajan A, Look D C. A backward Monte Carlo study of the multiple scattering of a polarized laser beam[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1997, 58(2): 171-192.
- [128] Krekov G M, Krekova M M, Shamanaev V S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. I.

- Effect of the atmosphere and wind-driven sea waves [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(9): 1589-1595.
- [129] Krekov G M, Krekova M M, Shamanaev V S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. II. Polarization characteristics of signals [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(9): 1596-1601.
- [130] Stegmann P G, Sun B Q, Ding J C, et al. Study of the effects of phytoplankton morphology and vertical profile on lidar attenuated backscatter and depolarization ratio [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 225: 1-15.
- [131] Liu Q, Cui X Y, Chen W B, et al. A semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for polarized oceanic lidar: experiment-based comparisons and multiple scattering effects analyses [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 237: 106638.
- [132] 孔晓娟, 刘秉义, 杨倩, 等. 船载激光雷达测量水体光学参数的仿真模拟研究 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0205010.
- Kong X J, Liu B Y, Yang Q, et al. Simulation of water optical property measurement with shipborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0205010.
- [133] 朱培志, 刘秉义, 孔晓娟, 等. 星载海洋激光雷达叶绿素剖面探测能力估算 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 20200164.
- Zhu P Z, Liu B Y, Kong X J, et al. Estimation of chlorophyll profile detection capability of spaceborne oceanographic lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200164.
- [134] Lu X M, Hu Y X, Yang Y K, et al. Antarctic spring ice-edge blooms observed from space by ICESat-2 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111827.