

浅海底质高光谱反射率测量系统的设计及应用

曾 凯^{1, 2, 3}, 许占堂^{1, 2*}, 杨跃忠^{1, 2}, 张 雨^{1, 2, 3}, 周 雯^{1, 2}, 李 彩¹, 黄 晖⁴

1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广东省海洋遥感重点实验室, 广东 广州 510301
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 广州 511458
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院海南热带海洋生物重点实验室, 海南 三亚 572000

摘 要 海底光谱反射率是光学浅水中太阳辐射传输的重要组成部分,影响着海水表面离水辐亮度的光谱特性,因此底质光谱信息的准确获取对于浅海遥感工作的开展至关重要。专门设计了一套海底光谱反射率测量系统填补了国际上在这方面的空白。采用可自由伸缩并旋转角度的参考白板贴近目标物测量,以消除探头到目标物之间水体吸收衰减的影响,双光路采集系统同步测量的设计避免了水下光场迅速变化对辐射测量的影响。于2018年9月3日—8日,用该系统在三亚珊瑚礁保护区进行原位海底反射率测量试验,测量对象包括珊瑚、海草、泥沙、沙滩等多种底质。各底质类型之间具有光谱可分性,具体表现为,在波长大于580 nm的长波段,浅海沙子底质与岸上沙滩光谱反射率特征差异明显,表明相对于空气中,水体和水中微藻介质的吸收散射作用严重影响着水下光谱辐射的测量,证实了空气中测量的目标光谱不可替代水中的结果。珊瑚和水草的光谱反射率特征主要区别在于海草反射率光谱在540~600 nm波段有一个宽反射峰,而珊瑚的典型特征是在575, 600和650 nm附近有三个特征反射峰。此外,珊瑚、沙子和沙滩三种碳酸盐质底质在395, 430, 490和520 nm存在反射峰,485和585 nm处有一个小吸收峰,而海草则相反,在395, 430, 490和520 nm存在吸收峰,485和585 nm处显示反射峰。以上数据为将来利用底质反射率提取底栖物质组成信息奠定了基础,同时其结果也能够证实系统的可靠性和有效性。

关键词 光学浅水遥感;底质反射率;光谱可分性;底质分类;高光谱

中图分类号: P733.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0579-07

引 言

海底光谱反射率是海草、珊瑚礁遥感等光学浅水遥感的核心参数,它反映着光学浅水中辐射传输的底部信号^[1]。且海底反射率是目标物结构和物质组成的函数,是光学参数和海底底质构成之间关系的体现^[2],因此,光学浅水遥感图像分类和专题图的生成最终依赖于海底不同底质之间光谱反射率的差异。

在光学浅水海洋遥感的应用中,水表的遥感反射率不仅包含了水草、砂石、珊瑚和其他底栖物质的信息,也包含了海底上层水体的信息如悬浮物、叶绿素及水体固有的吸收散射特性等^[1, 3]。为了提取珊瑚和海草等浅水底质环境分布特

征,浅水海洋遥感需要从表面获取的离水辐亮度中剔除底质上层海水光学信号的影响,浅海水体信息的提取需要剔除海底反射光的干扰,而光线多次经过水体传输,能量衰减加剧,水体本身成为削弱海底反射信息的重要因素^[4]。为了从遥感信号中提取底质信息,必须准确校正水体的影响,这要知道像元尺度上的水深以及水体的各项光学系数^[5],而这些参数的获取是一个难点。水面状况和水表反射光也影响遥感信号,进一步增加了海底底质信息获取的难度^[6]。针对以上问题,有必要设计开发一套适用于浅海水域的现场高光谱反射率测量系统,为光学浅水底质信息提取提供精确便捷的现场数据采集服务。

Miyazaki等设计了两个光纤探头,分别在海底以及实验室培养两种情况下采用直接测量法测量珊瑚的上行辐亮度和

收稿日期:2018-12-25,修订日期:2019-04-29

基金项目:广州市科技计划项目(201607020041),粤港澳大湾区生态环境与资源遥感巡查关键技术与应用(GML2019ZD0602)和国家自然科学基金委面上项目(41776044, 41576030)资助

作者简介:曾 凯,1994年生,中国科学院南海海洋研究所硕士研究生 e-mail: zengkai16@mails.ucas.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: xuzhantang@qq.com

