

# 光学学报

## 复杂海况下海洋生态环境多维度光学监测方法

史浩东<sup>1</sup>, 王稼禹<sup>1</sup>, 李英超<sup>1</sup>, 付强<sup>1</sup>, 马毅<sup>2</sup>, 朱京平<sup>3</sup>, 李树涛<sup>4</sup>, 马岩<sup>5</sup>, 姜会林<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

<sup>3</sup> 西安交通大学电子科学与工程学院, 陕西 西安 710049;

<sup>4</sup> 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

<sup>5</sup> 中国人民解放军 63921 部队, 北京 100000

**摘要** 针对溢油、赤潮等典型海洋生态环境污染和灾害, 传统监测手段在海雾、耀斑、复杂光照等复杂海况干扰下存在“看不远”“辨不出”“认不清”三大难题。通过对比多种光学监测手段的优缺点, 提出“光谱+偏振+红外探测”的多维度光学监测方法, 梳理了典型海洋目标多维特性生成、传输、获取、处理与识别反演方法的现状与不足, 提出了海洋目标多维度光学信息获取机制、复杂海况下多维度光学特性生成机理和传输演化机理、海洋目标多维度高分辨信息解混、重构与增强方法, 以及目标识别反演方法等 5 个重点发展方向, 指明了技术路线和解决途径, 设计了多维度光学监测系统总体方案。最后, 在室外开展了 5 种溢油种类、2 种赤潮优势种的定性和定量化可控试验, 利用偏振探测实现了油种的分类和赤潮优势种的区分, 这为机载多维度高分辨海洋光学监测系统的深入研究与应用奠定了基础。

**关键词** 大气光学; 多维度; 溢油; 赤潮; 光学监测

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0600004

## Multi-Dimensional Optical Monitoring Method of Marine Ecological Environment Under Complex Sea Conditions

Shi Haodong<sup>1</sup>, Wang Jiayu<sup>1</sup>, Li Yingchao<sup>1</sup>, Fu Qiang<sup>1</sup>, Ma Yi<sup>2</sup>,  
Zhu Jingping<sup>3</sup>, Li Shutao<sup>4</sup>, Ma Yan<sup>5</sup>, Jiang Huilin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Optoelectronic Technology of Jilin Province, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao, Shandong 266061, China;

<sup>3</sup> College of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

<sup>4</sup> College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

<sup>5</sup> Chinese People's Liberation Army 63921, Beijing 100000, China

**Abstract** Traditional monitoring methods for typical marine pollution and disasters such as oil spill and red tide have three major problems. Firstly, the detection distance is reduced by sea fog. Secondly, the distinguishing ability is reduced by flare. Thirdly, the recognition ability is reduced by stray light. In this paper, by comparing the advantages and disadvantages of various optical monitoring methods, a multi-dimensional optical monitoring method of combining spectrum, polarization, and infrared detection is put forward. The current research status and shortcomings of inversion methods for generation, transmission, acquisition, processing, and identification of multidimensional characteristics of typical ocean targets are analyzed. Five important development directions

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-01-21; 录用日期: 2022-01-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61890960)

通信作者: \*cclgdxkjs@163.com

including the acquisition mechanism of multidimensional optical information of ocean targets, the generation mechanism and transmission evolution mechanism of multi-dimensional optical characteristics under complex sea conditions, the decomposition of multi-dimensional high-resolution information of ocean targets, the reconstruction and enhancement methods, and the multi-dimensional high-precision recognition and inversion methods of ocean targets are proposed, and the technical route and solution are pointed out. Then, the multi-dimensional optical monitoring system is designed. Finally, qualitative and quantitative controlled tests for five kinds of oil spill and two kinds of dominant species of red tide are carried out in outdoor. The oil species and dominant species of red tide are classified by using polarization detection. This experiment laid a foundation for further research and application of airborne multi-dimensional high-resolution ocean optical monitoring systems.

**Key words** atmospheric optics; multi-dimension; oil spills; red tides; optical monitoring

## 1 引言

近年来,我国海洋环境安全问题突出,以海面溢油、赤潮为代表的突发事件、生态灾害频发,严重危害我国海洋生态环境安全、阻碍海洋经济的健康发展,因此对溢油和赤潮进行精准监测迫在眉睫,意义十分重大!长期以来,国内外开展了大量海洋环境精细化立体监测技术和方法研究,以期海洋灾害评估及修复提供技术支撑。在溢油监测方面,美、德、英、俄等多个国家均具备机载、星载合成孔径雷达(SAR)的溢油监测能力<sup>[1]</sup>。近年来,研究人员更加注重将各种平台传感器(MERIS、MODIS、MISR、Landsat 和 AVIRIS)获取的多源光学遥感数据进行整合,并对溢油的空间和光谱进行比对分析<sup>[2]</sup>。我国初步具备了星载、机载 SAR 和高光谱的溢油遥感能力,近年来围绕溢油的光谱、红外、紫外以及偏振等探测技术开展了研究<sup>[3-6]</sup>。在赤潮监测方面,国外开发出多种平台的赤潮遥感装备并得到广泛应用<sup>[7-10]</sup>。国内近年来发展了多种基于赤潮光谱特征的识别反演方法<sup>[11-12]</sup>,这有助于中高分辨率的星载赤潮光谱遥感数据的应用<sup>[13-18]</sup>。然而,受海洋环境的复杂性和高动态性,以及云雾和海面耀斑的影响,光谱遥感往往存在因光照复杂而“认不清”、因耀斑干扰而“辨不出”、因海雾遮挡而“看不远”的难题,这严重影响溢油种类、赤潮优势种等重要指标的精准监测,且难以反演油膜厚度和赤潮生物量<sup>[19]</sup>。为此,亟须发展复杂海洋环境下海洋目标新型光学监测技术,以破解溢油、赤潮的精准监测难题。

研究发现,偏振对油膜与海水的差异敏感,对不同油种和不同油膜的厚度有响应<sup>[20-21]</sup>,而且偏振对赤潮藻种的结构以及生物量的变化也较为敏感。更重要的是,偏振探测具有“凸显目标”“抑制耀斑”“穿云透雾”的能力,可显著提升目标的探测效能;另外,利用溢油和海水的温度差异以及赤潮生物的趋

温特性,高灵敏长波红外探测技术在海洋环境监测领域也大有可为<sup>[22-23]</sup>。因此,将光谱、偏振、红外三者结合,同时获取强度、光谱、偏振,以及辐射等多维度光学信息,在发挥光谱识别反演方面优势的同时,还可大幅提高目标的成像对比度和检测精度,这有望解决复杂海洋环境下溢油、赤潮的精准监测难题。为此,本团队针对上述“认不清”“辨不出”“看不远”的难题,提出采用“光谱+偏振+红外探测”三合一的多维度海洋目标精准监测方案,重点突破多维高分辨信息获取机制、目标多维特性生成机理、多维特性传输演化机理、多维图像重构增强方法,以及多维光学遥感识别反演方法等 5 个研究方向,以期提升复杂海况下溢油种类、赤潮生物优势种反演精度等能力,为海洋灾害的应急响应提供新型技术支撑。

## 2 海洋目标多维度光学监测方法

### 2.1 海洋目标多维度高分辨信息获取机制

从 21 世纪初开始,美国等一些国家开始研究液晶相位延迟器型(LCVR)光谱偏振成像机制。近 10 年来,国外学者提出了计算层析型(CTIS)<sup>[24]</sup>、偏振光栅型、声光可调滤光器型(AOTF)和调制型<sup>[25-26]</sup>等多种光谱偏振成像机制,促进了多维度探测能力的不断提高。2021 年,北卡罗来纳州立大学开发了一种新型仿生有机光电传感器,该器件可同时记录 4 个光谱通道和 3 个偏振通道<sup>[27]</sup>。表 1 给出了国外光谱偏振一体化成像的代表性仪器的性能参数对比。

