

光学学报

海洋颗粒物的原位细致分类、应用与展望

李嘉晋^{1,2}, 廖然^{1,2*}, 马辉^{1,2**}

¹清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;

²广东省偏振光学检测与成像工程技术研究中心, 广东 深圳 518055

摘要 海洋中各种微小颗粒物无处不在, 它们与海洋物理过程、化学过程、生物和地质沉积等几乎都有关联, 尤其在海洋碳循环中起着不可忽视的作用。但长期以来人们对海洋颗粒物的原位观测技术, 以及对观测数据的细致分类仍不能满足需求。偏振光散射测量对散射颗粒的粒径、形态和亚细胞层次的微观结构特征十分敏感, 测量结果可用于对复杂的海洋颗粒物结构特征甚至海洋生物的生理状态进行定量表征和细致分类。实现偏振光散射的原位动态监测已经在海洋环境监测领域展示出诱人的应用潜力。简单介绍海洋颗粒物的检测方法, 重点介绍基于偏振光散射的颗粒物细致分类方法和初步应用, 并对其未来的发展方向进行展望。

关键词 散射; 偏振光; 海洋颗粒物; 细致分类; 复合测量; 海洋碳循环

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0600005

In Situ Fine Classification, Application, and Expectation of Marine Particles

Li Jiajin^{1,2}, Liao Ran^{1,2*}, Ma Hui^{1,2**}

¹Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

²Guangdong Engineering Center of Polarization Imaging and Sensing Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract Suspended particles are everywhere in ocean and play important roles in almost all ocean processes including physics, chemistry, biology and geology deposition, and ocean carbon cycle in particular. However, for a long time, current technology for *in-situ* observation and fine classification of marine micro-particles is still far from satisfactory. Polarized light scattering measurement is sensitive to the size, morphology, and subcellular microstructure of suspended particles. The measurement results can be used for quantitative characterization and fine classification of complex marine particulate structure characteristics and even the physiological state of marine organisms. Realizing *in-situ* dynamic monitoring of polarized light scattering has shown attractive application potential in the field of marine environmental monitoring. In this paper, we present a brief summary of current techniques for marine particle detections and a more detailed introduction on the principle, technique, and applications of polarized light scattering for the detection and fine classification of marine particles, followed by a discussion on future perspective of the fields.

Key words scattering; polarized light; marine particles; fine classification; multi-modality measurement; ocean carbon cycle

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-01-11; 录用日期: 2022-02-01

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1406600)、国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(41527901)、国家自然科学基金面上项目(61975088)、国家自然科学基金青年科学基金项目(41106034)、广东省重点领域研发计划项目(2020B1111040001)、深圳市科技计划学科布局项目(JCYJ20160818143050110)、深圳市协同创新计划项目(SGLH20150216144502856,SGDX20201103095403017)

通信作者: *liao.ran@sz.tsinghua.edu.cn; **mahui@tsinghua.edu.cn

1 引言

海洋是一个非常复杂的体系,海洋现象和海洋过程研究涉及物理、化学、生物等各个基础学科,海洋领域有大量的未知问题需要去研究和探索^[1-2]。人们利用各种不同原理、不同形式的探测仪器,在不同条件下提供不同的观测指标,以更好地、更进一步地认识海洋^[3-4]。海洋颗粒物广泛地存在于海洋世界,它主要由生物颗粒(颗粒碳)、泥沙、沉积物、微塑料和絮凝物等组成^[5-7]。海洋颗粒物几乎参与所有的海洋过程,且在海洋物理过程、化学过程、生物进化、生态、地质沉积等海洋过程中起到核心作用或充当着关键的交互桥梁,了解不同海洋颗粒物及其与其他海洋物理、化学和生物观测指标之间纵横交错的关系,对全面了解全球海洋生态系统具有不可忽视的作用和影响^[8-10]。目前,人们已经发展了很多种水体颗粒物观测仪器,能够获得其粒径分布、浓度,甚至来源^[11-12]。但是,要深入了解和认识海洋颗粒物在生态系统中所产生的影响,仍然需要详细了解颗粒物种类、组成成分及其时空变化规律^[13]。因此,实现海洋颗粒物的细致分类,高精度地实时原位监测区域水体中海洋颗粒物的种类和组成成分的相对变化,对全球海洋生态系统的相关研究具有重要意义^[14]。

多年来海洋颗粒物探测技术一直在不断地发展与完善,已经出现了很多种新的、不同类型的测量方法和仪器。本文首先简要总结国内外关于海洋颗粒物探测技术研究领域的进展,以及不同探测仪器的指标和特点。在基于散射的颗粒物检测方法中,偏振光散射相关技术近年来发展十分迅速,已展示出一系列突出特点和应用潜力。在国家自然科学基金委员会、科技部和地方政府的支持下,围绕着偏振光散射与成像方法,特别是海洋颗粒物原位探测和细致分类开展了长期研究,发展了基于偏振光散射技术的测量方法和系列仪器,研究了偏振光在介质中的散射传播过程,探索了多种偏振特征提取方法。现有工作显示:偏振光散射测量技术已经成为一种海洋颗粒物定性和定量表征的新型手段,能够获得悬浮颗粒物丰富的光学特征、微观结构和生理状态信息,并有望通过与其他观测指标的复合测量与关联分析,提高现有偏振光散射测量技术的数据精度和应用价值。通过偏振光探测技术的仪器化和应用布放,初步证实偏振光散射技术具有海洋颗粒物细致分类能力,展示出多种应用前景。本文将从偏振光散射技术

的概念和方法出发,介绍国内外在偏振光散射技术研究领域的前沿进展,探讨其在海洋颗粒物细分、复合测量和关联分析方面的应用潜力。

2 海洋颗粒物检测技术

水体颗粒物的浓度和粒径分布是研究水体情况非常关键的信息,现有探测方法包括电感应探测、声学探测和光学探测。电感应探测方法可以灵敏、准确地检测出悬浮颗粒的粒径分布和数目,其商业化产品已经被广泛使用于悬浮颗粒的计数,如库尔特计数器^[15]。声学探测方法指的是通过声学反演的方法从回波信号中获取水体颗粒物的相关物理特征参数,从而反演出颗粒物的粒径分布和浓度分布,常用的商业化仪器有声学多普勒流速剖面仪(ADCP)^[16]。基于光学原理获得颗粒物数目和粒径分布的方法和仪器有多种,光学显微镜仍是颗粒物离线识别和细致分类的标准工具。另外,还有一批基于光透射和散射测量的在线观测仪器,如水下光谱吸收衰减测量仪(AC-S)、现场激光粒度仪 LISST 系列产品、后向散射系数测量仪,以及浊度计等,都可以对悬浮颗粒物的组成成分进行现场分析和分类^[17-18]。

