

## 基于野外实测数据的珊瑚礁不同底质 光谱可分性及珊瑚色素影响分析

徐京萍, 李方\*, 孟庆辉, 王飞

国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023

**摘要** 珊瑚礁遥感监测的任务之一是获取底栖物质的组成及分布,但由于珊瑚礁存在较强的空间异质性及复杂的光谱,使得目前利用遥感技术进行底栖物质信息提取还存在较大难度。珊瑚礁不同底栖物质的光谱特性是开展珊瑚礁遥感监测的基本先验知识,但目前关于不同珊瑚种类的光谱特性分析研究较为匮乏。本研究基于野外实测光谱数据和模拟卫星遥感数据,开展珊瑚礁不同底质类型的光谱特性研究,特别是针对不同造礁石珊瑚种间及种内的光谱差异进行比较分析,并探讨不同珊瑚体内色素组成对珊瑚光谱特性的影响研究,最后甄选了四种常用卫星数据,通过数值模拟探讨了不同底质类型的光谱可分性。结果显示,利用反射光谱曲线值的大小能较好的识别沙和白化珊瑚,而利用蓝绿红波段反射率的一阶微分值能有效识别出海藻、海草和健康珊瑚。对于不同种类的珊瑚而言,科、属、种、珊瑚形状、珊瑚颜色的不同均会对珊瑚的反射光谱造成影响。叶绿素含量(包含叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 c)与珊瑚反射光谱值相关性较好,是影响珊瑚光谱反射率的主要因素之一,虫黄藻密度在一定程度上也能影响珊瑚光谱反射率,但不如叶绿素影响明显,其密度的高低会影响珊瑚光谱在局部波段的峰值特征。在目前常用的多光谱卫星数据中,Landsat8 数据具有可观测近岸的蓝波段,具备识别沙、白化珊瑚、海藻、健康珊瑚、海草的能力,而 IKONOS 和 Quickbird 可识别沙、白化珊瑚和海草。相对而言,SPOT5 表现较差,仅能识别沙和白化珊瑚。在不同种类珊瑚的识别方面,多光谱遥感数据由于无法捕捉特征波段,需要采用具有高空间分辨率的高光谱遥感数据进行有效识别。在今后的工作中,将进一步扩大珊瑚礁底质样本数据集,并建立珊瑚礁光谱库,为今后我国珊瑚礁遥感监测体系建立提供数据支撑。

**关键词** 珊瑚礁; 光谱; 遥感; 叶绿素; 虫黄藻

**中图分类号:** P714+.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2462-08

### 引言

珊瑚礁是地球上生产力最高、生物种类最丰富的生态系统之一,是对维持海洋资源生产力有特殊价值的生态关键,同时也是海洋环境健康的重要指示物<sup>[1-3]</sup>。然而,在过去的几十年里,由于全球气候变化影响和人类活动干扰导致世界范围内的珊瑚礁呈现明显的退化现象<sup>[4-6]</sup>。遥感技术的出现及发展能为区域性的珊瑚礁生态环境监测提供及时、大面积、可重复性观测的数据,这是传统监测方法所不能比拟的<sup>[7-9]</sup>。珊瑚礁遥感监测包含诸多技术环节。其中,目标物体光谱特性作为遥感监测的一项基础环节,是有效区分珊瑚礁

不同底质类型的关键先验知识。从群落结构上讲,珊瑚礁底质类型大致可分为珊瑚、海藻、海草和沙。对于具有较强空间异质性的珊瑚礁而言,获取这些底栖物质的光谱反射率特征和分析他们之间的光谱可分性是珊瑚礁遥感监测中一项极为重要的工作<sup>[10]</sup>。

为此,国外学者开展了一系列相关研究。例如,Tristan等<sup>[11]</sup>对珊瑚礁底质四类物质进行光谱测量,显示沙的反射光谱值最高,因此最容易识别。海草与珊瑚和海藻的光谱形状极为相似。珊瑚在 575 和 605 nm 的反射峰/谷特征以及海藻在 595 和 645 nm 的反射峰/谷特征有助于他们的分类识别。Hedley 和 Mumby<sup>[12]</sup>总结珊瑚礁不同底质类型的光谱可分性,认为光谱曲线在 650~690 nm 之间的斜率可用于区分

收稿日期: 2019-01-31, 修订日期: 2019-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871281)资助

作者简介: 徐京萍,女,1982年生,国家海洋环境监测中心副研究员 e-mail: xjp\_pp@126.com

\* 通讯联系人 e-mail: jpxu@nmemc.org.cn

泥沙和含有叶绿素的底质类型(珊瑚、海藻和海草),而 500~600 nm 之间不同位置的斜率可用来区分健康珊瑚和白化珊瑚,该特征主要反映了珊瑚体内是否还共生有虫黄藻。

国外学者虽然在珊瑚礁光谱特性研究方面做了大量工作,但研究成果多是基于有限的数据库,缺乏对不同珊瑚种类的光谱特性分析。相比之下,国内学者在该方面还未深入开展相关工作,研究成果较少。因此,基于野外实测光谱数据,开展珊瑚礁不同底质类型的光谱特性分析,特别是不同造礁珊瑚种内及种间的光谱差异,并分析叶绿素和虫黄藻等色素含量对珊瑚光谱特性的影响。在此基础上,针对目前主流的卫星遥感数据,通过卫星波段数据模拟,探讨各底质类型在不同中高分辨率卫星数据上的光谱可分性,为珊瑚礁遥感影像分类提供理论依据与技术支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 光谱数据测量