下行辐照度,进而计算底质反射率^[7],这是学者首次对海底底质光谱反射率测量方法的尝试,然而这种测量方法受光学探头摆放位置不同的影响,导致水下光程测量的差异引入的测量误差;实验室与水下光场的巨大差异,更无法保证数据测量结果的真实有效性;也有其他的学者采用相对测量法设计了原位海底反射率采集设备^[8-11],然而报道中采用的设备都是单通道测量,对环境条件要求较高,如严格要求无云晴朗天气和平静水域等条件,利用不同探头先后测量上行辐亮度和下行辐照度来计算反射率,但由于仪器自阴影和下水光场环境迅速变化等因素影响,并不能保证前后辐射测量过程中光场环境的一致性,误差较大且难以避免。

我国学者通过采样直接测量反射和入射辐射强度来获取珊瑚的光谱反射率,如陈启东等通过潜水采集珊瑚样品取出水面,在船上使用单通道探头进行光谱反射率测量^[12]。陈标和陈永强等人采用实验室培养的方法,使用海洋光学光谱仪测量了三亚湾鹿回头海域常见风信子鹿角珊瑚的光谱反射率^[13],并分析了珊瑚的光谱反射率特征。采样测量法在测量时难以保证采集的底质样品各种理化性质不变,且由于水体的吸收散射和水中微藻的存在,水下原位与岸上空气中反射率测量结果差异较大,本工作对岸上沙滩和下水沙子底质的反射率测量结果已经证实这一点。实验室培养也无法实现野外环境包括波浪、潮汐等因素的准确模拟,光源的稳定性未知,且这两种方法破坏了珊瑚礁原有的光场环境,无法确定其对遥感监测的适用性。杨超宇等利用自制的底质反射率检测仪对浅水海藻、珊瑚等进行了光谱数据的初步获取^[14],而其使用单探头测量,有上文所说的单探头局限性,测量结果准确性难以保证。

综上,现有的观测方法,一部分是将水下目标物采集于空气中测量其反射率来替代水底真实值;另一部分是在水下利用单探头进行辐射测量。目前 Miyazaki 的尝试相对科学,然而两个探头放置位置不同,光程不同,水下衰减不同,且无法最大限度贴近目标物,目标物反射角度与入射辐射测量角度的差异对结果亦会产生很大影响,目前还不能达到较高的精度。本文专门设计了一套适用于现场海面背景辐射、海底珊瑚、水草等适应不同海洋界面光学特性测量的海底光谱反射率测量系统,该系统配备有两路光谱仪和光纤探头,实现双通道同步辐射测量,保证测量目标物和标准反射板的数据获取处在同一光场环境,避免了因水下光场环境变化及各种人为因素对数据采集的影响,目标物与参考白板放置在同一并行位置,消除因水体衰减带来的测量误差,确保数据的真实有效,并配有摄像头进行图像采集用于测量对象鉴别及现场环境信息记录等。该系统具有原位高光谱测量、双通道同步、积分时间自动调整和便携式等特点。是国际上首个海底高光谱反射率测量系统的设计与应用,为浅海底质反射率的现场数据观测和海洋光学研究提供了重要技术手段。

1 海底反射率测量系统的设计

1.1 设计的理论基础及总体方案

浅水海洋生态系统是多种生物结构组合的多尺度组合生

态系统,形成不同的群落类型,例如珊瑚礁、海草、大型藻类、附着藻类、碳酸盐砂等。这些群落类型中的每一种在理论上都有特征性的反射率(R),这提供了利用遥感识别它们的可能^[15]。

表 1 各符号意义

Table 1 Notations used in this paper

符号	意义及单位	单位
R	辐照度反射率	—
z	深度	m
λ	光谱波长	nm
E_u, E_d	上行和下行光谱辐照度	$\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$
L_u	上行光谱辐亮度	$\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
θ	天顶角	—
ϕ	方位角	—
ρ	参考白板反射率	—
E_0	参考白板反射光谱辐照度	$\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$
L_0	参考白板反射辐亮度	$\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$