光学探测方法具有无损伤、非接触、时空覆盖范围广、获得信息量大等优势,故十分适用于对海洋颗粒物的探测和细致分类。海洋颗粒物的光学检测方法可以按照不同的探测原理分为成像、光谱和散射三大类;按照所测量的样本又可以分成体积测量和单颗粒测量。其中,体积测量指的是对含有单种/多种颗粒物的水体中的所有颗粒物进行整体测量,通过获得平均指标,进一步反演出水体中颗粒物的性质和组成成分;单颗粒测量指的是测量水体中的单个颗粒物的光学参数,获得个体颗粒物的物理性质,进而获得颗粒物的种类和浓度等统计信息。一般而言,单颗粒测量是体积测量的微分形式,体积测量反映了水体中所有颗粒物的平均效应。现有的常用的海洋颗粒物光学探测方法分类如表 1 所示。

海洋颗粒物光学成像方法基本都属于单颗粒测量,如显微镜成像、全息成像、流式成像和暗场成像等,见表 1。它们能够直观地从图像中观察水体颗粒物的外貌形态特征,并对不同的颗粒物进行有效分类。显微镜是生物学检测和分类应用最普遍的仪器设备,根据不同的原理可以分为明场显微镜、暗场显微镜、荧光显微镜和相差显微镜等。不同的显微镜具有不同的指标和特点,其都

可以用于海洋颗粒物的检测与分类。最近出现的缪勒显微镜不仅可以获得颗粒物的普通光学图像,还可以获得大量亚波长尺度的微观结构特征信息,从而极大地提升颗粒物定量分类识别的能力^[19]。另外,还有一些海洋颗粒物专用的成像方法和仪器,如水下全息成像仪,可以对海水中微型浮游动物进行成像,识别不同类型的浮游动物^[20];流式成像仪 FlowCam 可以快速地对流体中的颗粒物进行计数和成像,获得单个颗粒物的物理特征^[21];暗场成像仪有利于增强颗粒物图像的边缘对比度,获取更大的成像尺寸范围^[22]。

光谱探测方法大部分属于体积测量,利用不同颗粒物吸收、发射光的差异反演颗粒物的成分和浓度等,主要方法有荧光光谱、拉曼光谱、高光谱和卫星遥感等,见表 1。例如:荧光分光光度计可以获取藻类的三维荧光光谱,实现浮游藻类群落多组分准确识别和定量分析^[23];拉曼光谱仪可以获取藻类的拉曼光谱,反演出藻类细胞的化学成分,为藻类分类以及环境胁迫下藻类的生理变化等提供实时无损的检测^[24];高光谱海洋水色传感器 HyperOCR 利用光谱信息测量水体辐照度和辐亮度,可用于水体光合作用研究、自然水体生物光学分析等^[25];浮游植物分类荧光仪 Phyto-PAM 可以获得所测水体的叶绿素含量、光合活性等指标,了解自然水样中藻类种群的动态变化、野外水

体中光合作用的时空变化^[26]。

光学散射方法(表 1)的大部分仪器依赖光在小体积内散射强度进行测量。Hach 公司的散射光浊度计常用于测量悬浮于水或透明液体中的颗粒物对照明光的散射强度,并用散射强度定量表征这些悬浮颗粒物的含量^[27];Sea-bird 公司的水下光谱吸收衰减仪(AC-S)可以用于同时测量水体的衰减系数和吸收系数,是表征浮游植物固有光学特性的两个重要光学参量^[28];Sea-bird 公司的 ECO BB 后向散射系数测量仪可用于测量水体 120°附近的体散射函数值,能够估算水体的后向散射系数^[29];Sequoia 公司研发了 LISST 系列产品,包括 LISST-200X 和 LISST-VSF,前者可以测量颗粒物的大小和浓度,后者可以测量水体的体散射函数^[30]。在基于单颗粒光强散射的颗粒物测量仪器中,最被广泛使用的当属流式细胞仪,比较著名的厂家有 Beckman Coulter 公司^[31]。流式细胞仪通过流体动力学的聚焦作用,使得水体颗粒物在鞘液中单个排列并通过探测区域,同时记录下单个颗粒物的散射光和激发荧光强度等,进一步利用这些数据对不同的颗粒物进行细致分类,或对某些生命过程进行定量表征分析^[32]。McLane Labs 公司的水下流式细胞仪能够测量单个颗粒物的成像、散射和荧光信息^[33]。基于偏振光散射的偏振体散射测量计和偏振光探测仪将于后文展开讲述。

表 1 基于光学方法的海洋颗粒物探测技术

Table 1 Marine particle detection based on optical methods

Method	Bulk measurement	Individual measurement	
Imaging	Microscopic	Tsinghua University: Mueller matrix microscope ^[19]	
	Holographic	University of Aberdeen: holographic camera ^[20]	
	Flow	Yokogawa Fluid Imaging Technologies: FlowCam ^[21]	
	Dark-field	Scripps: Plank camera ^[22]	
Spectrum	Fluorescence	Hitachi: fluorescence spectrophotometer ^[23]	
	Raman	Nicolet: Raman spectrometer ^[24]	
	Hyper spectral	Satlantic (Sea-bird): HyperOCR ^[25]	
	Satellite	Marine satellite remote sensing ^[34]	
Scattering		Hach: nephelometer ^[27]	
	Light scattering intensity	Wet labs (Sea-bird): AC-S ^[28]	Beckman Coulter: flow cytometer ^[31]
		Wet labs (Sea-bird): ECO BB ^[29]	
		Sequoia: LISST ^[30]	
	Fluorescence Polarized light scattering	Waltz: Phyto-PAM ^[26]	Beckman Coulter: flow cytometer ^[31]
	Université Paris VI: POLVSM	Tsinghua University: laser polarization sensor	

值得注意的是,海洋卫星遥感能够对海洋进行远距离非接触观测,随着时空分辨率日益提高,它已成为大尺度研究海洋水体生态系统变化的重要手

段,能够有效抑制微观尺度引起的涨落,凸显宏观尺度效应,其在对海洋水体的时空响应检测中具有突出的优势。目前,国内外已经建立起关于悬浮泥沙、

浮游植物类群、赤海藻种等的一系列创新遥感算法^[34]。天然海水作为一种复杂的光学介质,会对光信号产生多种影响,进而导致水体内主要的后向散射源变化因不确定而具有争议^[13]。不同海洋颗粒物具有不同的后向散射特性和潜在贡献,故详细了解水体中颗粒物的组成和分布对分析和解释遥感数据十分重要^[35]。很多水体颗粒物的组成成分与这些遥感数据息息相关,深刻地影响着所获得的遥感数据的质量。对海洋颗粒物的原位探测和细致分类,能够为海洋水色遥感的水体光学模型提供重要的基础数据,对海洋水色遥感数据反演和信息提取产生重要影响,如:帮助研究人员利用海洋遥感数据监测赤潮和藻华的爆发,反演水体中叶绿素的含量,分析泥沙的成分变化和迁移路径等^[36]。

