

南海三亚湾鹿回头海域风信子鹿角珊瑚反射率分析

陈标^{1,2}, 陈永强^{1,3}, 黄晖^{1,3}, 谢强^{4,5}, 江玉凤^{1,2}, 雷新明¹,
江雷^{1,2}, 张诗泽^{1,2}, 周国伟^{1,3}

1. 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院海南热带海洋生物重点实验站, 海南 三亚 572000; 4. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301; 5. 中国科学院三亚深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000

摘要: 珊瑚礁反射率特征识别工作的开展, 将促进遥感技术在珊瑚礁监测与管理中的应用。国外已有学者对特定区域不同珊瑚礁底质反射率进行识别分类, 而我国珊瑚礁反射率特征研究尚未见诸报道, 亟须相关研究来弥补这一空白。文章以南海三亚湾鹿回头海域常见风信子鹿角珊瑚 *Acropora hyacinthus* 为主要研究对象, 利用光谱仪测量其反射率。分析发现健康风信子鹿角珊瑚反射率在 575、605、650nm 处出现特征波峰; 死亡风信子鹿角珊瑚反射率明显高于健康风信子鹿角珊瑚反射率。利用大型多元统计软件 PRIMER 6 对健康风信子鹿角珊瑚、死亡风信子鹿角珊瑚、珊瑚礁底砂进行 Bray-Curtis 相似聚类(CLUSTER)分析, 结果显示, 在 80%相似水平上可以对其进行区分。一阶导数分析表明健康与死亡风信子鹿角珊瑚敏感波段为 490~560nm。

关键词: 三亚; 风信子鹿角珊瑚; 反射率分析

中图分类号: TP79; Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2015)01-0071-06

Analysis of reflectance by *Acropora hyacinthus* in Luhuitou, Sanya of the South China Sea

CHEN Biao^{1,2}, CHEN Yong-qiang^{1,3}, HUANG Hui^{1,3}, XIE Qiang^{4,5}, JIANG Yu-feng^{1,2},
LEI Xin-ming¹, JIANG Lei^{1,2}, ZHANG Shi-ze^{1,2}, ZHOU Guo-wei^{1,3}

1. Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 ;
3. National Experiment Station of Tropical Marine Biology, Hainan Island, Sanya 572000;
4. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 510301;
5. Sanya Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000

Abstract: An application of remote sensing in monitoring and management of coral was developed with reflectance identification of coral substrate. Some foreign scholars have discriminated reflectance of coral substrate, while the reflectance of different coral substrate discrimination in the South China Sea did not exist. This study explored reflectance of *Acropora hyacinthus* at Luhuitou Sanya using spectrum instrument. Healthy *Acropora hyacinthus* exhibited positive reflectance features at 570, 600 and 650 nm. Reflectance by dead *Acropora hyacinthus* was obviously higher than that by healthy *Acropora hyacinthus*, and did not have positive reflectance features. The differential analysis of coral substrate reflectance use PRIMER6 software packages Clustering. Healthy *Acropora hyacinthus* reflectance, dead *Acropora hyacinthus* reflectance and sand reflectance can be distinguished at the level of 80% Bray-Curits similarity. Based on reflectance derivative analysis, the first

收稿日期: 2013-08-23; 修订日期: 2014-06-19。林强编辑

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC19B08); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201305030-3); 国家青年基金项目(41306144、41406186)

作者简介: 陈标(1987~), 男, 河北省保定市人, 硕士研究生, 主要从事珊瑚反射率识别研究。E-mail: chen.28.happy@163.com

通信作者: 黄晖。E-mail: huanghui@scsio.ac.cn

derivative of reflectance between 490 and 560 nm provided good identification of healthy and dead *Acropora hyacinthus*.