国内从 2005 年之后开展光谱偏振成像机制的研究。北京航空航天大学、西北工业大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、南京理工大学、哈尔滨工业大学等单位在液晶或声光可调滤波器型、光栅色散型、调制型和快照型偏振光谱成像技术方面获得了一批有特色的研究成果<sup>[28-32]</sup>。近年来,干涉型偏振光谱成像技术具有小型化、低功耗、单探测器接收等优点,成为国内学者的研究热点。国内光谱偏振一体化成像代表性仪器参数如表 2 所示。

表 1 国外光谱偏振一体化成像的代表性仪器的性能参数对比

Table 1 Performance parameters of representative instrument abroad for spectral polarization integrated imaging

Type	Core component	Year	Country	Spectral range / $\mu\text{m}$	Spectral resolution	Polarization component
Acousto-optic tunable filter	AOTF+LCVR	2014	USA	0.45–0.8	5 nm	4
				1.0–1.6	15 nm	4
Liquid crystal tunable filter	LCTF+LCVR	2002	Italy	0.4–0.8	5 nm	3
	LCTF+quarter wave plate	2009	USA	0.4–0.8	10 nm	4
Fractional amplitude	Holographic grating	2007	Bulgaria	0.52–0.75	12 nm	4
Computed tomography	CTIS	1999	USA	0.44–0.74	20 nm	4
	Advanced secondary slide+polarizer	2005	USA	0.4–0.72	10 nm	4
Grating dispersion	Polarization grating+wave plate	2010	USA	0.5–0.7	4 nm	4
Channel modulation	Birefringent device	2011	USA	1.5–5.0	46 $\text{cm}^{-1}$	3
	Birefringent device	2014	USA	0.4–0.85	555 $\text{cm}^{-1}$	4
	Photonic crystal filter array detector	2018	Japan	0.42–0.72	10 nm	3
Snapshot	Bionic spectrum and polarization sensor of mantis shrimp	2021	USA	0.4–0.75	24 nm	3

在红外偏振一体化探测技术研究方面,国外从传统的旋转偏振片方式向声光可调谐滤波器方式,再到基于微偏振片阵列的分焦平面方式发展,其探测谱段范围覆盖了短波、中波和长波红外,具备较强的穿云透雾和凸显目标能力。国内在红外偏振探测技术研究方面的起步相对较晚。昆明物理研究所、北方广微科技有限公司、烟台艾睿光电科技有限公司、北京理工大学、上海技术物理研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,以及国防科技大学等单位针对红外偏振成像技术和器件开展了较为深入的研究。近年来研究人员研发出非制冷长波红外偏振探测器件,加快了红外偏振技术在军事领域的应用。目前国内正在开展制冷型分焦平面红外偏振器件的技术攻关,以期提升红外偏振成像的灵敏度、增大作

用距离<sup>[33-35]</sup>。

将多维信息获取机制应用到海洋目标监测领域仍面临两方面的挑战:1)由于溢油、赤潮等浮于海面之上随海浪不断变化,只有获取的多维度信息实现时空精准匹配才能实现多维信息的有效融合,因此需要发展同视场、同口径、同探测器偏振光谱一体化获取的多维信息获取机制;2)为了获取更多谱段的海洋目标特征信息,需要同时获取可见近红外以及长波红外的多谱段图像,因此设计宽谱段的成像系统方案,将可见近红外光谱偏振成像与长波红外偏振成像进行系统匹配,实现两类图像有机融合、高效互补是亟须解决的难题。

针对上述难题,本团队提出“光谱、偏振、红外探测”一体化的海洋目标多维度高分辨信息获取机制,如图1所示。利用高保偏分光片进行可见近红外和

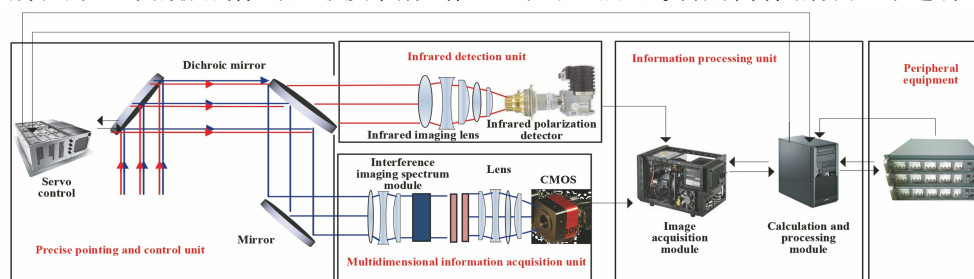


图 1 海洋目标多维度高分辨信息获取机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acquisition mechanism of multi-dimensional high-resolution information of marine targets

表 2 国内典型光谱偏振一体化成像的代表性仪器性能参数

Table 2 Performance parameters of national representative instrument for spectral polarization integrated imaging

Type	Core component	Year	Institute	Spectral range / $\mu\text{m}$	Spectral resolution	Polarization component
Acousto-optic tunable filter	AOTF+LCVR	2015	North University of China	0.45-0.7	10 nm	3
	AOTF+LCVR	2015	Harbin Institute of Technology	0.4-0.8	2.5 nm	3
	AOTF+LCVR	2017	North University of China	0.4-0.75	5 nm	4
	AOTF+LCVR	2018	PLA Army Academy of Artillery and Air Defense	0.45-0.95	2-8 nm	3
Liquid crystal adjustable filter	LCTF	2009	Northwestern Polytechnical University	0.4-0.72	10 nm	3
	LCTF	2016	Xi'an Technological University	0.4-1.0	0.5 nm	3
Grating dispersion	Grating	2015	Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences	0.4-1.0	20 nm	3
	Advanced wave plate+grating	2017	Lanzhou Institute of Physics	0.4-1.0	10 nm	3
	Wollaston	2009	Xi'an Jiaotong University	0.4-0.96	180 $\text{cm}^{-1}$	4
	Sagnac	2011	Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics	0.58-0.68	800 $\text{cm}^{-1}$	3
Modulation	Birefringent device	2014	Zhejiang University	0.4-0.8	3 nm	4
	Savart+ferroelectric liquid crystal (FLC)	2019	Nanjing University of Science And Technology	0.45-0.95	1.88-8.39 nm	4
	Polarization spectral intensity modulation (PSIM)	2019	Changchun University of Science and Technology	0.4-1.0	2-3 nm	3
	Birefringent device+FLC	2019	Nanjing University of Science and Technology	0.45-1.0	5 nm	4
Snapshot	Line surface conversion fiber+micro polarization array detector	2020	Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity	0.43-0.63	1 nm	3

长波红外分光,其中:可见近红外光路采用静态无源干涉光谱偏振图像获取方法实现时空精准匹配,通过单光路、单探测器同时获取目标的光谱与偏振信息;长波红外光路采用金属线栅偏振片成像方法获取长波红外偏振信息。通过对可见近红外信息进行图像融合与处理,得到目标的光谱、偏振、红外信息,从而实现海洋目标的高分辨率、高对比度成像。

## 2.2 复杂海况下目标偏振光谱红外特性生成机理

国内外学者在海洋目标偏振光谱红外特性方面,主要开展了溢油光谱、荧光、红外、偏振等多维度光学散射特性分析,建立了部分溢油种类识别的数值经验模型。针对溢油,研究人员主要开展了光谱、荧光光谱、红外、偏振等光学散射特性研究<sup>[36-37]</sup>,通过对不同光学探测手段获得数据的研究分析,归纳总结了溢油在各个光学信息维度上的散射特性规律,建立了溢油探测识别的数值经验模型,实现了对特定探测数据的解释。针对赤潮,研究人员主要开