3 偏振光散射海洋颗粒物检测技术

3.1 偏振基础知识

偏振光散射测量方法近年来取得突出进展,在不同的研究领域得到关注^[37-38]。光的偏振态可以用一个四维矢量来表示,该矢量称为斯托克斯(Stokes)矢量,它可以通过测量光的偏振分量光强值计算获得,可表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_H + I_V \\ I_H - I_V \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: I 代表光强, Q 、 U 和 V 都是偏振分量^[39],其中 Q 表示光的水平分量 I_H 与垂直分量 I_V 的强度差, U 表示光的 45° 线分量 I_{45° 与 -45° 线分量 I_{-45° 的强度差, V 表示光的右旋分量 I_R 与左旋分量 I_L 的强度差。斯托克斯矢量能描述完全偏振光、部分偏振光和自然光。

由于利用偏振片和波片等调制偏振态时可以不改变光的传播方向,故偏振光学装置可以与传统的非偏振测量光路兼容。当入射偏振光被悬浮的单个颗粒散射时,入射光的偏振态 \mathbf{S}_{in} 经过线性变换成为散射光的偏振态 \mathbf{S}_{out} 。这个线性变换可以用一个 4×4 的缪勒(Mueller)矩阵 \mathbf{M} 表示,即

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \times \mathbf{S}_{in}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_{out} \\ Q_{out} \\ U_{out} \\ V_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: I_{in} 、 Q_{in} 、 U_{in} 、 V_{in} 为 \mathbf{S}_{in} 的分量; I_{out} 、 Q_{out} 、 U_{out} 、 V_{out} 为 \mathbf{S}_{out} 的分量; M_{ij} 为 \mathbf{M} 的分量, $i, j=1, 2, 3, 4$ 。

16个阵元的缪勒矩阵可以用来描述悬浮颗粒弹性散射的全部偏振光学特征^[39]。其中, M_{11} 代表样本的散射光强,而其他15个阵元描述了样本的偏振光学性质,实际应用中一般都使用 M_{11} 进行归一化。由于弹性散射过程中,偏振散射光对散射颗粒的光学性质(包括折射率、吸收、双折射、二向色性等)、形态(粒径、形状、取向、排列、有序度等)和微观结构(表面形貌、内部亚结构)都十分敏感,特别是对亚波长尺度以下的超光学分辨结构特征敏感,且缪勒矩阵携带悬浮颗粒丰富的微观结构特征信息^[40],故利用能够完备描述颗粒偏振光学性质的缪勒矩阵,可实现颗粒物细致分类,并可定量表征颗粒物的微观结构特征及其随着时空变化的规律。

缪勒矩阵测量需要建立在斯托克斯测量的基础之上^[40]。缪勒矩阵的完整测量需要对相同的样品进行四次或以上的斯托克斯测量(同时测得四个斯托克斯分量的情况下)。因此,动态的水体悬浮颗粒物的缪勒矩阵测量相对于斯托克斯测量来说,更为复杂和困难。

相比于非偏振散射测量方法,偏振光散射测量技术用于海洋颗粒物定性和定量表征时具有以下四个特点:

第一,偏振光散射测量方法容易实现,且与现有非偏振测量方法兼容,偏振光散射测量装置可以从非偏振测量仪器升级中得到。商业化的浊度计、ECO BB、AC-S等非偏振测量仪器已经被广泛地应用在海洋的各个研究领域,其均是在原有非偏振测量仪器的基础上升级所得,硬件结构类似,且所得到的数据包含原有仪器数据,人们可以进行直接对比,以确保新老数据的一致性。

第二,偏振光散射测量方法所得到的颗粒物微观结构特征信息急剧增加,便于颗粒物的特征识别。而非偏振测量方法只能获取一个散射光强度,其信息量往往不足以有效地表征不同的颗粒物,特异性也不够强。偏振测量从一维光强拓展到四维偏振态斯托克斯或者十六维缪勒矩阵,极大地增加了可用于细分样本的信息量。

第三,偏振光散射测量方法对颗粒物的各向异性和小尺度微观结构非常敏感,可以有效地分析相位延迟、二相色性等光学各向异性,以及低于波长尺度的微观结构特征信息,可以利用缪勒矩阵的阵元获得与微观结构密切相关的物理特征。

第四, 缪勒矩阵的阵元之间存在着强烈的关联性。缪勒矩阵的 16 个阵元可以表征颗粒物不同的物理特征, 它们之间相互联系, 又各自存在表征的特异性^[41]。借助大数据技术, 尤其是机器学习, 可以深入挖掘这些阵元的关联和特异性表征, 利用某个偏振子集对不同的海洋颗粒物进行识别和区分, 可以降低仪器研发难度, 提高测量效率。

3.2 水体颗粒物的偏振光散射测量装置

前期工作中许多学者针对小体积测量研究了偏振光散射方法, 该方法可用于分析水体颗粒物的平均光学性质和组成成分。Thompson 等^[42]在 1984 年研制出一种用于准确测量 5° 到 170° 范围内海水缪勒矩阵的仪器; Voss 等^[43]在 1984 年利用类似的仪器开展了大量的海水缪勒矩阵测量工作, 并发现缪勒矩阵阵元可以反映海水中颗粒物的性质和组成成分; Volten 等^[44]在 1998 年测量了多种浮游植物的散射函数以及缪勒矩阵元素比值的角度分布, 发现偏振信息能够反映水体悬浮颗粒的形态和结构特征; Svensen 等^[45]在 2011 年测量了 11 个藻种的完整的缪勒矩阵, 并尝试获得不同藻种的形状、大小和

折射率等信息; Chami 等^[46]在 2014 年发明了一种偏振体散射测量计 (POLVSM), 能够准确地测量水体 1° 到 179° 范围内缪勒矩阵的线性部分, 用于了解海洋颗粒物的光散射机制, 这对海洋水色遥感研究具有重要意义。