Key words: Sanya; *Acropora hyacinthus*; reflectance analysis

珊瑚礁生态系统是生物多样性最高的海洋生态系统之一, 具有非常重要的社会、经济和文化价值 (Spillman et al, 2011)。海水表面温度上升, 海水 pH 下降, 人类破坏活动加剧等因素, 使珊瑚礁生态系统受到严重破坏 (Carilli et al, 2012; Miller et al, 2011; Sridhar et al, 2012)。目前, 世界珊瑚礁中仅有 46% 处于健康状态 (Wilkinson, 2008); 在过去 30 年里, 我国南海海域珊瑚礁已有 80% 退化 (Hughes et al, 2012)。加强珊瑚礁全面监测与管理工作开展, 具有重要的意义。

珊瑚礁遥感技术具有大面积、实时监测等特点, 可以作为珊瑚礁监测与管理的有效工具 (Klemas, 2011; Philipson et al, 2003)。然而, 不同珊瑚礁底质反射率的多样性, 限制了该技术在现实中的应用 (Hedley et al, 2004)。目前, 亟须对不同珊瑚礁底质反射率特征进行研究, 实现不同珊瑚礁底质反射率识别, 从而促进珊瑚礁遥感技术发展 (Karpouzli et al, 2003; Karpouzli et al, 2004)。Yamano 等通过监测不同健康状况下珊瑚反射率, 发现白化珊瑚反射率高于健康珊瑚反射率, 对健康珊瑚与白化珊瑚反射率进行了很好识别与区分 (Yamano et al, 2003)。Holden 与 Ledrew 对健康珊瑚与死亡珊瑚反射率进行聚类分析、导数分析, 得到区分健康珊瑚与死亡珊瑚的敏感波段 500~590nm (Holden et al, 2001)。另外, 一些学者根据不同珊瑚反射率特征, 将珊瑚反射率大致分为蓝型和棕型两种 (Hochberg et al, 2004), 并利用导数分析方式对不同珊瑚礁底质进行可区分性研究 (Leiper et al, 2012; Hamylton et al, 2012; Wettle et al, 2003)。通过对特定区域珊瑚反射率研究, 证明反射率对不同珊瑚礁识别研究的可行性, 为后续工作奠定基础。

我国南海分布着大量珊瑚, 是世界珊瑚礁的重要组成部分, 而有关我国珊瑚礁反射率的相关研究尚未见报道。为了解南海珊瑚礁反射率特征, 同时促进我国珊瑚礁反射率识别工作的展开, 本文选择南海三亚湾海域常见的风信子鹿角珊瑚 *Acropora hyacinthus* 为研究对象, 对健康风信子鹿角珊瑚、死亡风信子鹿角珊瑚和珊瑚礁底砂的反射率进行测量, 并对所得反射率进行聚类分析与导数分析, 初步探讨了该区域不同珊瑚礁底质成分反射率的可区分性, 确定了健康与死亡风信子鹿角珊瑚敏感波段, 期望

为我国珊瑚礁遥感技术的实际应用提供理论支撑作用。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

2013 年 2 月与 2014 年 5 月, 于南海三亚湾鹿回头海域 (图 1), 对健康风信子鹿角珊瑚、死亡风信子鹿角珊瑚、珊瑚礁底砂进行样品随机采集。珊瑚群体样品大小在 10 厘米左右, 健康风信子鹿角珊瑚暂养于岸基珊瑚养殖实验缸, 实验缸养殖条件充分模拟野外环境, 对其持续更换经过简单过滤的海水, 水温控制在 26℃, 光线为实时太阳光。所采集死亡风信子鹿角珊瑚, 其死亡时间为半年之内, 骨骼无明显藻类覆盖。

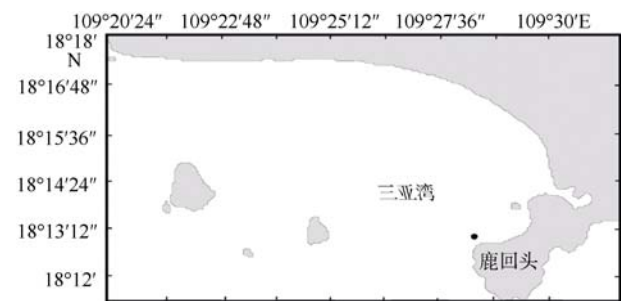


图 1 采样站位图 (实心圆点代表采样区域)