于 2016 年 5 月 16 日—20 日在海南岛东海岸及三亚附近海域进行了珊瑚礁外业光谱测量工作。共计测得 5 组珊瑚礁不同底质物种(沙、白化珊瑚、海草和海藻)及 19 种珊瑚(包含 4 科 6 属的珊瑚)的光谱数据集。采用水表测量法对野外珊瑚礁不同底质类型的光谱进行测量。选择天气晴朗、水面基本平静的天气,利用 Profiler II 水下高光谱剖面仪分别在水表和海底测量水表的下行辐照度( $E_d^A$ )和底质的反射辐亮度( $L_r^S$ ),然后通过水深( $D$ )和水体衰减系数( $K$ )推算底质表面的下行辐照度  $E_d^S$ ,即

$$E_d^S = E_d^A T e^{-KD} \cos\theta \quad (1)$$

式中,  $T$  为水气界面的透射率;  $\theta$  为太阳天顶角。水体参量  $D$  和  $K$  可通过野外同步测量获取。根据底质光谱反射率  $R^S$  的定义

$$R^S = \frac{\pi L_r^S}{E_d^S} \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)得到底质光谱反射率为

$$R^S = \frac{\pi L_r^S}{E_d^A T e^{-KD} \cos\theta} \quad (3)$$

### 1.2 珊瑚色素浓度测量<sup>[13]</sup>

#### 1.2.1 珊瑚虫黄藻密度测量

将经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤的清洁海水置于刷牙器中,冲洗珊瑚样品表面,使珊瑚软组织和骨骼分离。准确定量冲洗液体积  $V$  后,量取 9 mL 冲洗液,加入 1 mL 甲醛,摇匀,取 3 个重复样。3 min 后,用血球计数板在显微镜下计数虫黄藻密度( $c$ )。珊瑚表面虫黄藻密度用式(4)计算

$$D = [(c/90\%) \times V]/(M/G) \quad (4)$$

式中,  $D$  为珊瑚表面虫黄藻密度( $\times 10^6$  个  $\cdot \text{cm}^{-2}$ ),  $c$  为虫黄藻浓度(个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ ),  $V$  为冲洗液体积(mL), 90% 为固定液中原液比例,  $M$  为包裹珊瑚样品铝箔纸重量(g),  $G$  为铝箔纸单位面积重量( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )。通过测量包裹在珊瑚表面铝箔纸的重量间接估算珊瑚的表面积。

#### 1.2.2 珊瑚叶绿素浓度测量

取 10~20  $\text{cm}^2$  的珊瑚,放入装有 10 mL 丙酮的离心管

中,在黑暗中 4  $^\circ\text{C}$  萃取 24 h,然后 4 500  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 15 min,取 3 个重复样。用分光光度计测定叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 c 的浓度,比色皿的光程为 1 cm。用式(5)~式(7)计算

$$\text{CHLa} = 10(11.85(A_{664} - A_{750}) - 1.54(A_{647} - A_{750}) - 0.08(A_{630} - A_{750}))/ (M/G) \quad (5)$$

$$\text{CHLb} = 10(21.03(A_{664} - A_{750}) - 5.43(A_{647} - A_{750}) - 2.66(A_{630} - A_{750}))/ (M/G) \quad (6)$$

$$\text{CHLc} = 10(24.52(A_{664} - A_{750}) - 1.67(A_{647} - A_{750}) - 7.6(A_{630} - A_{750}))/ (M/G) \quad (7)$$

式中, CHLa, CHLb 和 CHLc 依次为珊瑚体内单位表面积的叶绿素 a 含量( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )、叶绿素 b 含量( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )和叶绿素 c 含量( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  $A$  为不同波长下的吸光值。

### 1.3 基于实测光谱数据的卫星波段数据模拟

利用各卫星数据的光谱响应函数模拟计算珊瑚礁光谱信号在各卫星波段上的光谱响应值,计算公式如式(8)

$$\rho_i = \frac{\int_0^\infty R^S(\lambda) \Gamma_i(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \Gamma_i(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

式中,  $\rho_i$  是卫星第  $i$  波段的光谱响应值,  $\Gamma_i(\lambda)$  是第  $i$  波段的光谱响应函数,一般可由卫星数据发布网站上下载,  $R^S$  为野外测量计算得到的底质光谱反射率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 珊瑚礁不同底质类型的反射光谱曲线特征

#### 2.1.1 不同底质物种的反射光谱曲线特征

测量获取各底质类型的光谱曲线见图 1。由于在 700 nm 以上水体的吸收特别强烈,该波段的光谱特征基本都不能用于珊瑚礁的光学卫星遥感监测。因此,只分析各类别在 400~700 nm 之间的可见光波段光谱特征。从图 1 中可以看出,在整个可见光波段范围内,沙(Sand)和白化珊瑚(Bleached coral)的光谱曲线明显区别于其他三类,主要表现在沙和白化珊瑚的反射率较高,且整个波段范围内光谱曲线较为平直,其中又以沙的反射率最高。因此,沙和白化珊瑚的光谱可分性较好,直接根据光谱反射率在整个可见光波段的均值就可将他们识别出来。相比之下,健康珊瑚(Healthy coral)、海藻(Algae)、海草(Seagrass)都含有叶绿素等光合色素,其光谱曲线大小及形状存在一定的相似性,其光谱曲线特征主要取决于不同色素组成的吸收及荧光特征。海草的光谱曲线具有一定的植被光谱特征,即在绿波段的 555 nm 有一个反射峰,该反射峰是由叶绿素的强后向散射所造成的。珊瑚和海藻的光谱曲线极为相似,在 400~550 nm 之间,光谱曲线缓慢增加,在 550~650 nm 存在反射峰值区,675 nm 有一个吸收峰,之后光谱曲线快速递增。所不同的是,在 550~650 nm 之间,从本研究所采样本看,海藻在 600 和 650 nm 存在 2 个反射峰,而健康珊瑚在该波段范围内根据珊瑚属种的不同,反射峰的个数、形态和位置会有差别(详见下面关于不同属种的珊瑚光谱特征分析内容)。