从 2010 年开始, 本课题组利用偏振光单颗粒散射研究悬浮颗粒物的检测和细致分类方法。Wang 等^[47]在 2018 年在商业化仪器 ECO BB 光路的基础上进行偏振升级, 研发出一种基于 120° 偏振光散射对悬浮颗粒进行细致分类的偏振测量装置。此测量装置主要包括照明、样品池和探测三部分, 如图 1 (a) 所示。装置利用聚焦和偏振调制的 532 nm 激光照亮水中颗粒物; 在探测端利用针孔 (PH) 控制探测体积, 使得照明光路与探测光路交点的散射体积足够小, 从而实现单个悬浮颗粒物的偏振光散射测量; 自制的偏振态分析仪 (PSA) 结构如图 1 (b) 所示, 能够实现单颗粒散射光偏振态的同时检测, 极大地提高偏振态测量精度和效率^[48]; 悬浮单颗粒经过散射体积会产生一个脉冲信号, 如图 1 (c) 所示, 利用信号的偏振信息则可区分不同的颗粒物。

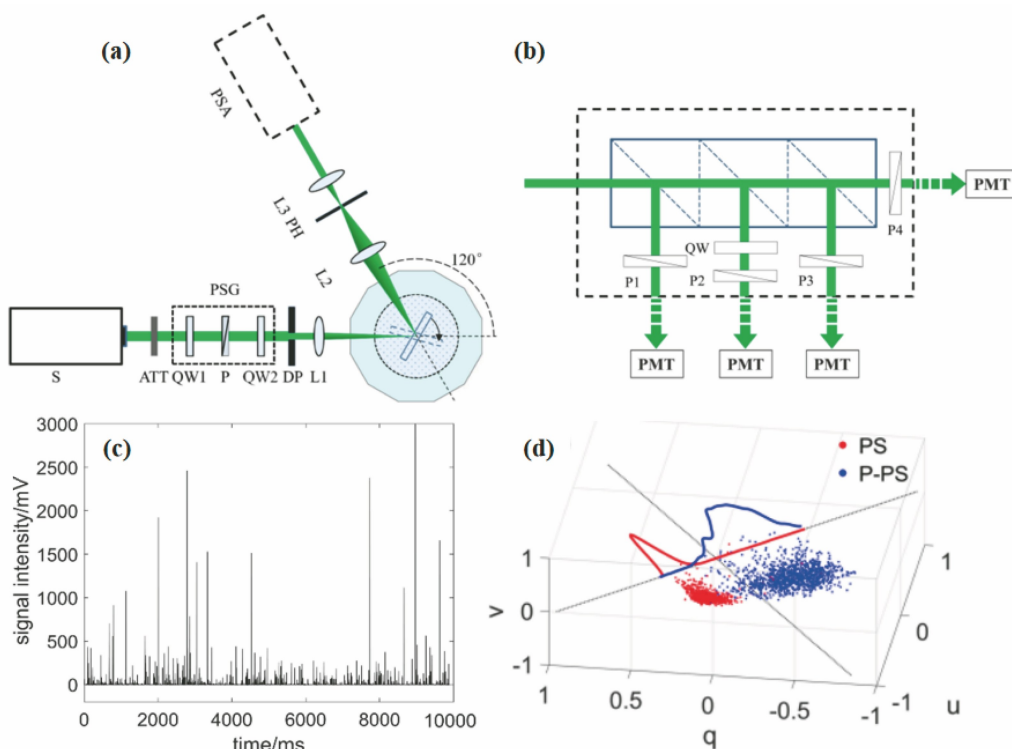


图 1 基于 120° 偏振光散射的悬浮颗粒物细致分类装置^[47]。(a) 实验装置的原理图; (b) 偏振态分析仪; (c) 悬浮颗粒物的脉冲信号; (d) 光滑和多孔聚苯乙烯的偏振参数分布

Fig. 1 Detailed classification device for suspended particles based on 120° polarized light scattering^[47]. (a) Schematic diagram of the experimental setup; (b) polarization state analyzer; (c) pulses of suspended particles; (d) polarization parameter distributions of smooth and porous polystyrene

图 1(d)展示了光滑聚苯乙烯(PS)和多孔聚苯乙烯(P-PS)的偏振参数分布差异。相比于 ECO BB 后向散射系数测量仪, ECO BB 是对水体中颗粒物进行非偏振光散射的体积测量,而本装置则是对水体中悬浮颗粒物的个体进行偏振光散射测量。测量标准藻种的偏振光散射数据,利用监督学习等方法可以实现对不同颗粒物的识别和细致分类。

3.3 单颗粒偏振光散射与荧光复合测量

一般浮游植物都具有叶绿素等色素,受激发后会发射出荧光;某些非生物颗粒、无机颗粒因不具有色素,不能发射荧光。通过特定的荧光探测方法获得颗粒物的荧光信息,可以有效地区分有机和无机颗粒,或可以区分色素含量不同的生物颗粒。在探测海洋

微型生物颗粒时,偏振参数可以有效地区分它们的微观结构差异,而荧光可以判别色素有/无以及比例,这有助于判断海水中颗粒物的生物/非生物属性。

Xiong 等^[49]在 2021 年提出同时测量单个颗粒物的偏振光散射和荧光的方法,光路原理和装置结构如图 2 所示。该方法进一步拓展了 Wang 等^[47]的偏振探测设计思路,实现了单颗粒偏振光散射和荧光的同时测量。将照明光源替换为 445 nm 的激光,以更好地激发叶绿素发射荧光,并在原有的偏振态分析仪上增加了荧光测量通道。偏振光散射和荧光信号都对应相同的单个颗粒物,散射光的偏振提供了颗粒物的微观结构信息,而荧光的波长和强度反映颗粒物色素的组成和含量。