Fig. 1 The region where samples were collected

1.2 反射率采集

健康风信子鹿角珊瑚暂养 4 小时, 待其生理状态稳定后, 开始对其进行反射率采集 (Wettle et al, 2003)。反射率采集条件为, 天空晴朗, 无云遮挡 (Stambler et al, 2007)。实验使用美国海洋光学光谱仪 (USB2000+), 其测量范围 200~850nm, 分辨率 1.34nm, 采样步长 0.6nm, 视场角为 25°。测量时将样品放在装有海水的玻璃缸内, 玻璃缸用黑色尼龙布在四周遮光, 以免玻璃缸壁光反射对实验结果产生误差 (Hamilton et al, 2012; Hochberg et al, 2000)。光纤探头距离样品定为 5cm, 其中光纤探头与样品间水柱对光线的影响忽略不计 (Holden et al, 1998; Holden et al, 1999), 每个样品重复测量 10 次。为减少外界光线变化对测量值影响, 每次样品测量前校正光谱仪参数 (Clark et al, 2000)。分别得到健康风信子鹿角珊瑚反射率 ($n=100$)、死亡风信子鹿角珊瑚反射率 ($n=30$)、砂反射率 ($n=60$)。

1.3 数据处理

可见光在水体内具有较好的穿透能力, 能较好服务于水下遥感应应用(黄建波, 2006), 因此, 本文选用 400~700nm 波段下的反射率进行分析。通过求平均值方式, 确定不同珊瑚礁底质反射率特征。利用软件 PRIMER 6 对健康风信子鹿角珊瑚平均反射率、死亡风信子鹿角珊瑚平均反射率、珊瑚礁底砂平均反射率进行聚类分析, 聚类分析以样品间 Bray- Curtis 相似性为依据进行分组, 使组内样品相似性高于组间样品相似性(吴荣军 等, 2006; 张敬怀 等, 2009), 根据不同珊瑚礁底质的 Bray-Curtis 相似性三角矩阵, 构建不同珊瑚礁底质等级聚类枝状图和非度量多维标度(MDS)标序图。

反射率导数能放大不同反射率之间差异(Karpouzli et al, 2003), 利用统计软件 Sigmaplot 11.0 对反射率数据进行一阶导数分析, 根据反射率导数差异性确定健康与死亡的风信子鹿角珊瑚敏感波段。

2 实验结果

2.1 风信子鹿角珊瑚与珊瑚礁底砂反射率

不同珊瑚礁底质会因所含色素、几何结构等因素的差异, 而表现出不同的反射率特征。健康风信子鹿角珊瑚反射率在蓝波段(455~492nm)附近出现较低值, 这在很大程度上与光合作用吸收有关; 575、605、650nm 处出现 3 个特征波峰; 675nm 处出现波谷; 之后反射率明显增加(图 2)。死亡风信子鹿角珊瑚反射率在 400~550nm 波段呈现缓慢增长趋势, 550~600nm 波段波形趋于平缓、无显著波峰, 675nm 处同样出现波谷, 之后反射率明显增加(图 3)。珊瑚礁底砂反射率在可见光波段内, 呈现出增加趋势, 无显著波峰特征(图 4)。

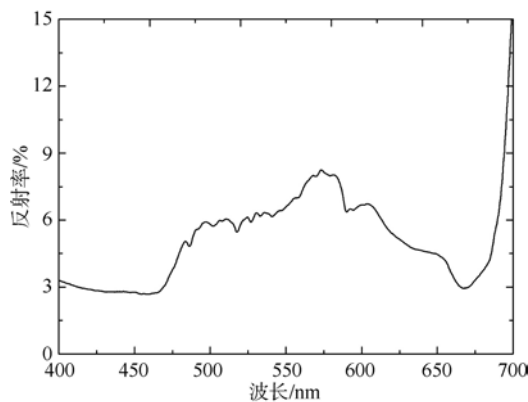


图 2 健康风信子鹿角珊瑚反射率

反射率为健康风信子鹿角珊瑚反射率平均值($n=100$)

Fig. 2 Reflectance of healthy *Acropora hyacinthus*

可见光波段内(400~700nm)健康风信子鹿角珊瑚反射率整体上小于 0.1, 死亡风信子鹿角珊瑚反射率处于 0.6~0.9 之间, 明显大于健康风信子鹿角珊瑚反射率, 珊瑚礁底砂反射率处于 0.1~0.6 之间, 不同珊瑚礁底质反射率存在明显差异(图 5)。