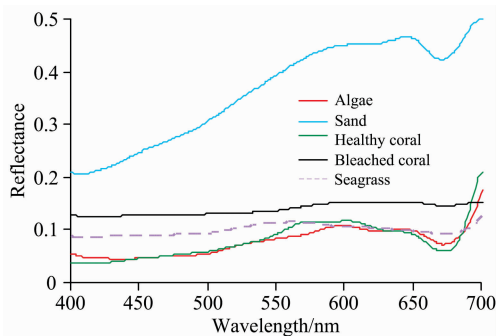


图 1 珊瑚礁不同底质类型光谱曲线图  
Fig. 1 The spectral curves of different coral reef bottom-types

计算各类别反射光谱曲线一阶微分值, 结果见图 2。从图中可以看出, 曲线中的极大值和极小值分别对应于各类别反射光谱曲线的吸收峰和反射峰。沙的一阶微分曲线在 645 和 685 nm 存在峰值, 且后者明显大于前者, 在 620 和 660 nm 存在两个吸收峰, 且后者低于前者。白化珊瑚的一阶微分曲线总体较为平直, 整条曲线在 0 值附近。相比之下, 海藻的一阶微分曲线起伏也较小, 其在 520 和 600 nm 存在两个较小的峰值。健康珊瑚和海藻的一阶微分曲线特征较为复杂。对应于其反射光谱曲线, 健康珊瑚的一阶微分峰值主要集中在 550~660 nm, 此外, 在 690 nm 左右也存在一峰值。海藻的一阶微分峰值也主要集中在 550~660 nm, 但在 690 nm 左右不存在峰值。

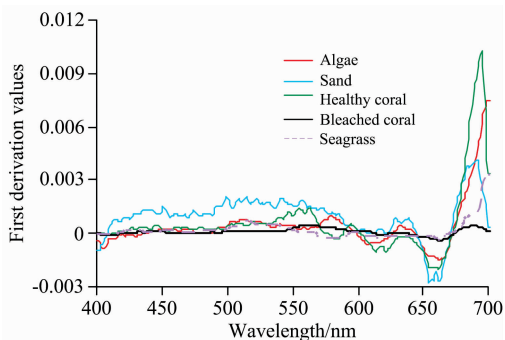


图 2 珊瑚礁不同底质类型光谱曲线一阶微分值  
Fig. 2 The first derivation of spectral reflectances of different coral reef bottom-types

### 2.1.2 不同科属种的珊瑚反射光谱曲线特征

图 3 显示了采集的 19 种不同珊瑚的反射光谱, 从图中可以看出健康珊瑚在 400~500 nm 波段呈现较为平坦的曲线, 在 550~660 nm 之间表现为较高的反射率, 但不同珊瑚种类在该波段的反射特征具有较为明显的差异, 珊瑚的科、属、种均会影响到珊瑚反射光谱曲线特征, 有的具有双峰特点, 有的具有三峰特点, 峰值位置也具有较大差异。

将图 3 中的珊瑚分为 4 个科: 其中箭排孔珊瑚 (*S. hystrix*)、板柱状珊瑚 (*Stylophoradanae*) 和鹿角杯形珊瑚 (*Pocilloporadamicornis*) 同属于杯形珊瑚科 (*Pocilloporidae*); 棘鹿角珊瑚 (*A. echinata*)、壁全蔷薇珊瑚

(*M. circumvallate*)、双异轴孔珊瑚 (*A. valida*)、叶状蔷薇珊瑚 (*M. foliosa*)、穗枝轴孔珊瑚 (*A. secale*)、浅蓝轴孔珊瑚 (*A. subulata*)、谷鹿角珊瑚 (*A. cerealis*)、柔枝轴孔珊瑚 (*A. tenuis*)、风信子鹿角珊瑚 (*A. hyacinthus*)、鼻形鹿角珊瑚 (*A. nasuta*)、浪花鹿角珊瑚 (*A. cytherea*)、多孔鹿角珊瑚 (*A. millepora*)、短小轴孔珊瑚 (*A. sarmentosa*) 和单星蔷薇珊瑚 (*M. monasteriata*) 同属于鹿角珊瑚科 (*Acroporidae*); 丛生盔形珊瑚 (*G. fascicularis*) 属于枇杷珊瑚科 (*Oculinidae*); 中华扁脑珊瑚 (*P. sinensis*) 属于蜂巢珊瑚科 (*Faviidae*)。图 4 显示了这 4 科珊瑚的反射光谱曲线。从图中可以看出, 杯形珊瑚科光谱特征主要集中在 550~675 nm 之间的反射峰, 虽然反射峰高低有所不同, 但大体形状较为相似。其中鹿角杯形珊瑚由于整体反射率偏低, 在该波段表现出 3 个波峰, 位置分别在 575, 610 和 650 nm, 而箭排孔珊瑚和板柱状珊瑚光谱更为相似, 仅在 610 和 650 nm 存在两个较为明显的反射峰。相比之下, 鹿角珊瑚科中的 14 种珊瑚, 其反射光谱特征差异较大。有的在 450~500 nm 之间就存在反射峰, 例如柔枝轴孔珊瑚在 445 nm 存在一反射峰, 风信子鹿角珊瑚在 520 nm 存在一反射峰。而大多数珊瑚的反射峰还是仅表现在 550~675 nm, 只是波峰位置、个数、大小存在差异。多孔鹿角珊瑚在整个波段都较为平坦, 在 550~675 nm 之间也无明显的反射峰。枇杷珊瑚科中的丛生盔形珊瑚和蜂巢珊瑚科中的中华扁脑珊瑚的反射率曲线都较为平坦, 前者在 575, 610 和 650 nm 存在三个较小的反射峰, 而后者在整个波段的反射率较低, 且仅在 610 和 650 nm 存在 2 个较小的反射峰。