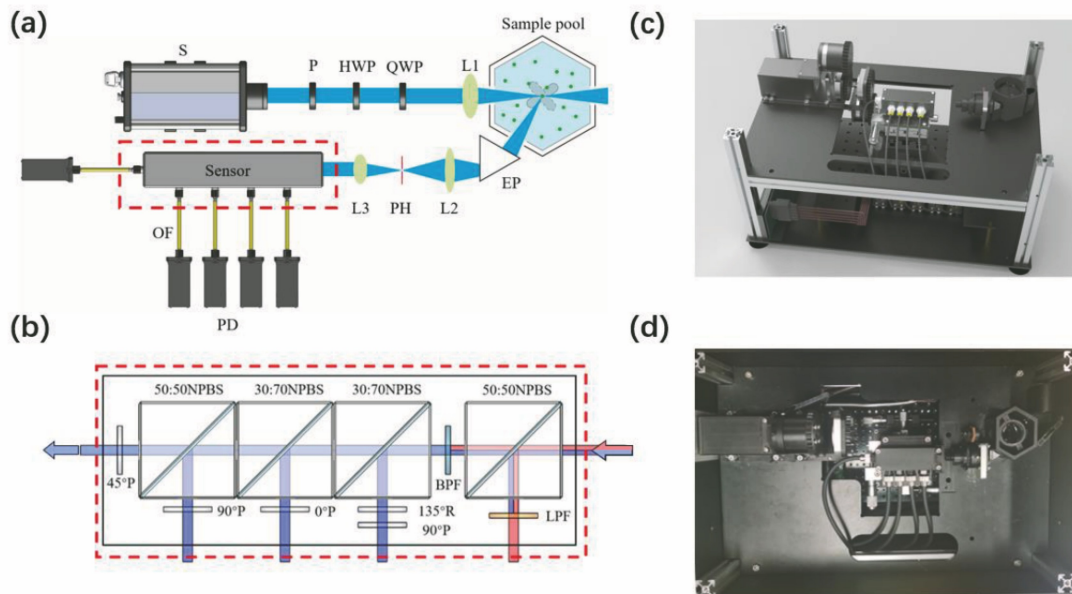


图 2 颗粒物偏振光散射和荧光同时测量装置^[49]。(a)实验装置的原理示意图;
(b)偏振态分析仪(Sensor);(c)三维建模图;(d)实物俯视图

Fig. 2 Simultaneous measurement of polarization scattering and fluorescence of particles^[49]. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) polarization state analyzer (Sensor); (c) three-dimensional model of the setup; (d) top view of the setup

颗粒物的偏振光散射和荧光的复合测量有利于区分水体中的非生物颗粒物和生物颗粒物,改善水体中颗粒物的分类效果。由于颗粒物的微观结构特征可能同荧光特征存在关联,两种光学检测模式的复合测量一方面可以改善细致分类的效果,另一方面也可以揭示两个不同测量方法和参数之间的关联,两者相互补充,为提升数据质量和价值提供了新的发展空间。

3.4 偏振光散射测量装置的算法改进和优化

悬浮颗粒的偏振数据中隐含着大量待开发、待挖掘的潜在信息,这些隐藏的信息能够为颗粒物的

分类和表征等提供重要支撑。如何挖掘这些潜在的偏振信息,是基于偏振光散射的颗粒物细致分类方法的关键研究方向。深度学习具有超强的非线性拟合能力,能够有效地获取隐藏在数据中的信息,完成对偏振数据特征的筛选和凝练,但是其可解释性相对较差。Guo 等^[50]发现,利用神经网络去分析、提取颗粒物的偏振光散射脉冲中的隐藏偏振信息时,对偏振光散射脉冲进行密集抽样的分类效果,将会显著优于对脉冲进行平均处理的分类效果。基于神经网络的偏振信息挖掘和提取能够显著地提升颗粒物的分类能力。

相比于斯托克斯测量来说, 缪勒矩阵测量可获得颗粒物更加完整的偏振信息, 并且其分类效果不受入射光偏振态的影响, 细致分类能力更强, 表征效果都更优。本文提出了一种关于悬浮颗粒物的统计缪勒矩阵计算方法^[51]; 基于单个颗粒物的斯托克斯测量, 获取多个不同偏振态光照射时颗粒物散射光的斯托克斯元素的均值和标准差, 从而进一步地计算出颗粒物的统计缪勒矩阵。统计缪勒矩阵能够指导照明光的偏振态选择, 同时能够增强不同颗粒物之间的分类效果。该研究显示, 单个悬浮颗粒物的缪勒矩阵快速测量有可能成为未来重要的研究发展方向。

3.5 偏振光散射技术的仪器化

在实验室的偏振光散射测量装置的基础上, 研制了可以放置于真实海水中对水体颗粒物进行实时监测的水下偏振探测仪^[52], 并在实验室和现场模拟测试中实现了对特定颗粒物散射光偏振态的同时测量和单个颗粒物的细致分类。水下偏振探测仪自带电池, 可以直接放置于水下, 实时地对水体颗粒物进行检测分析。仪器针对近岸、浅海和大洋等多种实际应用进行了多次的海上试验, 针对不同海域水体中不同颗粒物成分进行了长时间动态测量, 获得了大量宝贵数据。初步实验结果表明, 不同海域水体呈现出差异较大的偏振参数分布, 水下偏振探测仪展示出在复杂水体中颗粒物成分进行细致分类的能力。

水下偏振探测仪已经初步实现了仪器化和系列化, 可以针对不同水深实现海洋颗粒物的动态原位探测。水下偏振探测仪的模块化、标准化、小型化、智能化的工作也在同时进行, 并且基于上述测量原理和方法已经实现了陆上便携式仪器, 能够用于船上、浮标、岸基站, 以及陆上水文监测环境等。偏振散射水下颗粒物测量仪已经展示出广阔的应用前景。

4 海洋颗粒物原位细致分类的初步应用

4.1 海洋颗粒物细致分类与定量表征

偏振光散射技术可根据海洋颗粒物的光学和几何特征, 以及内部微观结构进行细致分类, 对不同颗粒物的分布和生消变化进行动态检测, 在很多海洋观测与研究领域都具有广阔的应用空间。根据前期研究的初步结果, 这里介绍几项已经显示出良好应用潜力的工作。

气囊是蓝藻细胞内部特有的生物结构, 调节气囊的状态可以实现细胞浮力的调整, 从而实现细胞在水柱中的垂直迁移^[53-54]。蓝藻细胞内部的气囊体

积增大是蓝藻水华暴发的常见过程^[55-56]。目前, 营养盐成分、二氧化碳含量、全球温度变化等都能够深刻地影响世界范围内蓝藻水华暴发的频率和强度^[54-56], 偏振信息能够定量地表征蓝藻细胞气囊的塌缩程度以及塌缩气囊随时间的再生过程^[57]。实时监测蓝藻细胞气囊状态变化可以为蓝藻水华动态监测和早期预警提供一种技术手段^[58], 如图 3 所示。超声处理是一种新型的、环境友好的蓝藻水华治理方法, 可以破坏蓝藻的细胞结构, 包括气囊、类囊体等^[59]。研究超声处理后的蓝藻细胞的偏振参数分布^[60-61], 获得用于表征超声处理后蓝藻细胞内微观结构变化的特异性偏振参数, 能够为超声治理蓝藻水华提供定量评估和指导意见。

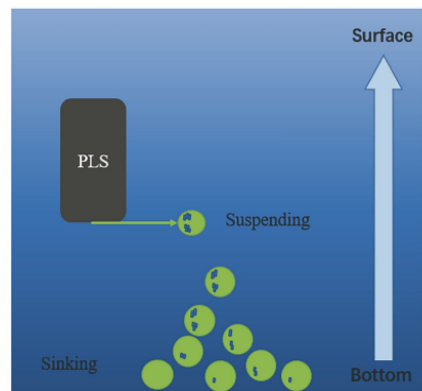


图 3 基于偏振光散射的蓝藻水华早期预警的新策略^[58]
Fig. 3 New strategies for early warning of cyanobacteria blooms based on polarized light scattering^[58]