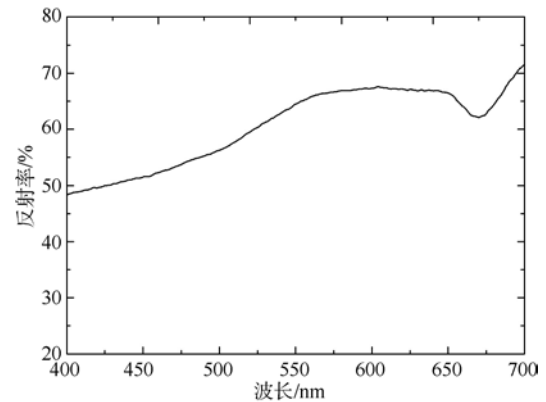


图 3 死亡风信子鹿角珊瑚反射率

反射率为死亡风信子鹿角珊瑚反射率平均值($n=30$)

Fig. 3 Reflectance of dead *Acropora hyacinthus*

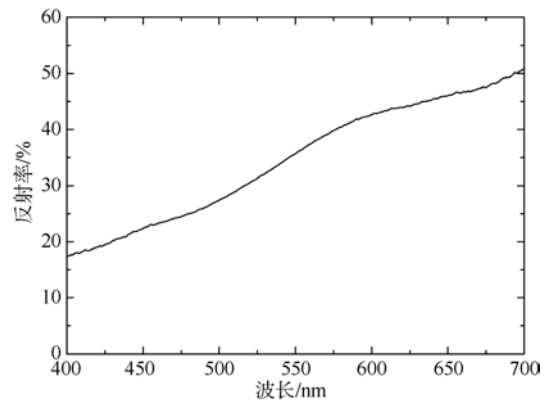


图 4 珊瑚礁底砂反射率

反射率为珊瑚礁底砂反射率平均值($n=60$)

Fig. 4 Reflectance of sand

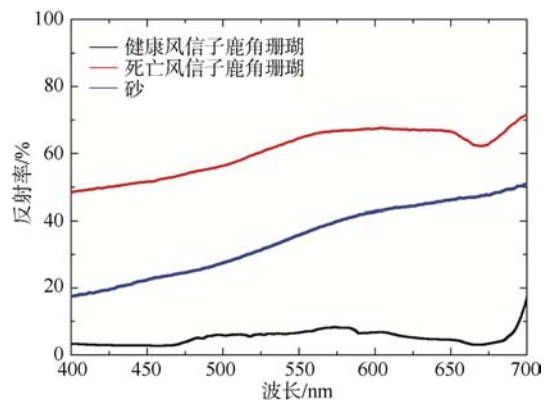


图 5 不同珊瑚礁底质反射率

Fig. 5 Reflectance of different coral reefs

2.2 不同珊瑚礁底质聚类分析与 MDS 标序

根据统计结果, 在 80% 的 Bray-Curtis 相似性水平上, 可以将 19 个反射率分成 3 组, 显示出不同珊瑚礁底质系数水平等级。其中, 一组包括 100% 健康风信子鹿角珊瑚(H1~H10), 一组包括 100% 死亡风信子鹿角珊瑚(D1~D3), 一组包括 100% 珊瑚礁底砂(S1~S6)(图 6)。MDS 标序分析中压力系数为 0.01, 显示出其二维空间平面图能准确解释不同珊瑚礁底质反射率在空间的相似性。MDS 标序图上清楚地标明了聚类分析的聚类组, 显示出不同珊瑚礁底质反射率差异性(图 7)。对 3 个不同珊瑚礁底质进行组间差异性分析, 结果显示, 各组间差异性显著(ANOSIM: $p < 0.05$), 说明不同珊瑚礁底质反射率组成差异性明显。

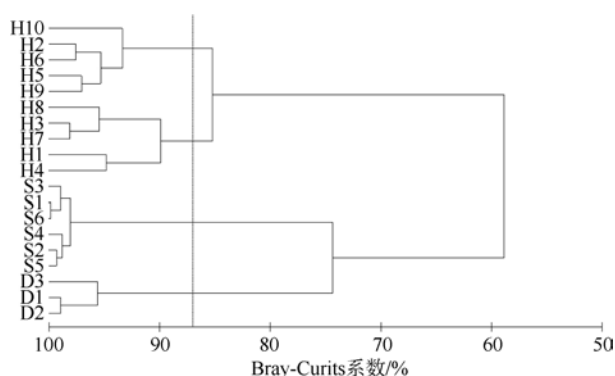


图 6 不同珊瑚礁底质反射率聚类分析

左侧为不同珊瑚礁底质类型, H1~H10 代表健康风信子鹿角珊瑚平均反射率, D1~D3 代表死亡风信子鹿角珊瑚平均反射率, S1~S6 代表珊瑚礁底砂平均反射率, 横坐标代表不同的相似水平, 从左向右逐次降低。H 代表健康风信子鹿角珊瑚反射率, D 代表死亡风信子鹿角珊瑚反射率, S 代表珊瑚礁底砂反射率。