根据反射理论,海底辐照度反射率 $R(z, \lambda)$ 是在给定深度 z 处目标物上行辐射 $E_u(z, \lambda)$ 和下行辐射 $E_d(z, \lambda)$ 的比值^[16]

$$R(z, \lambda) = \frac{E_u(z, \lambda)}{E_d(z, \lambda)} \quad (1)$$

上行光谱辐照度和入射到平面的上行光谱辐亮度的关系为

$$E_u = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_u(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (2)$$

海底反射率的测量采用相对测量法,相对测量区别于直接测量目标物的上行和下行辐射计算反射率。通过已知反射率的白板作为参照,设置白板与目标物在同一位置,同一高度、同一反射角度测量其反射辐射,将水体吸收衰减等未知环境变量控制为相同,从而消除这些未知变量的影响,得到更为精确的测量结果和数据,由目标物和参考白板反射的光谱信号以及白板的反射率确定待测目标物的反射率。

由于波浪和水体环境等因素影响,水下光场环境变化迅速。根据已知参考白板和目标物反射辐亮度 $L_0(z, \lambda, t_1)$ 和 $L_u(z, \lambda, t_2)$ 可得到目标物的光谱反射率 $R(z, \lambda)$

$$R(z, \lambda) = \rho \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_u(z, \lambda, t_2, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(z, \lambda, t_1, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi} \quad (3)$$

为获取数据的真实有效性,需保证目标物和白板反射辐射测量过程中的光场环境相同,因而除保证距离接近以使所测水体环境相同以外,还应保证反射辐射数据的同时获取,即 $t_1 = t_2$, 避免因水体环境迅速变化所引起的误差

$$R(z, \lambda) = \rho \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_u(z, \lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(z, \lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi} \quad (4)$$

由(4)式可知,通过目标物和参考白板反射辐亮度 L_u 和 L_0 及已知参考白板反射率 ρ 可推算出目标物反射率 R 。根据

以上原理设计海洋界面高光谱反射率测量系统，仪器系统结构示意图如图 1 所示，主要包括控制系统和光学系统两部分，其中控制系统包括作为总控核心的 PC/104 嵌入式电脑，扩展的复合功能板，供电装置；光学系统包括两通道并行的微型光纤光谱仪和光学传感器探头，一个红外摄像头用于图像采集；还配有深度和 GPS 探头用于辅助参数输入。

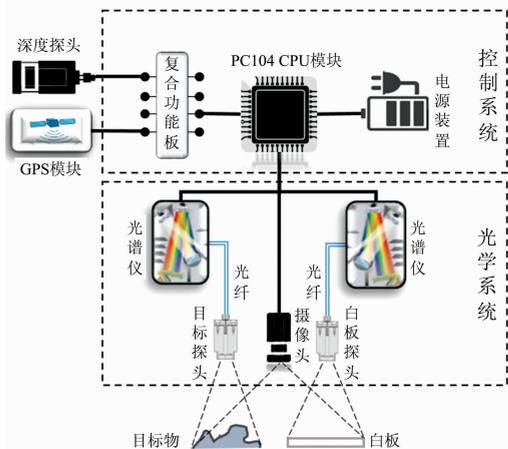


图 1 海底反射率测量系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflectance measurement system

1.2 光纤光谱仪及光纤探头

系统配备有两个水下光谱辐亮度探头，由窗口玻璃、中性衰减片、光孔光栏、光纤及水密封圈组成，光线入射视角角 10° [17]。两路光纤探头分别连接两个光谱仪，实现双通道同步测量，图 2 所示为辐亮度探头机械结构与实物示意图，光纤光谱仪采用了具有高灵敏度、高信噪比的薄型背照式 CCD 面阵探测器，具有高达 90% 的量子效率，光谱分辨率小于 1 nm，具有高分辨率、动态范围较大和优秀的紫外响应能力等特点。

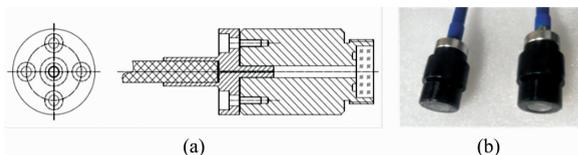


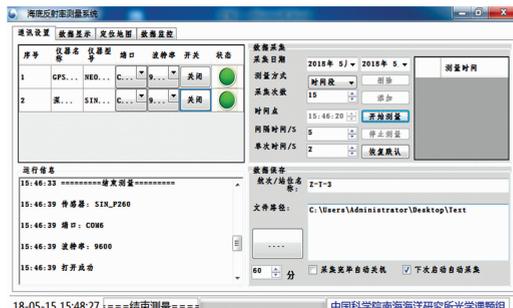
图 2 (a) 辐亮度探头结构示意图；(b) 辐亮度探头示意图

Fig. 2 (a) Schematic figures of radiance detector;