展了光谱及红外特性研究<sup>[38-39]</sup>,通过实验测试及光谱遥感数据分析,发现赤潮水体存在谱段吸收峰、反射峰等光谱及红外特性规律<sup>[40-41]</sup>,建立了赤潮监测、生物量反演模型<sup>[42-43]</sup>。

但是,复杂海况条件下:油膜偏振特性不明确,轻质油种类无法分辨;赤潮生物反演特性不明确,生物优势种无法判别。因此,掌握复杂海况条件下油膜光滑面元偏振光谱反射辐射机理和藻粒海水散射与透射的偏振耦合机理成为提升目标识别反演精度的理论基础和前提。针对上述问题,可以通过开展室内外溢油、赤潮样本偏振光谱红外特性测试,在归纳总结溢油、赤潮多维光学特性的基础上,构建复杂光场作用下的溢油、赤潮偏振光谱红外反射散射特性模型,分析多维光学特性随材质属性、油量、生物量、入射光场、观测角度等参量的变化规律,从而掌握海面油膜反射及水下赤潮散射特性耦合机理。溢油和赤潮的建模流程分别如图 2 和图 3 所示。

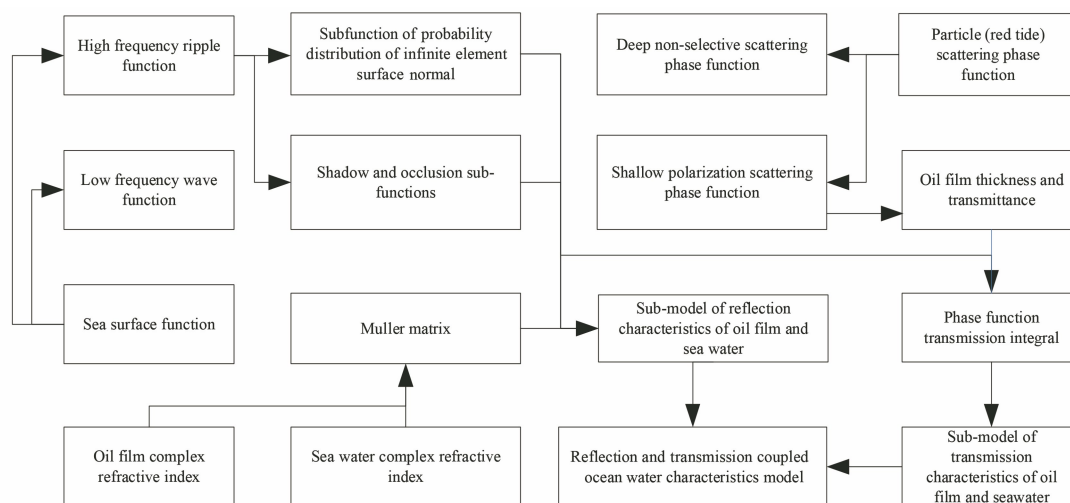


图 2 溢油油膜的建模思路

Fig. 2 Modeling method of oil spill film

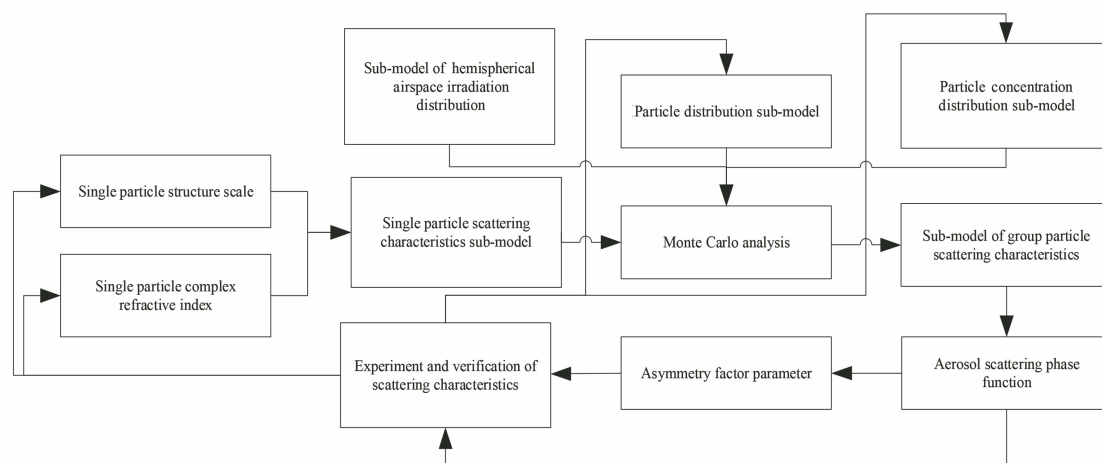


图 3 赤潮粒子的建模思路

Fig. 3 Modeling method of red tide particles

### 2.3 复杂海雾介质中偏振红外特性传输演化机理

海面海雾、水汽及复杂光场对目标偏振红外特性传输的影响很大。国内外学者在对气溶胶粒子对偏振、光谱、红外多维信息散射特性的影响因素进行了广泛研究,其难点在于粒子形状的描述以及对散射过程的数值计算。气溶胶粒子用回转对称的椭球体来描述,相比于用球形粒子来描述更接近自然界中粒子的真实情况,且用回转对称的椭球体来描述时对粒子的描述范围更为广泛。目前所用到的计算方法主要有有限差分域法(FDTD)、分离变量法(SVM)<sup>[43]</sup>、点匹配法(PMM)<sup>[44]</sup>、离散偶极子近似(DDA)<sup>[45]</sup>以及 T-矩阵等方法<sup>[46]</sup>;另外,学者们还建立了室内云雾大气模拟实验平台、烟雾环境模拟实

验平台,在室内及野外烟尘环境进行了偏振光传输实验<sup>[47]</sup>。

但目前的研究仅局限于室内均匀介质和球形、各向同性的粒子。而真实海况条件下,从海面向上的多层传输介质是非均匀的,其中的颗粒一般呈现为非球形、非各向同性。这就需要对海雾环境进行分类分级描述和定量表征,根据不同波长的偏振光与粒子相互作用时的反射、散射特征,建立了非球型、非均匀、非各向同性(简称“三非”)条件下不同波长偏振光与非球形、非各向同性的单一和多种海雾粒子的散射模型,从而揭示复杂海雾介质中偏振红外特性传输演化机理。模型仿真流程如图 4 所示。

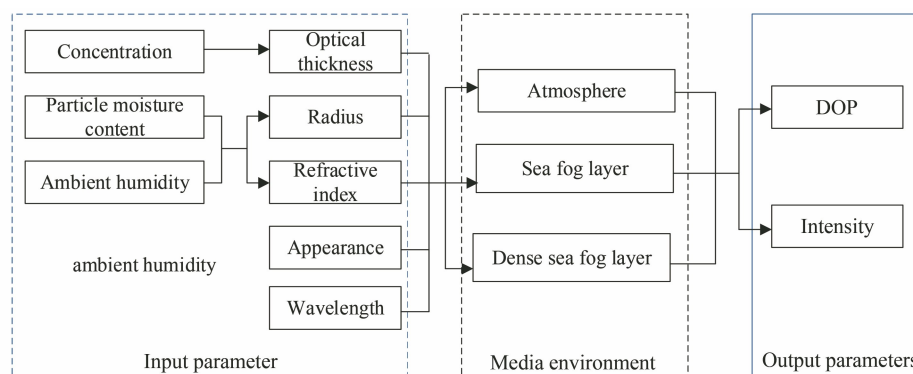


图 4 “三非”环境偏振传输模型仿真流程

Fig. 4 Simulation process of polarization transmission model in "three-nons" environment