Fig. 6 Cluster analysis of different coral substrates

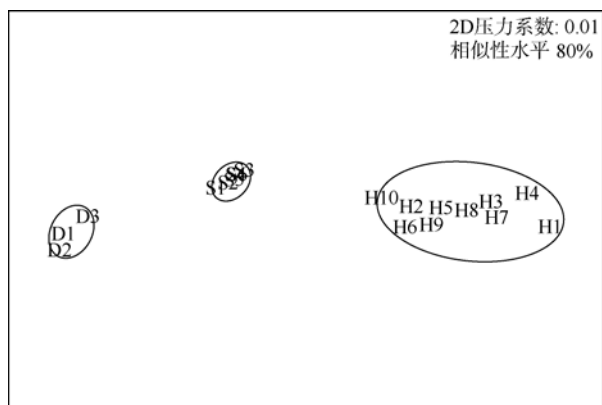


图 7 不同珊瑚礁底质 MDS 标序分析

Fig. 7 MDS analysis of different coral substrate

2.3 健康与死亡风信子鹿角珊瑚反射率导数分析

反射率导数分析能够反映出不同健康状况下珊

瑚反射率信号相反的区域, 简化反射率特征识别 (Karpouzli et al, 2003)。本文在 4nm 间隔下对健康风信子鹿角珊瑚与死亡风信子鹿角珊瑚反射率进行一阶导数分析。

一阶导数分析结果表明, 在 490~560nm 波段范围内, 健康与死亡风信子鹿角珊瑚反射率信号相反, 能够很好地区分健康与死亡风信子鹿角珊瑚; 400~464nm 波段死亡风信子鹿角珊瑚反射率一阶导数略高于健康风信子鹿角珊瑚反射率一阶导数; 其他波段范围内, 健康与死亡风信子鹿角珊瑚反射率一阶导数值差异不明显, 难以进行区分(图 8)。

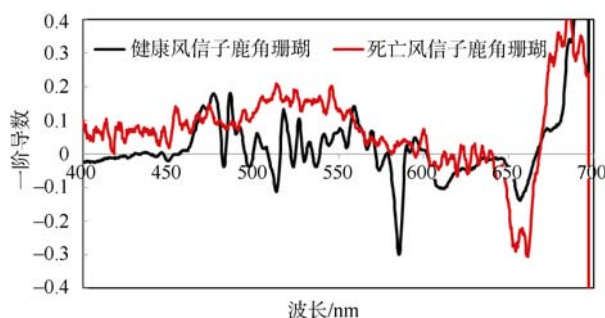


图 8 健康与死亡风信子鹿角珊瑚反射率一阶导数

Fig. 8 First-order derivative of healthy and dead *Acropora hyacinthus*

3 讨论

随着全球气候变化及人类活动的影响, 珊瑚礁生态系统多样性正在急剧缩减、生态功能严重退化 (Ravindran et al, 2012), 珊瑚礁监测与管理工作的进一步开展显得尤为重要。我国珊瑚礁中的多数岛礁远离陆地, 一些岸礁位置较为偏远, 给监测与管理造成诸多不便(王圆圆 等, 2007)。具有实时、大面积监测特性的珊瑚礁遥感技术, 有助于我国珊瑚礁监测与管理工作的开展。目前, 珊瑚礁遥感技术的基础与核心工作是对不同珊瑚礁底质反射率进行识别研究 (Hedley et al, 2012)。国内珊瑚礁底质反射率研究尚处于起步阶段, 加大研究珊瑚礁底质反射率识别的力度显得极为重要。通过对我国南海三亚湾鹿回头海域风信子鹿角珊瑚的反射率识别, 确定健康与死亡风信子鹿角珊瑚反射率敏感波段, 将促进我国对珊瑚监测与保护工作开展, 同时也有利于我国珊瑚礁遥感技术的发展。