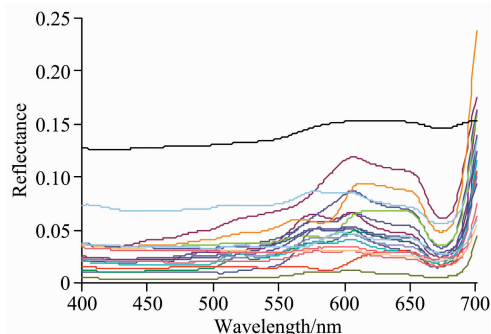


图 3 不同珊瑚样本的光谱曲线图  
Fig. 3 The spectral curves of different coral samples

继续将图 4 中的杯形珊瑚科和鹿角珊瑚科的珊瑚分为 4 个属的珊瑚: 排孔珊瑚属 (*Seriatopora*)、杯形珊瑚属 (*Pocilloporidae*)、鹿角珊瑚属 (*Acropora*) 和蔷薇珊瑚属 (*Montipora*)。其中, 前两者同属于杯形珊瑚科, 后两者同属于鹿角珊瑚科。排孔珊瑚属在本文中主要涉及箭排孔珊瑚和板柱状珊瑚, 而杯形珊瑚属主要涉及鹿角杯形珊瑚, 上述珊瑚的主要光谱特征已在图 3 中描述过, 这里不再重复。将蔷薇珊瑚属从鹿角珊瑚科中分离出来, 图 5(c) 中显示 11 种鹿角珊瑚属的珊瑚光谱也存在较大差异, 不仅表现在反射值大小, 还表现在反射峰个数、位置及形状。而图 5(d) 蔷薇珊瑚属中的壁全蔷薇珊瑚和叶状蔷薇珊瑚在整个波段的光谱形状较为相似, 在 575, 610 和 650 nm 存在三个较为明显的反射峰。相