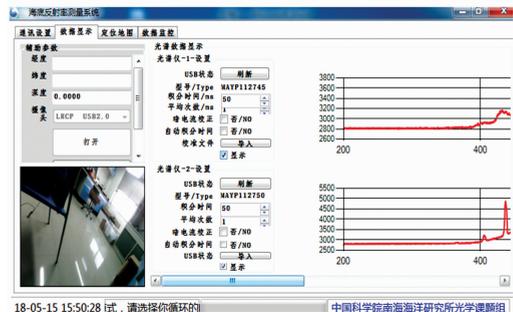
(b) Photo of radiance detector

1.3 控制系统

仪器控制系统选用 PC/104 CPU 主板为系统核心模块，正常工作功率为 4.4 W，工作温度为 $0 \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，具有稳定、低功耗的特点，满足海底现场测量工作要求。自主设计的海底反射率数据采集和处理软件在 Windows 系统下运行。采集软件可设置单次采样时间、采样间隔和采样方式，包括按时间点和时间段两种不同采样方式，光谱数据采集积分时间根据光学特性测试中确定的 CCD 线性特征进行自动调整，控制界面可实时显示数据采集状态，包括通讯设置、数据显示、定位地图和数据监控四个监测设置界面(图 3)。



(a)



(b)

图 3 (a) 采集软件通讯设置界面；(b) 采集软件数据显示界面
Fig. 3 (a) Communication setting interface of the acquisition software; (b) Data display interface of the acquisition software

2 实验室辐射标定及初步试验

为了将测量的码值信号转化为辐射能量值，需要在实验室对辐亮度探头进行辐射定标，为了校正波段位置，光谱波长定标也必不可少。本仪器理论偏差小于 1 nm，选用 Ocean Optics 公司的 HG-1 型汞-氙灯标准光源光谱仪示值波长进行标定。此外，参考白板是获取入射光并消除水体复杂光程衰减引入误差的关键部件，为适应不同海底环境条件，所设计白板可伸缩调节探头与白板距离，且可旋转调节反射角度，需利用标准光源在实验室标定不同反射角度下的白板反射率。

为了确保准确性，首先对仪器进行实验室测试，在实验室对绿藻、红树林树苗和其他绿色植被进行反射率测量试验，红树林树苗光谱反射率曲线如图 4(a) 所示，结果显示，400~500 nm 波段平均反射率很低，小于 0.05，光谱反射率曲线的形状平缓；500~650 nm 波段反射光谱曲线具有波峰形态和中等反射率数值，在 0.1 左右；650~690 nm 的反射光谱曲线具有波谷形态和很低的反射率数值，在 0.05 左右；反射光谱曲线在 690~710 nm 波段急剧上升，具有陡而近于直线的形态。以上数据结果符合红树林光谱反射率特征[18]，初步验证了系统设计的有效性。

3 原位海底反射率试验

于 2018 年 9 月 3 日—8 日，选定三亚珊瑚礁保护区及附近海域进行现场测量试验，三亚珊瑚礁国家级自然保护区

($109^{\circ}20'50''\text{E}$ — $109^{\circ}40'30''\text{E}$, $18^{\circ}10'30''\text{N}$ — $18^{\circ}15'30''\text{N}$)位于

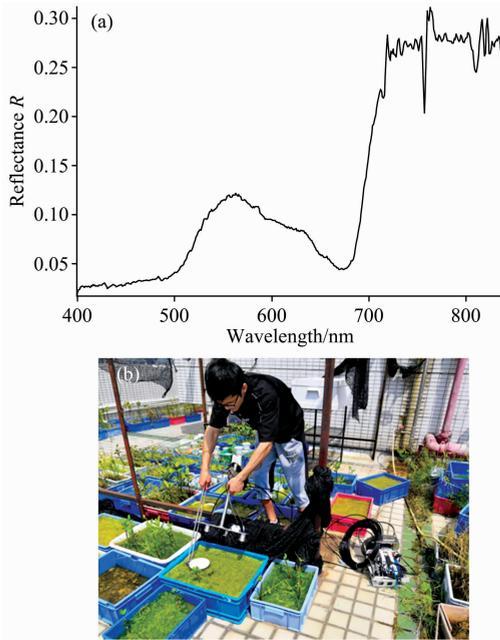


图 4 (a) 红树林树苗光谱反射率曲线;
(b) 实验室测量试验现场照片

Fig. 4 (a) Reflectance spectra of mangrove saplings;
(b) Photograph of field measurement