## 2.4 海洋多维度高分辨图像精确重构与增强方法

受环境和设备本身的影响,海洋监测成像设备获取的图像产生退化现象。这些图像退化主要包括图像获取过程中的噪声干扰、海雾导致的图像对比度下降、耀斑导致的局部信息丢失等。图像重构与增强的目的是去除这些干扰因素对图像的影响,提升图像质量。近年来,国内外学者针对复杂海况下图像的增强主要开展了图像去噪、去雾、去耀斑的复原重构方法等方面的研究<sup>[48-54]</sup>。在图像去噪方面,学者们已提出多种图像去噪方法,主要分为空间域滤波、变换域滤波和基于学习的方法。空间域滤波方法主要利用图像空间相关性和非局部相似性等特性,在去除噪声的同时尽量保持图像边缘、纹理等重要结构信息,包括双边滤波、引导滤波和非局部均值滤波等经典方法<sup>[55]</sup>;变换域滤波通过线性或非线性变换,将图像映射到新的特征空间,使得图像内容和噪声成分响应更易区分,通过抑制噪声成分和进行反变换来去除噪声<sup>[56]</sup>。基于学习的方法主要是通过在线或者离线学习算法获得图像内容的准确表征模型,将噪声成分作为模型表示误差,通过学习到的模型重构无噪声图像,主要包括稀疏表示方法<sup>[57]</sup>、低秩分解方法<sup>[58]</sup>和深度学习方法<sup>[59]</sup>等。在图像去雾方面,现有研究主要针对自然场景可见光图像的雾霾去除,包括基于图像增强的去雾方法、基于光散射模型的方法和基于偏振成像的方法<sup>[60]</sup>。基于图像增强的去雾方法通过应用已有的图像增强技术,提高图像对比度和整体亮度,补偿图像色彩信息损失,达到突出图像中感兴趣区域的效果。然而,图像增强类方法作为一种通用型的图像处理方法,没有考虑雾霾导致的图像退化原理,处理过程中可能造成信息损失。在图像去耀斑方面,图像增强类方法根据待修复区域周围的图像内容特点和图像统

计特性,复原丢失的图像信息,使修复区域可以自然融入周围图像,典型的方法有信息扩散方法、纹理合成方法<sup>[61]</sup>和模型填充法<sup>[62]</sup>等。

但是,海雾耀斑干扰影响因素众多,导致多维图像退化模型建立困难;同时,利用多维度光学监测系统获取的多维高分信息发生混叠,导致图像重构模型难以精准建立。因此,建立生成-传输-获取全链路的图像退化模型、目标先验约束的多维图像解混重构方法,以及海洋目标特性图像融合增强方法显得尤为重要。针对上述问题,在溢油、赤潮等海洋目标的多维特性和成像机制研究基础上,可以通过构建光谱偏振信息混叠模型,优化设计解混框架,形成对抗网络的多维高分信息解混方法,综合利用多维度互补特性和多维先验知识,有望实现海洋多维度高分辨图像的解混、重构与增强。技术路线如图 5 所示。

## 2.5 海洋弱目标多维高分光学遥感识别与反演方法

溢油的检测涉及快速锁定溢油事故责任方,误识别会造成无主海面溢油,造成索赔主体缺失,海洋生态环境赔偿诉讼就无法开展。油种识别是溢油遥感的研究难点,主要是利用不同种类油膜的高光谱特征进行识别。近年来,学者们构建了一个包含不同海拔高度和地理位置溢油图像的数据集,并对多种神经网络方法进行训练。结果表明,采用迁移学习模型进行溢油分类的精度为 92%<sup>[63]</sup>。赤潮生物优势种含有独特的附属色素,目前均以待识别光谱和参考光谱的相似性为度量识别优势种<sup>[64-67]</sup>。学者们提出一种结合辐射传输模型的高光谱反演算法,用于区分内陆水域的蓝藻和有害藻华<sup>[68]</sup>。学者们还提出了一种基于高光谱遥感数据的机器学习方法,成功地预测出长江口赤潮爆发的优势种及其空间分布。深度学习的成功应用为研究学者提供了新的研究角度,进一步推进了赤潮优势种的自动识别发展<sup>[69]</sup>。

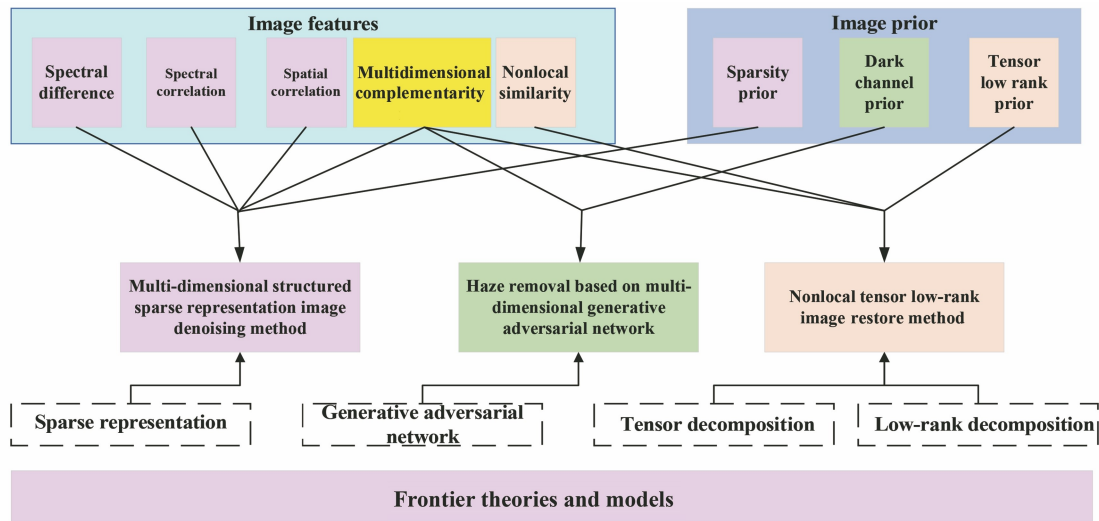


图 5 多维高分辨图像重构与复原方法研究技术路线

Fig. 5 Technical route of research on multi-dimensional high-resolution image reconstruction and restoration methods

但轻质油多维特征的提取方法欠缺,导致轻质油种类识别困难;赤潮生物反演参数模型欠缺,导致赤潮优势种难以判别。为此,针对溢油,通过综合利用高光谱、偏振和红外数据,提取溢油和海水多维度特征差异,建立多维度光学特征的溢油非监督检测模型和深度学习监督检测模型,实现

溢油种类识别。针对赤潮,通过提取赤潮水体与正常水体的多维度特征信息、构建赤潮生物优势种的多维光学特征数据集( $f_1 \sim f_m$ )、发展多核支持向量机分类器识别方法,有望实现赤潮优势种的高精度识别。多核( $K_1 \sim K_n$ )支持向量机识别框架如图 6 所示。