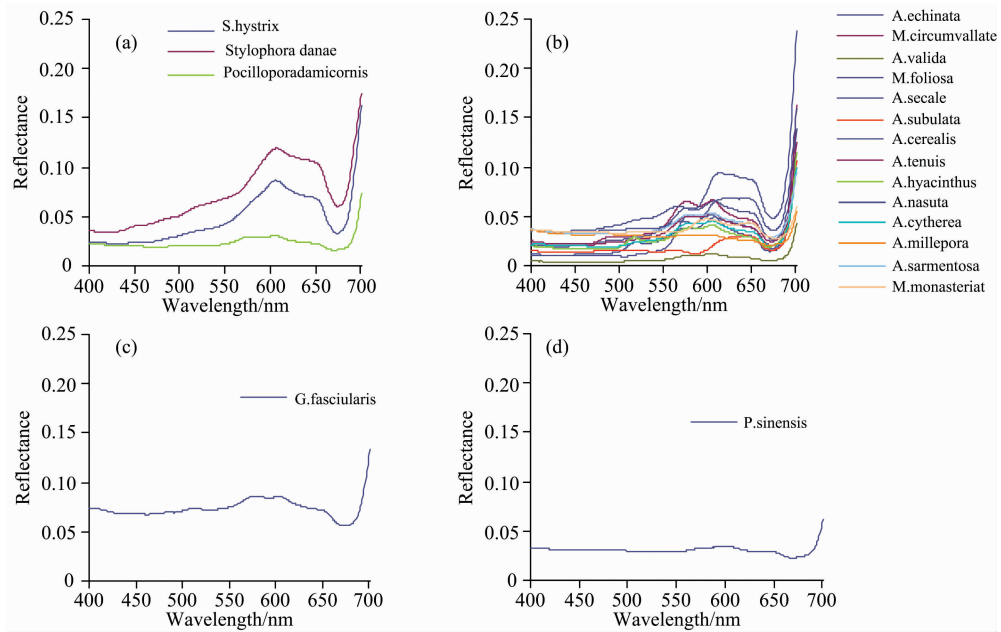


图 4 不同科的珊瑚光谱曲线图

(a): 杯形珊瑚科; (b): 鹿角珊瑚科; (c): 枇杷珊瑚科; (d): 蜂巢珊瑚科

Fig. 4 The spectral curves of corals from different families

(a): Pocilloporidae; (b): Acroporidae; (c): Oculinidae; (d): Faviidae

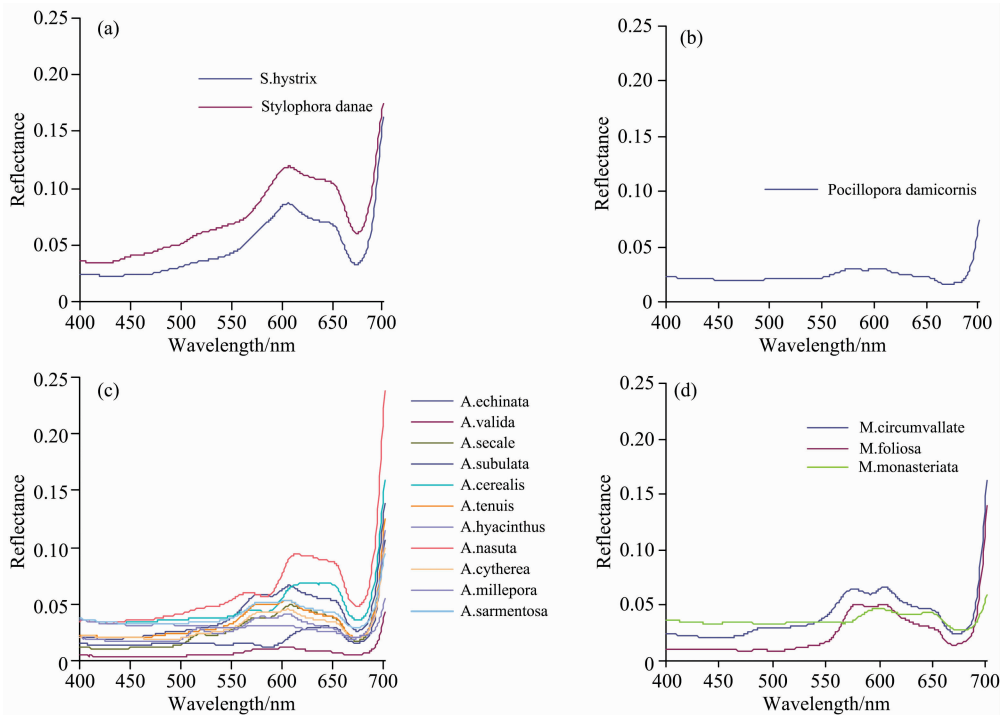


图 5 不同属的珊瑚光谱曲线图

(a): 排孔珊瑚属; (b): 杯形珊瑚属; (c): 鹿角珊瑚属; (d): 蔷薇珊瑚属

其中(a)和(b)同属于杯形珊瑚科; (c)和(d)同属于鹿角珊瑚科

Fig. 5 The spectral curves of corals from different genera

(a): Seriatopora; (b): Pocillopora; (c): Acropora; (d): Montipora

Seriatopora and Pocilloporabelong belong to Pocilloporidae; Acropora and Montiporabelong belong to Acroporidae

比之下,单星蔷薇珊瑚在 400~575 nm 之间反射曲线较为平坦,且反射值较高,在 605 和 650 nm 存在 2 个反射峰,但反射峰的斜率要明显小于另外两种蔷薇珊瑚的反射峰。

### 2.1.3 不同形状及颜色的珊瑚反射光谱特征

将不同种类珊瑚按照形状划分为枝状珊瑚和块状珊瑚,并比较它们的反射光谱差异。图 6 显示,14 种枝状珊瑚光谱差异较为明显。但 5 种块状珊瑚的光谱具有一定的相似性,主要表现在反射峰集中在 550~675 nm 之间,其中丛生盔形珊瑚、壁室蔷薇珊瑚和叶状蔷薇珊瑚的光谱更为相似,3 个反射峰位置均在 575, 610 和 650 nm。中华扁脑珊瑚和单星蔷薇珊瑚的反射峰位置在 610 和 650 nm,但中华扁脑珊瑚的整体反射率更为平坦。

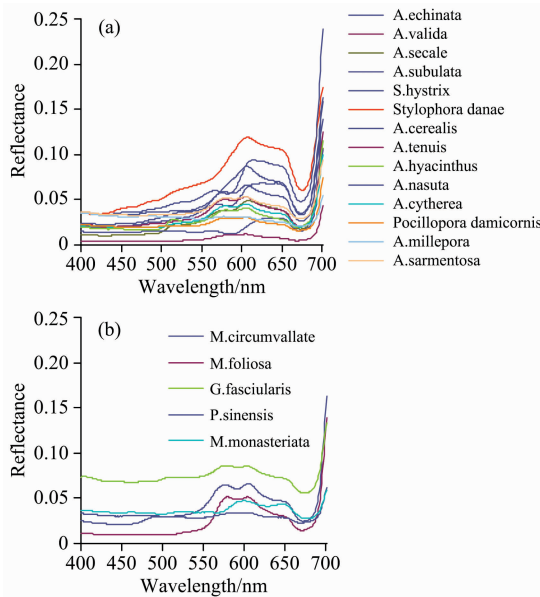


图 6 不同形状的珊瑚光谱曲线图

(a): 枝状珊瑚; (b): 块状珊瑚

Fig. 6 The spectral curves of corals with different shapes

(a): Branch corals; (b): Patch corals

分析珊瑚颜色对反射光谱的影响,图 7 显示了不同颜色的同种珊瑚反射光谱。结果表明,即便是同一种珊瑚,不同颜色会表现出不同的光谱特征。例如,淡绿色的鹿角杯形珊瑚存在 4 个明显的反射峰,分别在 520, 575, 610 和 650 nm,而淡紫色的鹿角杯形珊瑚仅在 500, 610 和 650 nm 存在 3 个反射峰。土黄色和绿色多孔鹿角珊瑚在 550~650 nm 之间的光谱较为相似,但绿色多孔鹿角珊瑚在 520 nm 的反射峰尤为明显,且高于 550~650 nm 之间的反射峰。