三亚市南部近岸海芋, 由 3 块区域组成, 即亚龙湾片区、鹿回头半岛—榆林角片区、东西瑁洲岛片区(图 5)。

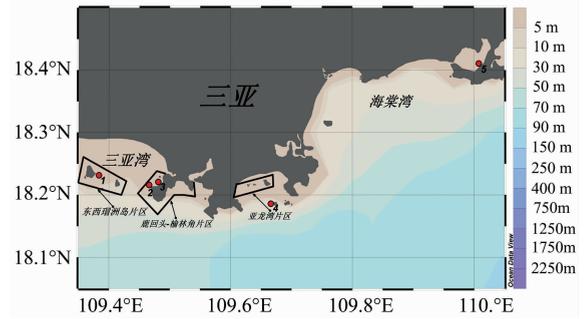


图 5 试验区域站位图

Fig. 5 Study area and station in Sanya Coral Reefs Reserve, China

选择造礁珊瑚、海草、附着海藻、礁石、砂石、泥沙等各种底质作为测量对象, 为获取更理想的光谱反射率数据, 并配合卫星遥感数据, 选择晴朗无云的天气, 在 10:00—15:00 之间进行现场海底高光谱反射率测量。选择珊瑚生长状况良好、生物多样性较高的区域设置站点, 同时考虑海底地形、风向、涨潮落潮引起的水深变化等因素, 选择水深小于 10 m 的水域, 由专业潜水员携带海底反射率测量仪潜入水底进行数据采集, 站点信息如表 2 中所示。

表 2 三亚珊瑚礁保护区实验站位信息

Table 2 Site Information of study area

站位	经纬度	测量对象	水深/m	水体能见度/m	探头高度 cm/反射角度 α
1	$18^{\circ}13.658'\text{N}$; $109^{\circ}22.628'\text{E}$	珊瑚	3	2	20/60°
2	$18^{\circ}12.746'\text{N}$; $109^{\circ}28.363'\text{E}$	珊瑚	4	3	15/60°
3	$18^{\circ}13.082'\text{N}$; $109^{\circ}29.124'\text{E}$	珊瑚、岸边砂石	3	>3	15/60°
4	$18^{\circ}10.992'\text{N}$; $109^{\circ}40.383'\text{E}$	珊瑚	7	5	20/60°
5	$18^{\circ}24.383'\text{N}$; $110^{\circ}0.450'\text{E}$	海草、泥沙	1.2	—	15/60°

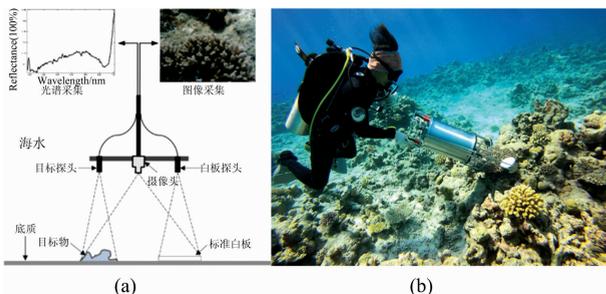


图 6 (a) 海底测量示意图; (b) 水下现场测量照片

Fig. 6 (a) Sea bottom measurement diagram; (b) Photograph of in-situ underwater field measurement

选取了 4 个珊瑚礁集中生长和 1 个海草集中生长的站位作为现场数据采集点, 测量了包括多种造礁珊瑚、海草、附着海藻、礁石、砂石、泥沙等不同底质对象的反射率结果, 并采集对应站点表层水体进行光学特性分析。对于每一个测量对象至少进行了 10 次高光谱反射率测量。每次在选定目