微塑料已成为海洋中普遍存在的污染物, 其对海洋生态的危害引起了人们强烈的关注。生物颗粒与新型海洋污染物微塑料之间的相互作用对海洋环境生态及碳循环的影响不可忽视^[62], 对它们的变化情况进行实时、动态监测具有重要的现实意义。偏振光散射对附着不同纳米塑料含量的三角褐指藻有明显的不同反应, 有望提供一种研究海藻与微/纳塑料相互作用的新方法^[63]。基于偏振光散射的方法还可以特异性地识别具有不同物理化学性质的微塑料^[64], 为研究、监测水体微塑料的物理化学性质、风化状态和浓度等变化过程提供了一种新方法和工具。

絮凝是一种广泛存在于自然水体中颗粒凝结的现象, 其会使颗粒物之间发生相互关系, 从而影响水中颗粒沉积、水体成分动态变化。同时, 絮凝处理也是一种重要的水华应急处理方法, 可以用于去除水体中过度繁殖的藻类。利用偏振散射方法观测并表征藻类聚集过程, 可以获得定量指标, 用于监测藻类聚集的动态过程^[65], 为藻类聚集机理研究、藻华治

理效果评估等提供了一种非接触、无标记的方法。基于偏振光散射的方法还可以监测水体颗粒物的成分和浓度在絮凝过程中随着时间的变化^[66],是一种新型水体絮凝过程原位监测手段。

4.2 与其他海洋观测数据的复合测量与关联分析

偏振光散射技术不仅能够单独使用,用于了解水体中颗粒物的种类、组成成分和动态变化等信息,也可以同其他传统商业化的海洋探测仪器(如浊度计、多参数水质监测仪、声学多普勒流速剖面仪等)共同使用,用于针对同一块水体进行复合测量。利用数据技术(降维、聚类、深度学习等),可以将反映颗粒物细致分类信息的偏振参数与其他水体观测数据和指标(如叶绿素浓度、温度、盐度、深度、流速等)进行关联,发现不同参数之间的隐性关系,实现信息互补,提高对海洋的感知和认知能力。

5 总结与展望

关心海洋、认识海洋和经略海洋是建设海洋强国的必由之路,认识海洋是经略海洋的基本条件和基础保障。海洋过程时空覆盖广、影响因素多,涉及海洋物理、化学、生物等众多要素。长期以来,人们为认识海洋不断努力,发展了多种多样的海洋观测技术和仪器,并将其以不同的形式布放在海洋的不同地点和深度,以收集可能得到的各种类型信息。但人类认识复杂的海洋体系和海洋过程的能力仍然不足,还需要类型和数量更多、时空覆盖范围更广、精确度更高、相互之间关联性更强的观测数据。海洋颗粒物是海水里物质存在的一种普遍形式,是海洋生态系统的重要组成部分,它们在海洋中无时不在、无处不在,与海洋物理、化学、生物演变和地质变化等过程都有密切联系。海洋颗粒物数据同其他海洋观测方法所得到的信息相互关联。利用偏振光散射技术,可以定量获取各种海洋颗粒物的特征,实现颗粒物的细致分类和动态监测;利用海洋颗粒物与各种海洋过程的关联性,可以将颗粒物测量与其他海洋观测数据相互补充,发挥不同探测仪器和方法各自的优势;使基于不同定点和航次采样所得到的数据相互呼应,可以拓展有限观测数据的时空覆盖,提升数据质量和价值。

展望未来,海洋颗粒物的原位观测和细致分类,将增进人们对复杂海洋生态系统的认识和理解,提升海洋资源的开发和利用能力!海洋颗粒物原位细致分类方法,特别是基于偏振光散射的原位测量和数据分析方法前景广阔,未来发展方向包括以下几

个方面。

在测量技术方面,将进一步提升测量方法获取颗粒物特征的能力。目前围绕颗粒物偏振光检测的研究主要集中于对单波长(532 nm)、单角度(120°)的散射光偏振态的测量,即斯托克斯矢量。但颗粒物的偏振光散射特征同光的入射偏振态、光的波长和散射光角度都密切相关,全偏振、多波长、多角度的散射测量可以进一步提升颗粒物细致分类能力。例如:利用光弹、光电等快速偏振调制器件,可以在单个颗粒物通过照明区间的时间内改变入射光偏振态,获得缪勒矩阵及其所包含的完备偏振特征信息;记录多个角度的散射偏振态可以消除散射颗粒的空间取向对所得偏振特征的影响,获得单颗粒本身的物理特征信息,进一步提升偏振散射的识别能力;采用多波长实验不但能够进一步加强对颗粒物结构特征的识别能力,还有可能通过颗粒物在吸收系数上的差异获得其化学组成的信息。光学发展历史悠久,光学技术获得的信息丰富,利用不同物理作用机制和不同物理量光学测量方法可以从不同侧面获得悬浮颗粒的特征,进一步提升海洋颗粒物细致分类的能力。而随着光电技术、微纳光学、超材料等一系列相关领域的发展,微小型光源、光纤器件和传感器、波前和偏振调控器件、一维和二维探测器等各种新型光学单元不断出现,为研发小型化、低功耗探测模块创造了条件,利用这些新型光学单元可以针对不同应用场景、配合不同搭载平台,对水下颗粒物进行在线监测。

如何从海洋颗粒物测量得到的海量数据中获得认识海洋的有效信息,将是未来海洋颗粒物原位观测与应用的核心问题。利用机器学习和人工智能的各种数据分析和挖掘技术,可以从颗粒物偏振散射数据中获得其物理、化学和生物特征信息,实现颗粒物时空分布的细致分类。由于复杂介质中偏振光散射传播行为的物理机制已明晰,且相对完善的计算和模拟方法已建立,水下颗粒物偏振光散射数据具有比较强的可解释性,散射偏振特征可以与复杂颗粒物的光学性质(如折射率、吸收、双折射、二向色性等)、形态(粒径、形状、取向、排列、有序度等)和微观结构特征(表面形貌、内部亚结构,特别是亚波长层次超分辨结构)直接关联,并为区分不同颗粒物提供更加直观的信息。未来将可以从缪勒矩阵不断获得新的衍生偏振参数^[41],寻找其物理意义和对应的微观结构,对目标颗粒物进行定量识别和分类,甚至为目标