本研究对风信子鹿角珊瑚反射率进行识别, 健康风信子鹿角珊瑚反射率在 575、605、650nm 处出现显著波峰, 与 Karpouzli et al(2003)研究结果相一致。风信子鹿角珊瑚光谱为典型棕色型珊瑚光谱,

在 675nm 处出现的波谷主要是共生藻进行光合作用吸光所致,也是能进行光合作用的生物体反射率的特征波谷。死亡风信子鹿角珊瑚反射率在可见光波段范围内反射率高于健康风信子鹿角珊瑚反射率,与 Holden et al(1998)所测死亡珊瑚反射率波形相似,但反射率相对偏高,这与不同珊瑚的骨骼结构和色素覆盖情况有关。珊瑚礁底砂反射率低于死亡珊瑚反射率,原因是珊瑚礁底砂样品含有微藻或色素吸光。聚类分析结果表明,健康风信子鹿角珊瑚、死亡风信子鹿角珊瑚和珊瑚礁底砂反射率特征在 80% 的 Bray-Curtis 相似水平上能够得到很好区分,表明反射率能很好地对不同珊瑚礁底质进行识别。为进一步开展反射率对不同珊瑚礁底质识别的研究奠定基础。

健康与死亡珊瑚反射率敏感波段的确定,可在珊瑚礁遥感传感器设计中起到指导作用。导数分析方式能放大不同研究对象反射率间差异性,便于确定健康与死亡珊瑚反射率敏感波段。通过对健康与死亡风信子鹿角珊瑚反射率一阶导数分析,发现 490~560nm 反射率信号相反区域能够很好地对健康风信子鹿角珊瑚与死亡风信子鹿角珊瑚进行区分。这与 Holden et al(1998)所得的健康与死亡

珊瑚敏感波段(500~590nm)结果基本一致,其差异可能与珊瑚死亡后藻类快速覆盖有关,后续将对其进行深入研究。

目前,珊瑚礁底质反射率光谱的多样性与可区分性研究,是珊瑚礁遥感技术中急需解决的问题。根据不同珊瑚礁底质反射率特征,对不同珊瑚礁底质进行识别,确定健康与死亡珊瑚敏感波段,实现反射率对健康与死亡珊瑚的识别,可为珊瑚礁遥感传感器设计及应用提供指导。本文利用反射率技术,着重探讨了风信子鹿角珊瑚反射率识别的可行性,确定健康与死亡风信子鹿角珊瑚敏感波段。实验结果显示,利用反射率能够很好地对南海三亚湾鹿回头海域常见的风信子鹿角珊瑚进行识别。此外,确定了反射率识别健康与死亡风信子鹿角珊瑚敏感波段为 490~560nm,为后续研究工作的开展打下基础。但是,本研究受珊瑚种类数量及研究区域的限制,未能对不同区域、不同类型珊瑚礁底质反射率特征进行对比分析研究。未来工作重点将是对大范围内不同珊瑚礁底质反射率识别进行研究,寻找不同区域珊瑚礁底质普遍存在的反射率特征,以促进遥感技术在珊瑚礁监测与管理中的应用与发展。