标底质上方大约 0.1~0.3 m 处测量水下光谱反射率以及目标图像用于物种底质鉴别及环境信息记录, 两探头到目标之间的水体可以认为是均一稳定且处在同一水下光场环境中, 测量角度参考水体表观光学特性测量方案^[19], 避免自阴影影响, 底质测量示意图和 underwater 测量照片如图 6 所示。

4 光谱反射率结果分析

图 7 所示为包括杯形珊瑚科、鹿角珊瑚科、木珊瑚科、蜂巢珊瑚科在内的六种不同珊瑚 46 次光谱反射率数据测量结果, 光谱范围为 390~700 nm 的可见光波段, 结果显示珊瑚光谱反射率曲线在 400~500 nm 之间表现出相对较低的反射率, 550~650 nm 之间有着较高的反射率, 在 675 nm 附近有叶绿素特征吸收峰, 并且在波长大于 680 nm 反射率迅速增加。这与珊瑚光谱反射率特征研究结果相符^[20-22]。三亚珊瑚礁保护区的珊瑚光谱反射率特征基本呈现三峰模式, 这种模式的典型特征是在 575, 600 和 650 nm 附近有三个特征反

射峰。此外,发现珊瑚光谱反射率曲线在 395, 430, 490 和 517 nm 附近存在较为明显的反射峰。通过对多个站点多种珊瑚的光谱反射率测量,同种珊瑚多次测量结果稳定,由于海草、珊瑚、礁石等不同底质为立体结构,不同方位角度测量以及水下局部耀斑影响,多次测量反射率大小有一定差异,平均反射率偏差小于 10%,三亚珊瑚礁保护区珊瑚反射率大小在 4%~20%之间。不同种珊瑚除光谱反射率大小有一定差异外,反射率曲线变化特征基本一致,可知不同种珊瑚之间光谱反射率特征具有相似性,若要进行特征光谱区分,需进一步对光谱反射率数据进行多阶导数分析。此外,同一目标持续多次测量的光谱反射率曲线的一致性进一步说明数据采集系统的稳定性。

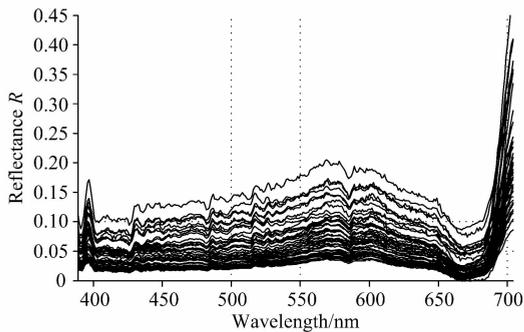


图 7 6 种珊瑚 46 次光谱反射率曲线

Fig. 7 In-situ optical reflectance spectra of 6 species of corals

图 8 所示为不同底质目标物光谱反射率曲线和采集照片,结果表明不同的海洋底质有着明显的光谱反射率差异,可通过光谱反射率特征进行区分。岸上沙滩有着最高的光谱反射率值,浅水沙子底质在 580 nm 之前与沙滩反射率曲线除反射率大小的差异外,形状、趋势、特征峰基本一致,580 nm 之后反射率曲线走势相反,呈下降趋势,且在 675 nm 附近有一个小的吸收峰,这与水体的吸收散射和水中微藻的存在有关。结果表明,同种物质在空气中与原位水下反射率测

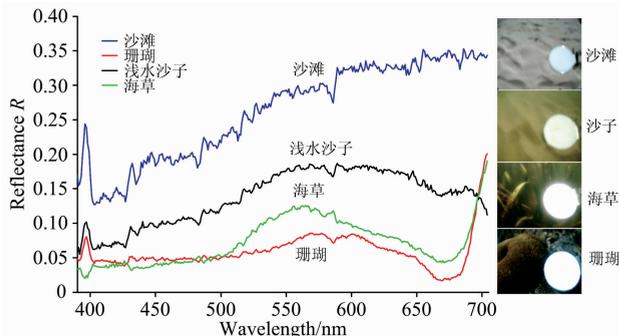


图 8 不同底质光谱反射率曲线及目标底质采集照片

Fig. 8 In-situ optical reflectance spectra of various substrates and photographs of different target substrates (coral species, seagrass, sand and sandy beach)