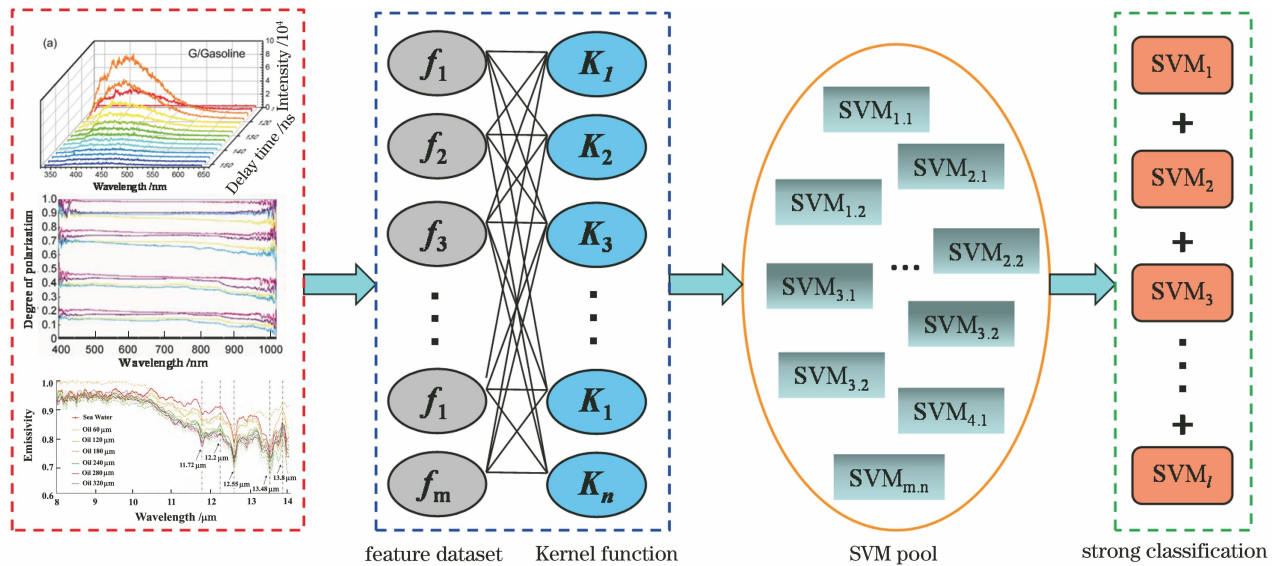


图 6 多核支持向量机识别框架

Fig. 6 Multi-core support vector machine recognition framework

综上所述,通过开展海洋目标多维高分辨监测理论与方法的研究,有望提升海洋溢油和赤潮的监测能力与水平。

### 3 海洋目标多维光学监测总体方案

#### 3.1 系统架构

本团队提出基于机载平台的海洋监测多维高分

辨光学成像系统总体方案。系统由精准指向及控制单元、红外探测单元、多维信息获取单元、海量信息处理单元等组成(图 7)。其中:精准指向及控制单元完成系统的稳定跟踪以及快速响应;红外探测单元用于获取目标的长波红外偏振图像;多维信息获取单元采用静态干涉光谱偏振成像技术同时获取目标的偏振、光谱、近红外图像信息;海量信息处理单

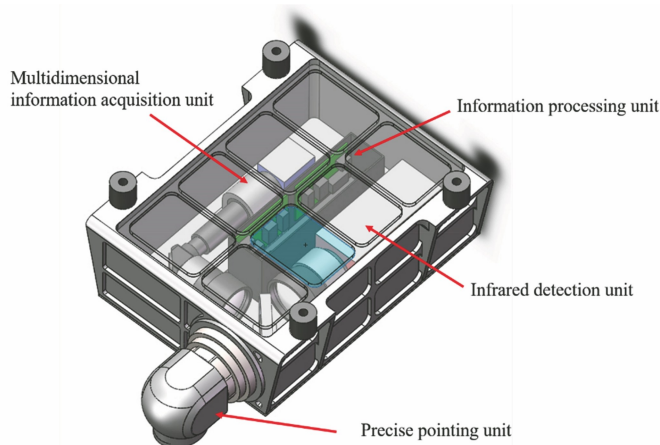


图 7 系统组成示意图

Fig. 7 Schematic diagram of system composition

元完成图像的解混、重构与增强。

### 3.2 光谱偏振信息获取方案

多维信息获取单元由广角宽波段保偏前置光学模块、滤光模块、静态 Stokes 相位调制模块、干涉分光模块、成像模块和可见近红外探测器组成。多维信息获取单元形成目标的光谱偏振超数据立方体,包括目标的二维图像信息、光谱信息,以及每个光谱对应的偏振信息,如图 8 所示。图像信息反映目标形貌特征;光谱信息反映目标的种类、材质、物质组成及状态;偏振信息反映目标轮廓、表面粗糙度、水体浓度等特征。该方案为海洋溢油和赤潮监测提供了更加丰富的信息,有望提升溢油种类、赤潮优势种等要素的识别精度。

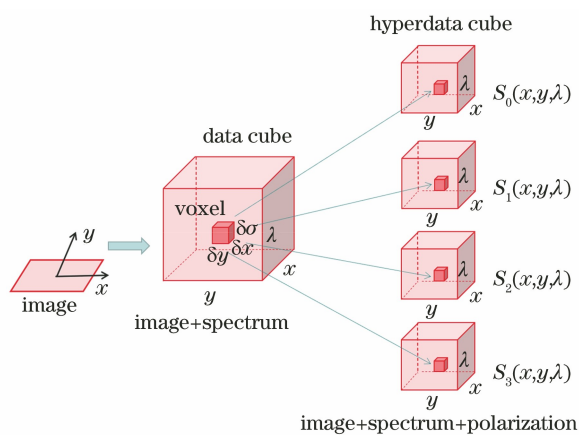


图 8 光谱偏振超数据立方体

Fig. 8 Spectral polarization hyperdata cube

### 3.3 红外偏振信息获取方案

鉴于海洋的高动态特性,红外偏振信息获取单元采用红外分焦平面偏振成像方式(图 9),每个像元代表一个偏振方向,像元内线条表示金属光栅,其与  $x$  轴正向夹角表示偏振方向,可同时获取  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、

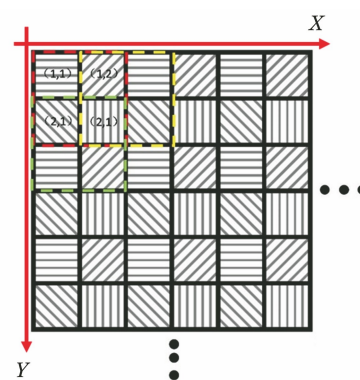


图 9 分焦平面红外偏振成像单元

Fig. 9 Infrared polarization imaging unit for sub-focal plane  $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 这 4 个偏振方向的红外偏振信息,根据探测器输出电压值计算 4 个像素灰度值,采用嵌入式处理系统即可实时解算出偏振度、偏振角信息。该方案可实现复杂动态海洋条件下的目标多维弱辐射信号提取,有助于溢油种类、赤潮优势种的识别与反演。

## 4 试验

为验证偏振探测手段对溢油和赤潮的识别能力,本团队在青岛近海海水池开展了多次外场围格试验,获取了 5 种溢油种类和 2 种赤潮优势种的偏振数据,通过试验初步验证了偏振探测对油种和赤潮优势种的区分效果,该试验为后续开展偏振光谱多维度一体化监测提供了数据基础和依据。

### 4.1 溢油偏振探测试验

选取原油、重油、棕榈油、柴油、汽油等 5 种海洋常见溢油作为待测样品,油品特性如表 3 所示。

将不同油种样品分布于九宫格内,将海水作为比对样品置于九宫格中心区域,每个小格面积约为  $1 \text{ m}^2$ ,分布方式如图 10 所示。



表 3 样品参数  
Table 3 Sample parameters

No.	Oil sample	Density / (g · mL <sup>-1</sup> )
1	Fuel	0.821
2	Palm oil	0.836
3	Crude oil	0.824
4	Seawater	1.025
5	Gasoline	0.737
6	Diesel oil	0.835