参考文献

- 黄建波. 2006. 中国海岛·沙洲·珊瑚礁遥感监测应用中的典型问题研究[D]. 青岛: 中国海洋大学: 50-64.
- 王圆圆, 刘志刚, 李京, 等. 2007. 珊瑚礁遥感研究进展[J]. 地球科学进展, 22(4): 396-402.
- 吴荣军, 李瑞香, 朱明远, 等. 2006. 应用 PRIMER 软件进行浮游植物群落结构的多元统计分析 [J]. 海洋与湖沼, 37(4): 316-321.
- 张敬怀, 高阳, 方宏达, 等. 2009. 珠江口大型底栖生物群落生态特征[J]. 生态学报, 29 (6): 2989-2999.
- CARILLI J, DONNER S D, HARTMANN A C. 2012. Historical temperature variability affects coral response to heat stress[J]. PLoS ONE, 7(3): 1-9.
- CLARK C D, MUMBY P J, CHISHOLM J R M, et al. 2000. Spectral discrimination of coral mortality states following a severe bleaching event[J]. International Journal of Remote Sensing, 21(11): 2321-2327.
- HAMYLTON S. 2012. A comparison of spatially explicit and classic regression modelling of live coral cover using hyperspectral remote-sensing data in the Al Wajh lagoon, Red Sea[J]. International Journal of Geographical Information Science, 26(11): 2161-2175.
- HEDLEY J D, MUMBY P J, JOYCE K E, et al. 2004. Spectral unmixing of coral reef benthos under ideal conditions[J]. Coral Reefs, 23(1): 60-73.
- HEDLEY J D, ROELFSEMA C M, PHINN S R, et al. 2012. Environmental and sensor limitations in optical remote sensing of coral reefs: Implications for monitoring and sensor design [J]. Remote Sensing, 4(1): 271-302.
- HOCHBERG E J, ATKINSON M J. 2000. Spectral discrimination of coral reef benthic communities [J]. Coral Reefs, 19(2): 164-171.
- HOCHBERG E J, ATKINSON M J, APPRILL A, et al. 2004. Spectral reflectance of coral[J]. Coral Reefs, 23(1): 84-95.
- HOLDEN H, LEDREW E. 1998. Spectral discrimination of healthy and non-healthy corals based on cluster analysis, principal components analysis, and derivative spectroscopy[J]. Remote Sens Environ, 65: 217-224.
- HOLDEN H, LEDREW E. 1999. Hyperspectral identification of coral reef features[J]. International journal of remote sensing, 25: 2545-2563.
- HOLDEN H, LEDREW E. 2001. Hyperspectral discrimination of healthy versus stressed corals using in situ reflectance[J]. Journal of Coastal Research, 17(4): 850-858.
- HUGHES T P, HUANG H, YOUNG M A. 2012. The wicked problem of China's disappearing coral reefs[J]. Conservation Biology, 27(2): 261-269.
- KARPOUZLI E, MALTHUS T. 2003. Hyperspectral discrimination of coral reef benthic communities[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4: 2377-2379.

- KARPOUZLI E, MALTHUS T J, PLACE C J. 2004. Hyperspectral discrimination of coral reef benthic communities in the western Caribbean[J]. *Coral Reefs*, 23(1): 141–151.
- KLEMAS V. 2011. Remote sensing techniques for studying coastal ecosystems: An overview[J]. *Journal of Coastal Research*, 27(1): 2–17.
- LEIPER I, PHINN S, DEKKER A G. 2012. Spectral reflectance of coral reef benthos and substrate assemblages on Heron Reef, Australia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(12): 3946–3965.
- MILLER M W, PINIAK G A, WILLIAMS D E. 2011. Coral mass bleaching and reef temperatures at Navassa Island, 2006[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91(1): 42–50.
- PHILIPSON P, LINDELL T. 2003. Can coral reefs be monitored from space?[J]. *Ambio*, 32(8): 586–593.
- RAVINDRAN J, KANNAPIRAN E, MANIKANDAN B, et al. 2012. Bleaching and secondary threats on the corals of Palk Bay: A survey and Proactive conservation needs[J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 41(1): 19–26.
- SPILLMAN C M. 2011. Advances in Forecasting Coral Bleaching Conditions for Reef Management[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12): 1586–1591.
- SRIDHAR P N, ALI M M, RAO M V, et al. 2012. Photosynthetically active radiation, a critical parameter for mass coral bleaching in the North Indian Ocean[J]. *Current Science*, 102(1): 114–118.
- STAMBLER N, SHASHAR N. 2007. Variation in spectral reflectance of the hermatypic corals, *Stylophora pistillata* and *Pocillopora damicornis*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 351(1): 143–149.
- WETTLE M, FERRIER G, LAWRENCE A J, et al. 2003. Fourth derivative analysis of Red Sea coral reflectance spectra[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 24(19): 3867–3872.
- WILKINSON C. 2008. Status of coral reefs of the world: 2008[M]. Townsville: Institute of Marine Science Press: 5–8.
- YAMANO H, TAMURA M, KUNII Y, et al. 2003. Spectral reflectance as a potential tool for detecting stressed corals[J]. *Galaxea*, 5: 1–10.