量结果有着明显差异,因此为了获得准确的底质反射信息,推荐进行原位海底反射率获取。

海草与珊瑚的反射率曲线形状相似,均是在 400~500 nm 之间表现出相对较低的反射率,550~650 nm 之间有着较高的反射率,在 675 nm 附近有叶绿素特征吸收峰,并且在波长大于 680 nm 时反射率迅速增加,珊瑚与海草两者的区别在于,海草形状变化相对不明显,较为平滑,海草在 560 nm 附近反射率最大,在 540~600 nm 有一个宽反射峰,而珊瑚在此波段存在两个反射峰。所有测量对象中珊瑚的光谱反射率曲线特征变化最明显,珊瑚光谱反射率特征最明显的波段在 500~650 nm 的黄绿波段,在 580, 610 和 650 nm 附近有明显的三个反射峰,675 nm 处存在吸收特征峰,这些光谱反射率特征与其他地域珊瑚礁不同底质反射率特征研究结果相符^[8-10, 23]。

珊瑚、沙子和沙滩三种碳酸盐底质在 395, 430, 490 和 520 nm 存在反射峰,485 和 585 nm 处有一个小型吸收峰,而海草则相反,在 395, 430, 490, 520 nm 存在吸收峰,485 和 585 nm 处显示反射峰,此特征可能成为碳酸盐质对象与其他物质的区分特征。所有含叶绿素可进行光合作用的生物(珊瑚,藻类和海草)在大约 675 nm 处显示出最小的反射率,且随后都有一个陡增的过程,这与叶绿素 a 的存在有关,以上光谱反射率分析结果说明海底反射率测量系统采集的数据稳定有效,数据能够真实地反映海洋界面不同对象的反射率特性。

5 结 论

设计了海底高光谱反射率测量系统,采用相对测量法,消除了探头到目标物之间水体衰减的影响,双通道光纤光谱仪同步测量,避免了因水下光场环境变化带来的测量误差,故而能够真实反映不同测量对象的光谱反射率特性,为光学浅水底质信息提取提供精确便捷的现场数据采集服务。完成了海底高光谱反射率测量系统集成及海上现场测量试验。结果表明,仪器操作便捷,各通道积分时间根据现场实时光照条件自动调整,数据采集系统稳定无故障。同一目标持续多次采样数据结果稳定,反射率曲线特征一致,平均反射率偏差小于 10%,数据采集稳定有效。不同底质光谱反射率数据结果表明,不同种底质目标物之间光谱反射率特征明显,具有光谱可分性,同种物质在空气中与原位水下反射率测量结果差异巨大,证实了以往学者将空气中测量的目标光谱代替水下结果所存在严重的缺陷性。实验证实了海底高光谱反射率测量系统设计的可靠性和真实有效性,为进一步通过遥感提取浅水底质信息提供了坚实的基础。