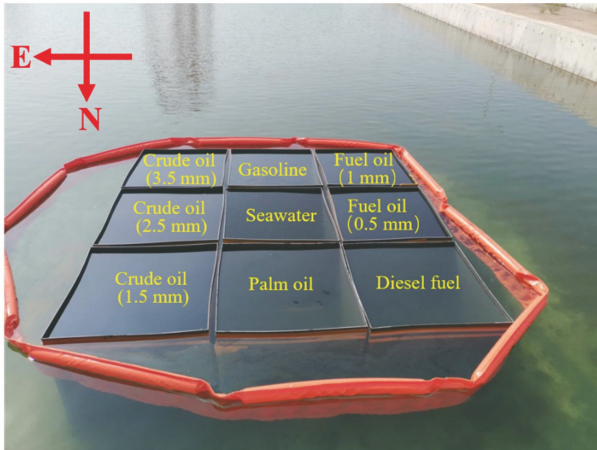


图 10 九宫围隔装置照片

Fig. 10 Photo of Sudoku enclosure device

利用可见光偏振相机获取溢油偏振图像,如图 11 所示。对九宫格内偏振图像灰度值进行提取,分析不同油种之间的差异。

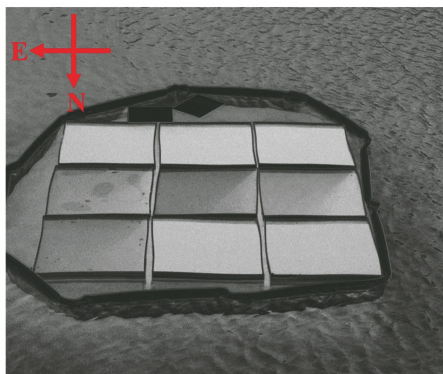


图 11 溢油偏振度图像

Fig. 11 Oil polarization image

为减小数据的偶然性,本实验计算了各样品 5 组强度和偏振度数据的 95% 置信区间:

$$\left[ \mu - 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \mu + 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right], \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为像素灰度值均值;  $\sigma$  为像素灰度值标准差;  $n$  为实验组数。为区分各类油种,以海水为参照物,以置信区间的均值为参考值计算各油种相对海水的对比度。其中,强度图像对比度  $C_I$  和偏振图像对比度  $C_P$  分别表示为

$$C_I = \frac{I_{oil} - I_{sea}}{I_{sea}}, \quad (2)$$

$$C_P = \frac{P_{oil} - P_{sea}}{P_{sea}}, \quad (3)$$

式中:  $C_P$  表示偏振图像对比度;  $I_{oil}$  表示溢油强度图像灰度值;  $I_{sea}$  表示海水强度图像灰度值;  $P_{oil}$  表示溢油偏振图像灰度值;  $P_{sea}$  表示海水偏振图像灰度值。

图 12(a)为各样品可见光强度的 95% 置信区间,图 12(b)为各样品可见光偏振度的 95% 置信区间,图 12(c)为各油品与海水的可见光强度和偏振度对比度。由图 12 可知,各样品反射的可见光强度从高到低为汽油、柴油、棕榈油、海水、原油和重油。汽油、柴油与棕榈油强度的 95% 置信区间彼此无交集且具有明显区别,说明通过强度图像可以实现上述三种溢油的区分。而重油、原油和海水强度的 95% 置信区间相差较小甚至有交集,说明利用强度图像很难实现重油、原油和海水的区分。各样品反射光偏振度从高到低依次为重油、原油、汽油、柴油、棕榈油和海水,且对应的偏振度 95% 置信区间并无交集,说明利用偏振度可区分油种。各油种相对海水的可见光偏振度对比度大体上高于可见光强度对比度,而对于强度信息中较难区分的重油和原油,其偏振度信息却表现出明显的差异,这进一步验证了利用偏振度区分溢油的可行性。

#### 4.2 赤潮偏振探测试验

赤潮培养容器为敞口培养桶,内壁为黑灰色哑光材质,体积约为 300 L,在水体中添加浓度为 64  $\mu\text{mol/L}$  的硝酸盐、64  $\mu\text{mol/L}$  的硅酸盐和 4  $\mu\text{mol/L}$  的磷酸盐,形成桶内水体富营养化,进而产生高密度的骨条藻和拟菱形藻的典型赤潮种群。利用偏振相机获取赤潮水体表面的偏振图像,试验现场如图 13 所示。

不同赤潮优势种及海水偏振图像如图 14 所示。

通过对比分析发现(图 15):拟菱形藻水体最浑浊,实验样品表面的偏振度最低;骨条藻水体浑浊度适中,其表面偏振度较拟菱形藻大;海水透过率最高,偏振度最大。产生上述现象的原因是:海水的透明度很高,入射光在水面上发生镜面反射,散射部分占比很少,反射光中偏振最为明显。而当水中含有赤潮时,水体变浑浊,反射光中镜面反射部分减少,散射部分增多,偏振度逐渐降低。因此,通过对比分析赤潮与海水的偏振度变化,可以实现对赤潮的检测;通过对比不同赤潮优势种偏振度差异,可以实现

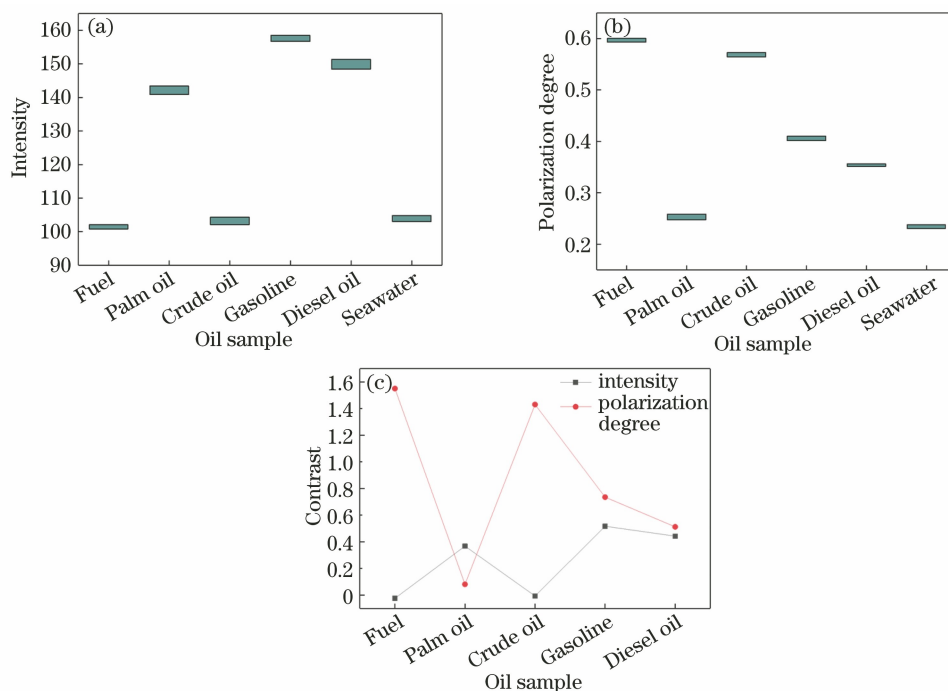


图 12 各种样品数据 95% 置信区间。(a) 可见光强度；(b) 可见光偏振度；(c) 各油种相对海水的可见光强度和偏振度对比度  
 Fig. 12 95% confidence intervals of various sample data. (a) Visible light intensity; (b) visible light polarization; (c) visible light intensity and polarization contrast of each oil relative to seawater



图 13 赤潮多维观测现场  
 Fig. 13 Red tide multi-dimensional observation site

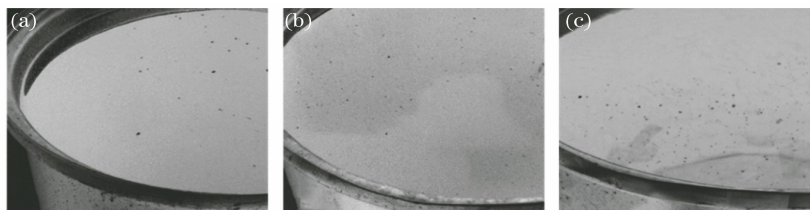


图 14 不同赤潮优势种及海水偏振图像。(a) 拟菱形藻；(b) 骨条藻；(c) 海水  
 Fig. 14 Different red tide dominant species and seawater polarization images. (a) Pseudo-nitzschia; (b) Skeletonema; (c) seawater