### 2.2 不同色素对珊瑚反射光谱特性的影响分析

统计 19 种珊瑚叶绿素 a 浓度、叶绿素 b 浓度、叶绿素 c 浓度和虫黄藻密度情况。其中,丛生盔形的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 c 浓度均最大,分别为 73.21, 19.83 和 45.93  $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 c 浓度最小值分别为 1.49, 0.06 和 1.13  $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,依次对应的为板柱状珊瑚、多孔鹿角珊瑚和谷鹿角珊瑚(*A. cerealis*)。虫黄藻密度含量最大值和最小值分别为  $2.35 \times 10^9$  和  $3.91 \times 10^6$  个·

$\text{cm}^{-2}$ ,依次对应的为柔枝轴孔珊瑚和谷鹿角珊瑚。计算各要素与珊瑚反射的相关系数,见图 8。结果表明,叶绿素浓度在整个波段范围内与反射光谱相关性均较好,表现出较为明显的正相关,且三种叶绿素浓度的相关规律较为一致,在 400~475 nm 之间的相关性最好,在 475~700 nm 之间相关曲线存在一些微小的波动,表现在 540, 595 和 675 nm 附近的局部相关峰值,但均小于 400~475 nm 之间的相关系数值。相比之下,虫黄藻密度与珊瑚的反射值关系曲线更为波折。在 400~550 nm 之间相关曲线均为负值,且波长越小,

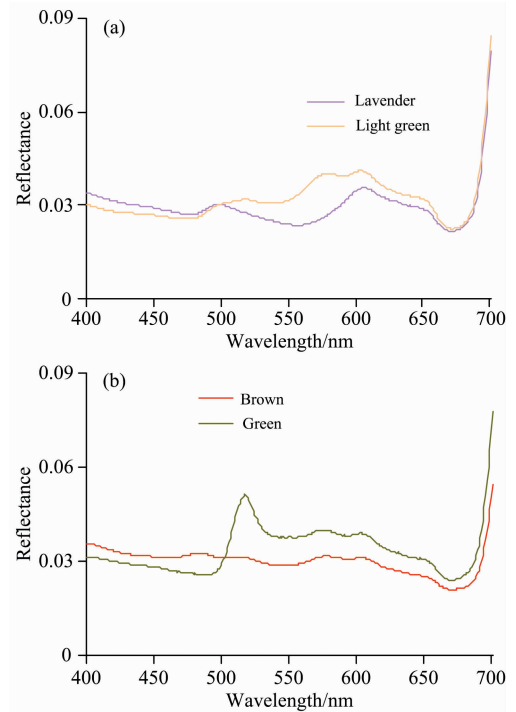


图 7 同种珊瑚不同颜色的光谱曲线图

(a): 鹿角杯形珊瑚; (b): 多孔鹿角珊瑚

Fig. 7 The spectral curves of the same coral with different colors

(a): *Pocillopora damicornis*; (b): *A. millepora*

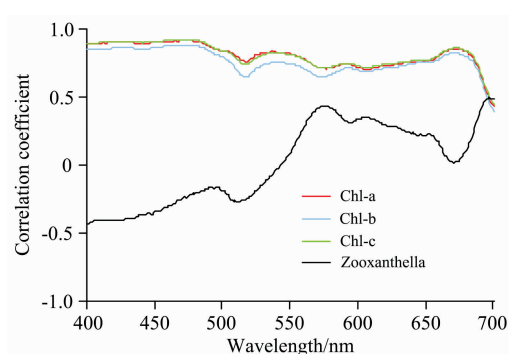


图 8 珊瑚反射光谱与叶绿素 a 浓度、叶绿素 b 浓度、叶绿素 c 浓度和虫黄藻密度的相关关系曲线

Fig. 8 The correlation coefficient curves of coral reflectance with Chl-a concentration, Chl-b concentration, Chl-c concentration and zooxanthella density

相关性越强(相关系数绝对值越大)。大于 550 nm, 相关性表现为正相关, 在 575, 610 和 650 nm 存在局部相关峰值, 其中 575 nm 为整个波段相关性最好的位置。这表明大多数珊瑚在 575, 610 和 650 nm 的局部反射峰是由虫黄藻的存在而引起的。

### 2.3 基于模拟卫星波段数据的珊瑚礁不同底质类型光谱可分性研究

目前, 可用于珊瑚礁遥感监测的常用中高空间分辨率光学卫星遥感数据主要包括 Landsat 系列、IKONOS、Quickbird 和 SPOT 系列, 选择 Landsat8、IKONOS、Quickbird 和

SPOT5, 比较不同卫星数据的空间分辨率及可见光主要波段设置见表 1。四种卫星数据的空间分辨率优劣排序依次是: Quickbird、IKONOS、SPOT5 和 Landsat8。但比较不同卫星的波段设置, Landsat8 搭载的 OLI 传感器包含近岸波段, 该波段因为具有更好的水体穿透能力, 对于珊瑚礁水体监测分类更有利。相比之下, SPOT5 的最短波长仅覆盖到绿波段, 因此, 对于珊瑚礁水下监测最为不利。比较四种卫星数据在 400~700 nm 的波段响应函数, IKONOS 和 Quickbird 较为相似, 可用波段为 3 个, Landsat8 为 4 个可用波段, 而 SPOT5 则只有 2 个可用波段。