特征及其变化提供解释和溯源依据。

海洋颗粒物细致分类及其与其他海洋观测量之间的关联分析,能帮助人们获得复杂海洋体系的更多信息,提升认识海洋的能力。未来最重要的工作将是:针对不同的应用场景、不同的需求,发展水下颗粒物监测仪器设备,建立水下颗粒物偏振散射数据、算法、特征和分类数据库,以及相应的数据管理系统,充分实现颗粒物数据与其他水体理化指标的多源数据关联,提升现有观测数据的质量和和应用价值。由于海洋时空差异较大,需要建立起基于偏振光散射探测仪器的浮标观测网,与其他的测量仪器、浮标进行空间大尺度关联和立体尺度关联,包括卫星遥感、激光雷达、生物地球化学剖面浮标(BGC-Argo)等,从而扩大覆盖时空范围。由于基于单颗粒偏振光散射的海洋颗粒物测量数据量大,所含信息丰富,利用生成对抗网络等机器学习方法可以将颗粒物细致分类信息投影到与之相关的其他数据模式,并在其他测量数据缺失的情况下从颗粒物数据中恢复部分其他方法的测量信息,以最大限度地利用已有海洋观测数据提升认识复杂海洋体系和过程的能力。

最近,中国提出了“双碳战略”,确定了碳减排两个阶段的奋斗目标。海洋是地球上最大的活跃碳库,研究海洋碳汇过程,提升海洋碳汇能力,引领全球海洋碳汇检测、评估、计量、认证等标准的制定,是实现我国碳达峰碳中和目标所提出的新需求。海洋碳汇涉及多种碳形式,包括沉积物有机碳、颗粒碳、溶解有机碳和无机碳等,其中海洋颗粒物是海洋碳汇评估的重要指标之一,现迫切需要可靠的定量分类测量方法。利用偏振光散射和成像方法,可以实现海洋颗粒物的细致分类,区分无机和有机、生物和非生物、活体和残渣等不同类型的颗粒物,评估颗粒碳对海洋碳汇能力的影响;同时,利用颗粒物数据与其他海洋观测量的关联分析,可以探索海洋颗粒物参与海洋碳汇的多种机制,揭示影响海洋碳汇的不同因素,为形成海洋碳汇新指标提供理论依据和技术支撑。利用机器学习、深度学习等数据技术与方法,可以从颗粒物数据中挖掘出其他关联海洋观测量的信息,增加观测数据价值,发展能够同时表征不同形式的颗粒碳和不同活性的溶解碳的监测技术和评估指标,逐步形成能准确描述海洋碳汇潜力的指标体系。这些工作也将有助于推动海洋碳汇纳入国际碳减排谈判,并为拓展碳贸易市场和相关金融产业发展提供科技支撑。

参 考 文 献

- [1] Wang G F, Zhang Y X, Xu W L, et al. Estimation of phytoplankton pigment concentration in the South China Sea from hyperspectral absorption data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0601002.
王桂芬, 张银雪, 徐文龙, 等. 基于高光谱吸收的南海浮游植物色素浓度估算 [J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0601002.
- [2] Arrigo K R. Marine microorganisms and global nutrient cycles [J]. *Nature*, 2005, 437(7057): 349-355.
- [3] Brewin R J W, Sathyendranath S, Platt T, et al. Sensing the ocean biological carbon pump from space: a review of capabilities, concepts, research gaps and future developments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103604.
- [4] Kumari C R U, Samiappan D, R K, et al. Fiber optic sensors in ocean observation: a comprehensive review [J]. *Optik*, 2019, 179: 351-360.
- [5] Wang Y, Gao L. Sources and dynamics of suspended particulate matter in a large-river dominated marine system: contributions from terrestrial sediments, biological particles, and flocculation [J]. *Journal of Marine Systems*, 2022, 225: 103648.
- [6] Forero López A D, Truchet D M, Rimondino G N, et al. Microplastics and suspended particles in a strongly impacted coastal environment: composition, abundance, surface texture, and interaction with metal ions [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142413.
- [7] Mistri M, Scoponi M, Granata T, et al. Types, occurrence and distribution of microplastics in sediments from the northern Tyrrhenian Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 153: 111016.
- [8] Khalid N, Aqeel M, Noman A, et al. Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments [J]. *Chemosphere*, 2021, 264: 128541.
- [9] Zhao L C, Ru S G, He J L, et al. Eelgrass (*Zostera marina*) and its epiphytic bacteria facilitate the sinking of microplastics in the seawater [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 292: 118337.
- [10] Szeligowska M, Trudnowska E, Boehnke R, et al. The interplay between plankton and particles in the Isfjorden waters influenced by marine- and land-terminating glaciers [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146491.
- [11] Wang W C, Luo C H, Sheng L F, et al. Effects of biomass burning on chlorophyll-a concentration and particulate organic carbon in the subarctic North Pacific Ocean based on satellite observations and