致谢:感谢中国科学院海南热带海洋生物实验站陈永强、袁翔城,中国科学院三亚深海科学与工程研究所刘素敏及其他工作人员在实验过程中的指导与帮助。

References

- [1] Kazama Y, Yamamoto T. Proc SPIE, 2017, 10422: 1042208(doi: org/10.1117/12.2280305).
- [2] McKinna L I W, Fearn P R C, Weeks S J, et al. J. Geophys. Res-Oceans., 2015, 120: 1741.
- [3] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, et al. Appl. Optics, 1999, 38: 3831.
- [4] Purkis S J. Annual Review of Marine Sciences, 2018, 10(1): 149.
- [5] Bostater C R, Rotkiske T, Oney T. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, 2016. Vol. 9999. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2016.
- [6] Jay S, Guillaume M, Minghelli A, et al. Remote Sens. Environ., 2017; 200: 352.
- [7] Miyazaki T, Harashima A. Measuring the Spectral Signatures of Coral Reefs, IGARSS, 1993. 693.
- [8] Hochberg E J, Atkinson M J. Coral Reefs., 2000, 19: 164.
- [9] Holden H, LeDrew E. Remote Sens. Environ., 1998; 65: 217.
- [10] Idris M S, Jean K S, Zakariya R. Journal of Sustainability Science and Management, 2009, 4: 36.
- [11] Nurdin N. Journal of Shipping and Ocean Engineering, 2012, 158: 182.
- [12] Chen Q, Deng R, Qin Y, et al. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35: 3394.
- [13] CHEN Biao, CHEN Yong-qiang, HUANG Hui, et al(陈 标, 陈永强, 黄 晖, 等). Journal of Tropical Oceanography(热带海洋学报), 2015, 34(1): 71.
- [14] Yang C Y, Yang D T. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens., 2015, 8: 1266.
- [15] Fearn P R C, Klonowski W, Babcock R C, et al. Continental Shelf Research, 2011, 31: 1249.
- [16] Maritorena S, Morel A, Gentili B. Limnol. Oceanogr., 1994, 39: 1689.
- [17] Xu Zhantang, Yang Yuezhong, Wang Guifeng, et al. J. Geophys. Res.-Oceans., 2012, 117: 14.
- [18] Panigrahy S, Kumar T, Manjunath K R. Wetl. Ecol. Manag., 2012, 20: 101.
- [19] WANG Xiao-yong, TANG Jun-wu, LI Tong-ji, et al(汪小勇, 唐军武, 李桐基, 等). Ocean Technology(海洋技术), 2012, 31(1): 72.
- [20] Kobryn H T, Wouters K, Beckley L E, et al. Plos One, 2013, 8: 22.
- [21] Torres-Perez J L, Guild L S, Armstrong R A. Remote Sensing, 2012, 4: 3813.
- [22] Nurdin N, Komatsu T, Yamano H, et al. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2012, 8525: 85251A-A-10.
- [23] Garcia R A, Lee Z, Hochberg E J. Remote Sensing, 2018, 10: 25.

Design and Application of Reflectance Measurement System for Sea Bottom in Optically Shallow Water

ZENG Kai^{1, 2, 3}, XU Zhan-tang^{1, 2*}, YANG Yue-zhong^{1, 2}, ZHANG Yu^{1, 2, 3}, ZHOU Wen^{1, 2}, LI Cai¹, HUANG Hui⁴

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, Guangdong Key Lab of Ocean Remote Sensing, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. National Experiment Station of Tropical Marine Biology, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

Abstract The spectral reflectance of the sea bottom plays an important role in radiative transfer signal of optically shallow water, affecting the spectral characteristics of water-leaving radiance in sea surface. Therefore, the precise information of the substrate is particularly significant in the study of the coastal remote sensing. In order to provide an accurate and convenient on-site information extraction of optically shallow water bottom, a set of sea bottom reflectance measurement system was designed, which is characterized by designing a reference whiteboard that can be freely stretched and rotated in order to eliminate the influence of the absorption attenuation of water between the probe and the target. And the design of the dual optical path for simultaneous measurement solved the interference of the spatial and temporal variability of water optical properties. Optical in-situ bottom reflectance of various substrates include corals, seagrass, sediment and beach collected in Sanya Coral Reefs Reserve during September 3—8, 2018 were used to study the feasibility of the system. As expected, the various types of substrate have distinct spectral separability. The spectral reflectance feature of the sand bottom and onshore beach are different over the range 580~700

nm, which suggests that the absorption and scattering of water and the presence of microalgae strongly affect the measurement of under water radiation. The difference between seagrass and coral is obvious that there is positive reflectance feature at 540~600 nm of seagrass, whereas the typical characteristic of coral is that there are three positive features around 575, 600 and 650 nm. In addition, the three carbonate substrates of coral, sand bottom and sandy beach have reflection peaks at 395, 430, 490 and 520 nm, and a small absorption peak at 485 and 585 nm, while seagrass has an absorption peak at 395, 430, 490 and 520 nm, a reflection peak at 485 and 585 nm. The above data results laid the foundation for the future extraction of benthic composition information, and also confirmed the reliability and real validity of the system design.

Keywords Optically shallow water remote sensing; Bottom reflectance; Spectral separability; Substrate classification; Hyperspectral

(Received Dec. 25, 2018; accepted Apr. 29, 2019)

* Corresponding author

撤稿声明

刊登在《光谱学与光谱分析》第 39 卷第 12 期第 3686~3691 页的论文

题目:《羟基碳酸钡中羟基位置及振动方式研究》

作者:刘欣蕊², 李林^{1,2*}, 杨自强³, 李胜荣^{1,3}

单位: 1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3686-06

此篇论文应通讯作者要求, 同意作撤稿处理。

特此声明!

《光谱学与光谱分析》期刊社

2020 年 1 月 3 日