表 1 不同光学卫星遥感数据空间分辨率及可见光主要波段设置比较

Table 1 The spatial resolution and band setting of different optical satellites for coral reef monitoring

性能指标	分辨率/m	近岸波段/ $\mu\text{m}$	蓝波段/ $\mu\text{m}$	绿波段/ $\mu\text{m}$	红波段/ $\mu\text{m}$	近红外波段/ $\mu\text{m}$
Landsat8	全色 15, 多光谱 30	0.433~0.453	0.450~0.515	0.525~0.6	0.63~0.68	0.845~0.885
IKONOS	全色 1, 多光谱 4		0.45~0.52	0.51~0.60	0.63~0.70	0.76~0.85
Quickbird	全色 0.6, 多光谱 2.4		0.45~0.52	0.52~0.6	0.63~0.69	0.76~0.9
SPOT5 空间	全色 2.5, 多光谱 10			0.49~0.61	0.61~0.68	0.79~0.89

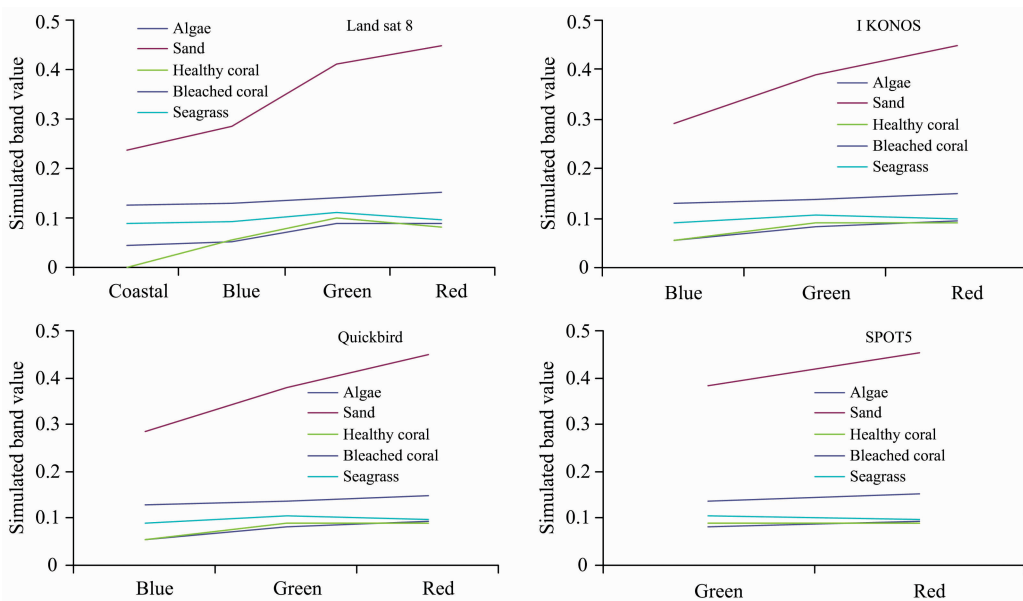


图 9 珊瑚礁遥感监测常用卫星拟合光谱值

Fig. 9 Simulated band values of common satellites data for coral reef monitoring

模拟计算海藻、沙、健康珊瑚、白化珊瑚和海草五种珊瑚礁底质类型的卫星波段值, 得到图 9 的珊瑚礁遥感监测常用卫星拟合光谱值。从图中可以看出, 4 种卫星数据均能较好的识别出沙和白化珊瑚, 这两类具有较高的反射率, 且沙的反射率还要明显高于白化珊瑚。对于海藻、海草和健康珊瑚, 不同卫星数据的识别能力具有一定差异。对于 Landsat8 卫星数据, 利用近岸波段-蓝波段的斜率可将健康珊瑚识别出来, 而蓝波段-绿波段的斜率可有效区分海藻和海草。而对于 IKONOS 和 Quickbird, 除了沙和白化珊瑚外, 利用蓝波段-绿波段的斜率也可识别出海草, 但由于海藻和健康珊瑚的波段表现极为相近, 则无法较好区分这两类。对于 SPOT5

卫星数据而言, 仅有可能识别出沙和白化珊瑚, 海藻、海草和健康珊瑚的光谱拟合曲线极为相近, 无法将他们有效区分开。而对于不同种类的珊瑚识别, 以上常用的多光谱卫星数据还无法诊断出不同科属种珊瑚的更为细小的光谱特征, 需要采用高光谱遥感数据进行有效识别。

### 3 结 论

明确珊瑚礁不同底质类型的光谱特性及它们之间的光谱可分性是实现珊瑚礁遥感监测的关键任务。基于野外实测光谱数据, 比较珊瑚礁不同底质类型的光谱特征。总体而言,

在整个可见光波段, 沙的反射率最高, 其次是白化珊瑚。通过比较可见光波段反射率值可有效识别沙和白化珊瑚。在 555 nm 左右的绿波段是有效区分海草和其他类别的特征波段。大多数的珊瑚在 550~650 nm 之间存在较为明显的多峰特征, 但对于不同种类的珊瑚而言, 科、属、种、珊瑚形状、珊瑚颜色的不同均会对珊瑚的反射光谱曲线造成影响。即便是同科同属的珊瑚, 或者是同种却不同颜色的珊瑚, 光谱特征也会有较大差异。通过叶绿素 a 浓度、叶绿素 b 浓度、叶绿素 c 浓度和虫黄藻密度与珊瑚光谱的相关分析发现, 叶绿素与珊瑚反射率相关性最好, 是影响珊瑚反射率光谱的主要因素之一, 而虫黄藻密度的高低会影响珊瑚光谱在局部波段