赤潮优势种的区分。

通过对溢油和赤潮的外场偏振观测试验,初步验证了偏振探测对溢油、赤潮监测的有效性,实现对不同溢油种类、赤潮优势种的区分,从而为后续海洋

目标多维光学监测的研究与应用提供参考。

## 5 结论与展望

围绕我国对海洋溢油、赤潮精准监测的迫切需

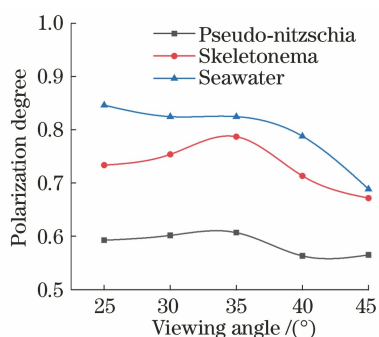


图 15 拟菱形藻、骨条藻、海水偏振度随观测角的变化  
Fig. 15 Variations of polarizations of Pseudo-nitzschia, Skeletonema, and seawater with observation angle

求,着重解决复杂海况下海洋环境监测存在的“看不远”“认不清”“辨不出”三大难题,在对现有光学监测手段的优势和不足进行分析的基础上,提出“光谱+偏振+红外探测”的多维度海洋监测方案,开展多维度光学特性生成、传输、获取、重构与解译等方面的理论和技术研究,构建海洋目标多维度高分辨信息获取机制,揭示复杂海况下多维度光学特性生成机理和传输演化机理,解决海洋弱目标信息解混、复原重构、融合增强和高精度识别反演方法等难题。

通过“光谱+偏振+红外探测”的多维度海洋监测机制、机理和方法研究,将三种技术相结合,发挥各自优势,实现溢油油种识别和赤潮优势种判别,初步验证了多维度光学监测理论与方法的可行性。

未来,随着我国海洋强国战略的逐步实施,对海洋环境监测技术与装备的全覆盖、精细化、智能化的需求不断提升,迫切需要进一步开展适用于更多监测平台、更多监测维度、更多监测对象、更多技术手段的理论、技术与装备研究,以实现更高精度的海洋目标监测,为我国海洋环境治理与海洋经济健康可持续发展提供有力支撑。

### 参 考 文 献

- [1] Hu C M, Lu Y C, Sun S J, et al. Optical remote sensing of oil spills in the ocean: what is really possible? [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 2021: 1-13.
- [2] Sun S J, Hu C M. The challenges of interpreting oil-water spatial and spectral contrasts for the estimation of oil thickness: examples from satellite and airborne measurements of the deepwater horizon oil spill [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(5): 2643-2658.
- [3] Ren G B, Guo J, Ma Y, et al. Oil spill detection and slick thickness measurement via UAV hyperspectral imaging [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(5): 146-158.
- [4] Suo Z Y, Lu Y C, Liu J Q, et al. Ultraviolet remote sensing of marine oil spills: a new approach of Haiyang-1C satellite [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13486-13495.
- [5] Jiao J N, Lu Y C, Hu C M, et al. Quantifying ocean surface oil thickness using thermal remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 261: 112513.
- [6] Li Y C, Liu J N, Shi H D. Research on identification of marine oil spill based on polarization characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0712001. 李英超, 刘嘉楠, 史浩东. 基于偏振特性的海洋溢油油种识别研究 [J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 0712001.
- [7] Kumar L, Sinha P, Taylor S, et al. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1): 097696.
- [8] Li Y Z, Stumpf R P, McGillicuddy D J, Jr, et al. Dynamics of an intense Alexandrium catenella red tide in the Gulf of Maine: satellite observations and numerical modeling [J]. *Harmful Algae*, 2020, 99: 101927.
- [9] Lee M S, Park K A, Chae J, et al. Red tide detection using deep learning and high-spatial resolution optical satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(15): 5838-5860.
- [10] Boufeniza R L, Alsahli M M, Bachari N I, et al. Spatio-temporal quantification and distribution of diatoms and dinoflagellates associated with algal blooms and human activities in Algiers Bay (Algeria) using Landsat-8 satellite imagery [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 36: 101311.
- [11] Li X, Shang S L, Lee Z P, et al. Detection and biomass estimation of phaeocystis globosa blooms off Southern China from UAV-based hyperspectral measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-13.
- [12] Zhu Q, Shen F, Shang P, et al. Correction: Zhu, Q., et al. hyperspectral remote sensing of phytoplankton species composition based on transfer learning. *remote sensing* 2019, 11, 2001 [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 364.
- [13] Song Y, Wang N, Ding Y, et al. Red tide information identification method based on GF-4 satellite remote sensing data: a case study of

- Qinhuangdao Sea area[J]. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(34): 9-14.
- 宋彦, 王宁, 丁一, 等. 基于 GF-4 卫星遥感数据的赤潮信息识别方法: 以秦皇岛海域为例[J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(34): 9-14.
- [14] Zhang H, Zheng X S. Study on red tide remote sensing monitoring in the Bohai Sea in 2014 [J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 19(1): 37-51.
- [15] Li Y D, Li R H, Chang L. Red tide monitoring along the coast of Zhejiang Province based on GOCI data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(8): 1617-1624.
- 李阳东, 李仁虎, 常亮. 基于 GOCI 数据的浙江沿海赤潮监测[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1617-1624.
- [16] Ye L A, Zhang H B, Zhu Z Q, et al. Study on application of red tide monitoring technology in East China Sea based on GOCI[J]. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(1): 120-125.
- 叶林安, 张海波, 朱志清, 等. 基于 GOCI 的东海区海域赤潮监测技术应用研究[J]. *环境科学与管理*, 2020, 45(1): 120-125.
- [17] Yang C Y, Tang D L, Ye H B. A study on retrieving chlorophyll concentration by using GF-4 data [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(5): 33-39.
- 杨超宇, 唐丹玲, 叶海彬. 基于 GF-4 遥感数据的叶绿素浓度反演算法研究[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(5): 33-39.
- [18] Liu R J, Zhang J, Cui B G, et al. Red tide detection based on high spatial resolution broad band satellite data: a case study of GF-1 [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 90(sp1): 120.
- [19] Yue C P, Li X, Bao L S, et al. Using remote sensing to estimate seasonal variation in phytoplankton biomasses in the lake Wuliangshai [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 122-128.
- 岳程鹏, 李兴, 包龙山, 等. 基于 Landsat8 OLI 遥感数据反演乌梁素海浮游植物生物量[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 122-128.
- [20] Ren K, Cheng C, Gu G H, et al. Mueller matrix-based calculating model for extracting polarization parameters in the analysis system for sea surface oil-spill[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 103015.
- [21] Lu M, Wang Z L, Gao P P, et al. Simulation experiment of polarization reflection characteristics of the oil slick [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0426002.
- 陆敏, 王治乐, 高萍萍, 等. 海面油膜的偏振反射特性仿真实验[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(4): 0426002.
- [22] Ma Z C, Ma X B, Si J G, et al. Research on the environmental temperature monitoring of the air compressor cabin of the off shore platform based on infrared temperature measurement technology [J]. *Automation & Instrumentation*, 2021(1): 189-192.
- 马振超, 马宪彬, 司江舸, 等. 基于红外测温技术的海洋平台空压机舱环境温度监测研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2021(1): 189-192.
- [23] Casciello D, Lacava T, Pergola N, et al. Robust Satellite Techniques for oil spill detection and monitoring using AVHRR thermal infrared bands [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(14): 4107-4129.
- [24] Todorov T, Nikolova L, Stoilov G, et al. Spectral stokesmeter 1 implementation of the device [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(27): 6662-6668.
- [25] Craven-Jones J, Kudenov M W, Stapelbroek M G, et al. Infrared hyperspectral imaging polarimeter using birefringent prisms[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(8): 1170-1185.
- [26] Chan V C, Kudenov M, Liang C, et al. Design and application of the snapshot hyperspectral imaging Fourier transform (SHIFT) spectropolarimeter for fluorescence imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8949: 894903.
- [27] Bills M V, Loh A, Sosnowski K, et al. Handheld UV fluorescence spectrophotometer device for the classification and analysis of petroleum oil samples [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, 159: 112193.
- [28] Wang X Q, Xiangli B, Huang M, et al. Static imaging spectropolarimeter [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(5): 689-692.
- 王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 静态成像光谱偏振仪[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(5): 689-692.
- [29] Meng X, Li J X, Xu T T, et al. High throughput full Stokes Fourier transform imaging spectropolarimetry [J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32071-32085.
- [30] Zhao Y Q, Peng Q N, Yi C, et al. Multiband polarization imaging [J]. *Journal of Sensors*, 2016, 2016: 5985673.
- [31] Bai C X, Li J X, Zhou J Q, et al. Interferometric hyperspectral polarization imaging method based on micro-polarization array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0138003.
- 柏财勋, 李建欣, 周建强, 等. 基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 0138003.
- [32] Li X, Liu S, Wang Z B, et al. New method for