- WRF-Chem model simulations: a case study [J]. Atmospheric Research, 2021, 254: 105526.
- [12] Liu H Z, Li Q Q, Bai Y, et al. Improving satellite retrieval of oceanic particulate organic carbon concentrations using machine learning methods [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 256: 112316.
- [13] 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.
- [14] Goodridge B M. The influence of submarine groundwater discharge on nearshore marine dissolved organic carbon reactivity, concentration dynamics, and offshore export[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 241: 108-119.
- [15] Zhang W C, Hu Y, Choi G, et al. Microfluidic multiple cross-correlated Coulter counter for improved particle size analysis [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 296: 126615.
- [16] Santos A I, Carinhas D, Oliveira A, et al. A statistical interpretation of acoustic backscatter and laser responses to suspended particle variations in the coastal shelf [J]. Marine Geology, 2021, 436: 106474.
- [17] Bowers D G. Optical techniques in studying suspended sediments, turbulence and mixing in marine environments [M] // Watson J, Zielinski O. Subsea optics and imaging. Amsterdam: Elsevier, 2013: 213-240.
- [18] Chen J X, Huang B Q, Liu X. The progress of *in situ* observation of marine plankton[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(5): 572-576.
陈纪新, 黄邦钦, 柳欣. 海洋浮游生物原位观测技术研究进展 [J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 572-576.
- [19] Liu Z D, Liao R, Ma H, et al. Classification of marine microalgae using low-resolution Mueller matrix images and convolutional neural network [J]. Applied Optics, 2020, 59(31): 9698-9709.
- [20] Sun H Y, Hendry D C, Player M A, et al. *In situ* underwater electronic holographic camera for studies of plankton [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(2): 373-382.
- [21] Kydd J, Rajakaruna H, Briski E, et al. Examination of a high resolution laser optical plankton counter and FlowCAM for measuring plankton concentration and size[J]. Journal of Sea Research, 2018, 133: 2-10.
- [22] Orenstein E C, Ratelle D, Briseño-Avena C, et al. The Scripps Plankton Camera system: a framework and platform for *in situ* microscopy [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2020, 18(11): 681-695.
- [23] Cheng Z, Zhao N J, Yin G F, et al. Identification of algae community discrete three-dimensional fluorescence spectrum based on SWTATLD[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1430001.
程钊, 赵南京, 殷高方, 等. 基于 SWTATLD 算法的藻类群落离散三维荧光光谱识别方法 [J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1430001.
- [24] Wang L J, Chen R, Zhuang H R, et al. FT-Raman spectra study of *platymonas subcordiformis* [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(1): 81-83.
王丽姜, 陈荣, 庄惠如, 等. 亚心形扁藻傅里叶变换近红外拉曼光谱 [J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(1): 81-83.
- [25] Lee Z P, Pahlevan N, Ahn Y H, et al. Robust approach to directly measuring water-leaving radiance in the field [J]. Applied Optics, 2013, 52(8): 1693-1701.
- [26] Beecraft L, Watson S B, Smith R E H. Multi-wavelength Pulse Amplitude Modulated fluorometry (Phyto-PAM) reveals differential effects of ultraviolet radiation on the photosynthetic physiology of phytoplankton pigment groups [J]. Freshwater Biology, 2017, 62(1): 72-86.
- [27] Bright C, Mager S, Horton S. Response of nephelometric turbidity to hydrodynamic particle size of fine suspended sediment [J]. International Journal of Sediment Research, 2020, 35(5): 444-454.
- [28] de Carvalho L A S, Barbosa C C F, de Moraes Novo E M L, et al. Implications of scatter corrections for absorption measurements on optical closure of Amazon floodplain lakes using the Spectral Absorption and Attenuation Meter (AC-S-WETLabs) [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 157: 123-137.
- [29] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, et al. Light scattering properties and their relation to the biogeochemical composition of turbid productive waters: a case study of Lake Taihu [J]. Applied Optics, 2009, 48(11): 1979-1989.
- [30] Sandven H, Kristoffersen A S, Chen Y C, et al. *In situ* measurements of the volume scattering function with LISST-VSF and LISST-200X in extreme environments: evaluation of instrument calibration and validity [J]. Optics Express, 2020, 28(25): 37373-37396.
- [31] Koji A, Reiko I, Atsuo F. The appearance of the high resolution & multi-well flow cytometer, and its applications [J]. Cytometry Research, 2008, 18(2):

- 7-14.
- [32] Adan A, Alizada G, Kiraz Y, et al. Flow cytometry: basic principles and applications[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(2): 163-176.
- [33] Laboratories M L. Imaging flowcytobot guides operational response for aquaculture farm [J]. *Environment Coastal & Offshore*, 2017, 5(7): 48-51.
- [34] Lin M S, He X Q, Jia Y J, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(10): 99-112.
林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 99-112.
- [35] Clavano W R, Boss E, Karp-Boss L. Inherent optical properties of non-spherical marine-like particles: from theory to observation[M]//*Oceanography and marine biology*. Boston: CRC Press, 2007: 1-38.
- [36] Blondeau-Patissier D, Gower J F R, Dekker A G, et al. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans [J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 123: 123-144.
- [37] He C, He H, Chang J, et al. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 194.
- [38] Hu H F, Li J Q, Li X B, et al. Underwater polarization difference imaging with three degrees of freedom [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0329001.
胡浩丰, 李嘉琦, 李校博, 等. 三自由度偏振差分水下成像技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0329001.
- [39] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: Wiley, 1983.
- [40] Liao Y B. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [41] Li P C, Dong Y, Wan J C, et al. Polaromics: deriving polarization parameters from a Mueller matrix for quantitative characterization of biomedical specimen[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(3): 034002.
- [42] 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.
- [43] Voss K J, Fry E S. Measurement of the Mueller matrix for ocean water[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(23): 4427-4439.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Xiong Z H, Wang H J, Li J J, et al. Probing individual particles in aquatic suspensions by simultaneously measuring polarized light scattering and fluorescence [J]. *Biosensors*, 2021, 11(11): 416.
- [50] Guo Z M, Deng H B, Li J J, et al. Optimized classification of suspended particles in seawater by dense sampling of polarized light pulses[J]. *Sensor*, 2021, 21(21): 7344.
- [51] Li J J, Wang H J, Liao R, et al. Statistical Mueller matrix driven discrimination of suspended particles [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3645-3648.
- [52] Liao R, Li Q, Mao X Z. A prototype for detection of particles in sea water by using polarize-light scattering[C]//*OCEANS 2019-Marseille*, June 17-20, 2019, Marseille, France. New York: IEEE Press, 2019: 19060892.
- [53] 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.
- [54] Oliver R L, Walsby A E. Buoyancy and suspension of planktonic cyanobacteria [J]. *Methods in Enzymology*, 1988, 167: 521-527.
- [55] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, et al. Cyanobacterial blooms [J]. *Nature Reviews. Microbiology*, 2018, 16(8): 471-483.
- [56] Capone D G, Zehr J P, Paerl H W, et al. *Trichodesmium*, a globally significant marine cyanobacterium [J]. *Science*, 1997, 276(5316): 1221-1229.

- [57] 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.
- [58] Wang H J, Li J J, Liao R, et al. Early warning of cyanobacterial blooms based on polarized light scattering powered by machine learning [J]. *Measurement*, 2021, 184: 109902.
- [59] Rajasekhar P, Fan L H, Nguyen T, et al. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms[J]. *Water Research*, 2012, 46(14): 4319-4329.
- [60] 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.
- [61] Li J J, Zou C J, Liao R, et al. Characterization of intracellular structure changes of *Microcystis* under sonication treatment by polarized light scattering[J]. *Biosensors*, 2021, 11(8): 279.
- [62] Prata J C, da Costa J P, Lopes I, et al. Effects of microplastics on microalgae populations: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 400-405.
- [63] Yu S J, Dai J C, Liao R, et al. Probing the nanoplastics adsorbed by microalgae in water using polarized light scattering [J]. *Optik*, 2021, 231: 166407.
- [64] Liu T, Yu S J, Zhu X S, et al. *In-situ* detection method for microplastics in water by polarized light scattering[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 739683.
- [65] Li J J, Liao R, Zhuo Z P, et al. Monitoring of algal flocculation using polarized light scattering [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(1): 72-80.
李嘉晋, 廖然, 卓泽鹏, 等. 利用偏振光散射技术的藻类絮凝过程监测[J]. *大气与环境光学学报*, 2020, 15(1): 72-80.
- [66] Chen Y, Liao R, Li J J, et al. Monitoring particulate composition changes during the flocculation process using polarized light scattering [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(32): 10264-10272.