的峰值特征。对于四种常用的珊瑚礁遥感监测多光谱卫星数据(Landsat8, IKONOS, Quickbird 和 SPOT5), Landsat8 有望识别出沙、白化珊瑚、海藻、健康珊瑚、海草, IKONOS 和 Quickbird 有望识别出沙、白化珊瑚和海草, 而 SPOT5 数据仅能识别出沙和白化珊瑚。对于不同种类的珊瑚遥感识别, 多光谱卫星数据无法捕捉到特征波段, 需借助高光谱遥感数据。本研究虽然详细分析了珊瑚礁不同底质类型的光谱特性, 尤其是不同种类珊瑚的光谱特性, 但样本数据也较为有限, 后续工作中将进一步扩大底质样本数据集, 并尝试建立珊瑚礁光谱库, 为今后我国珊瑚礁遥感监测技术方法体系的建立提供基础数据。

## References

- [ 1 ] YU Ke-fu(余克服). Introduction to the Science of Coral Reefs(珊瑚礁科学概论). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2018. 39.
- [ 2 ] Kenchington, R. Marine Pollution Bulletin, 2018, 136: 509
- [ 3 ] ZHANG Zhen-dong, SHAO Kui-shuang, YANG Zheng-xian, et al(张振东, 邵魁双, 杨正先, 等). Marine Environmental Science(海洋环境科学), 2018, 37(4): 488.
- [ 4 ] Burke L, Reytar K, Spalding M, et al. Reefs at Risk Revisited. Washington DC: World Resources Institute, 2011. 1.
- [ 5 ] HUANG Hui, LI Xiu-bao(黄 晖, 李秀保). Chinese Science Bulletin(科学通报), 2013, 58(17): 1573.
- [ 6 ] Suchnan C, Keryea S, Assaf Z, et al. Conservation, Management, and Restoration of Coral Reefs. Zoology, 2015, 118: 133.
- [ 7 ] ZUO Xiu-ling, SU Fen-zhen, ZHAO Huan-ting, et al(左秀玲, 苏奋振, 赵焕庭, 等). Progress in Geography(地球科学进展), 2018, 37(11): 1463.
- [ 8 ] Scopélitis J, Andréfouët S, Phinn S, et al. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60: 1958.
- [ 9 ] Hedley, J, Roelfsema C, Chollett I, et al. Remote Sensing, 2016, 8: 15.
- [10] Xu J P, Zhao D Z. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34: 20.
- [11] Tristan P, Touria B, Pascal M, et al. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 352.
- [12] Hedley J D, Mumby P J. Advances in Marine Biology, 2002, 43: 285.
- [13] Johannes R E, Wiebe W J. Limnology and Oceanography, 1970, 15: 823.

## The Analysis of Spectral Separability of Different Coral Reef Benthos and the Influence of Pigments on Coral Spectra Based on in Situ Data

XU Jing-ping, LI Fang\*, MENG Qing-hui, WANG Fei

National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

**Abstract** One task of coral reef remote sensing is to obtain the composition and distribution of benthic categories. However, there is still a great deal of uncertainty and difficulty to discriminate reef benthos by means of remote sensing owing to the spatial heterogeneity and complicated spectrum of coral reef. Spectral characteristics of different coral reef benthos are the basic prior knowledge for remote sensing of coral reefs. Based on in situ spectral data and simulated satellite data, this paper analyzed the spectral characteristics of different coral reef benthos, especially the spectral properties of different coral types. The influence of coral pigments on coral spectra was also analysed. Finally, four kinds of commonly used satellite data(Landsat 8, IKONOS, Quickbird and SPOT 5) were simulated to investigate the spectral separability of different reef benthos from space. Results showed that sand and bleached corals could be easily identified by the reflectance curves in the visible bands. The first-order spectral derivation in visible bands was a good way to distinguish algae, seagrass and healthy corals. The differences of families, genera, species, coral shapes and coral colors would have obvious impact on the spectral characters of corals. In addition, Chlorophyll contents (including Chlorophyll-a, Chlorophyll-b and Chlorophyll-c) had high correlativity with reflectance of corals, which would exert notable influence on coral spectral features. Zooxanthella had the similar influence, but not as obviously as that of chlorophyll. Its density would affect the peak features of coral reflectance. Among the commonly used multi-spectral satellite data, Landsat 8 had the ability to distinguish sand, bleached corals, algae, healthy corals and seagrass owing to its coastal

band, while IKONOS and Quickbird could identify sand, bleached corals and seagrass. Comparatively, SPOT5 had a poor performance, which could only identify sand and bleached corals. However, in the identification of different types of corals, multi-spectral satellite data failed to capture the elaborated spectral features and hyperspectral data with high spatial resolution was needed for effective identification. In the future work, we will further expand more coral reef benthos samples and establish the spectral database of coral reef to provide the data support for the establishment of coral reef monitoring system in China.

**Keywords** Coral reef; Spectra; Remote sensing, Chlorophyll; Zooxanthella

(Received Jan. 31, 2019; accepted May 18, 2019)

\* Corresponding author