- obtaining full-stokes parameters of high-spectral polarization imaging system [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(12): 3953-3958.
- 李晓, 刘顺, 王志斌, 等. 高光谱偏振成像全 Stokes 参量获取新方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(12): 3953-3958.
- [33] Wang Z, Qiao Y L, Hong J, et al. Detecting camouflaged objects with thermal polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 853-856.
- 汪震, 乔延利, 洪津, 等. 利用热红外偏振成像技术识别伪装目标 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 853-856.
- [34] Zhang C Y, Cheng H F, Chen Z H, et al. Polarimetric imaging of camouflage screen in visible and infrared wave band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 424-427.
- 张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 伪装遮障的光学与红外偏振成像 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 424-427.
- [35] Wang Q, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 92-99.
- 王琪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计 [J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 92-99.
- [36] Mera D, Bolon-Canedo V, Cotos J M, et al. On the use of feature selection to improve the detection of sea oil spills in SAR images [J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 100: 166-178.
- [37] Konik M, Bradtke K. Object-oriented approach to oil spill detection using ENVISAT ASAR images [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 118: 37-52.
- [38] Wang L, Qiu Z F, Chen Y L, et al. Reflectance spectra simulation and formation mechanism in the red band of red tide waters [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(2): 303-309.
- 王林, 丘仲锋, 陈艳拢, 等. 赤潮水体红光波段反射光谱的模拟及形成机理 [J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(2): 303-309.
- [39] Lee M S, Park K A, Micheli F. Derivation of red tide index and density using geostationary ocean color imager (GOCI) data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 298.
- [40] Zhang H, Zheng X S. Study on red tide remote sensing monitoring in the Bohai Sea in 2014 [J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 19(1): 37-51.
- 张贺, 郑小慎. 2014 年渤海海域赤潮遥感监测研究 [J]. *海洋通报*, 2017, 19(1): 37-51.
- [41] Bak S H, Kim H M, Hwang D H, et al. Detection technique of red tide using GOCI level 2 data [J]. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2016, 32(6): 673-679.
- [42] Agusa Y, Fujihashi T, Endo K, et al. Development of seawater temperature announcement system for quick and accurate red tide estimation [M] // Sieminski A, Koziarkiewicz A, Nunez M, et al. *Modern approaches for intelligent information and database systems. Studies in computational intelligence*. Cham: Springer, 2018, 769: 245-253.
- [43] Presnar M D, Kerekes J P. Modeling and measurement of optical polarimetric image phenomenology in a complex urban environment [C] // 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 25-30, 2010, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2010: 4389-4392.
- [44] Tesche M, Zieger P, Rastak N, et al. Reconciling aerosol light extinction measurements from spaceborne lidar observations and *in situ* measurements in the Arctic [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(15): 7869-7882.
- [45] Bai J Q. Study on optical scattering characteristics of atmospheric haze particles by discrete dipole approximation method [D]. Xi'an: Xidian University, 2017, 5: 7869-7882.
- 白进强. 离散偶极子方法研究雾霾粒子的光散射特性 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017, 5: 7869-7882.
- [46] Zhang S, Peng J, Zhan J T, et al. Research of the influence of non-spherical ellipsoid particle parameter variation on polarization characteristic of light [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 064205.
- 张肃, 彭杰, 战俊彤, 等. 非球形椭球粒子参数变化对光偏振特性的影响 [J]. *物理学报*, 2016, 65(6): 064205.
- [47] Zhang S, Zhan J T, Bai S K, et al. Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0729001.
- 张肃, 战俊彤, 白思克, 等. 烟雾浓度对偏振光传输特性的影响 [J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0729001.
- [48] Jin K H, Ye J C. Annihilating filter-based low-rank Hankel matrix approach for image inpainting [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3498-3511.
- [49] Bengua J A, Phien H N, Tuan H D, et al. Efficient tensor completion for color image and video recovery: low-rank tensor train [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(5): 2466-2479.
- [50] Mo Y, Kang X D, Duan P H, et al. Attribute filter

- based infrared and visible image fusion [J]. *Information Fusion*, 2021, 75(2021): 41-54.
- [51] Dong W S, Shi G M, Li X. Nonlocal image restoration with bilateral variance estimation: a low-rank approach [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(2): 700-711.
- [52] Lu T, Li S T, Fang L Y, et al. Spectral-spatial adaptive sparse representation for hyperspectral image denoising [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(1): 373-385.
- [53] He K M, Sun J. Image completion approaches using the statistics of similar patches [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(12): 2423-2435.
- [54] Xie T, Li S T, Fang L Y, et al. Tensor completion via nonlocal low-rank regularization [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(6): 2344-2354.
- [55] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [56] Liu S Q, Liu M, Li P F, et al. SAR image denoising via sparse representation in shearlet domain based on continuous cycle spinning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(5): 2985-2992.
- [57] Liu L C, Chen L, Chen C L P, et al. Weighted joint sparse representation for removing mixed noise in image[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(3): 600-611.
- [58] Zhang K, Zuo W M, Chen Y J, et al. Beyond a Gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(7): 3142-3155.
- [59] Mi Z T, Zhou H, Zheng Y J, et al. Single image dehazing via multi-scale gradient domain contrast enhancement[J]. *IET Image Processing*, 2016, 10(3): 206-214.
- [60] Yang C, Lu X, Lin Z, et al. High-resolution image inpainting using multi-scale neural patch synthesis[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 4076-4084.
- [61] Fang X Z, Xu Y, Li X L, et al. Robust semi-supervised subspace clustering via non-negative low-rank representation [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(8): 1828-1838.
- [62] Xie T, Li S T, Fang L Y, et al. Tensor completion via nonlocal low-rank regularization [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(6): 2344-2354.
- [63] Ghorbani Z, Behzadan A H. Monitoring offshore oil pollution using multi-class convolutional neural networks[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117884.
- [64] Casal G, Kutser T, Domínguez-Gómez J A, et al. Assessment of the hyperspectral sensor CASI-2 for macroalgal discrimination on the Ria de Vigo coast (NW Spain) using field spectroscopy and modelled spectral libraries [J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 55: 129-140.
- [65] Le C F, Hu C M, Cannizzaro J, et al. Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129: 75-89.
- [66] Jay S, Guillaume M. A novel maximum likelihood based method for mapping depth and water quality from hyperspectral remote-sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 121-132.
- [67] Barnes B B, Garcia R, Hu C M, et al. Multi-band spectral matching inversion algorithm to derive water column properties in optically shallow waters: an optimization of parameterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 424-438.
- [68] Matthews M W, Bernard S, Evers-King H, et al. Distinguishing cyanobacteria from algae in optically complex inland waters using a hyperspectral radiative transfer inversion algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111981.
- [69] Shin J, Kim S M, Kim K, et al. Quantification of margalefidinium polykrikoides blooms along the South Coast of Korea using airborne hyperspectral Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2463.