

三亚鹿回头海域疣状杯形珊瑚反射率光谱分析

陈永强^{1,2}, 雷新明¹, 陈标³, 黄晖^{1,2*}

1. 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室(LMB), 广东 广州 510301

2. 中国科学院海南热带海洋生物重点实验站, 海南 三亚 572000

3. 济宁市第一人民医院真菌实验室, 山东 济宁 272111

摘要 珊瑚礁地物光谱特征是珊瑚礁遥感研究的理论基础, 可以作为遥感定性和定量研究珊瑚礁的依据。采用我国南海三亚湾鹿回头海域的优势物种疣状杯形珊瑚(*Pocillopora verrucosa*)为研究对象, 用光纤光谱仪测量其反射率光谱。利用珊瑚反射率光谱和导数分析的方法研究了健康和白化两种状态下疣状杯形珊瑚的反射率光谱的差异。研究分析的结果显示: 健康疣状杯形珊瑚的反射率光谱, 在波长 580, 604.7 和 647 nm 处出现了特征波峰, 在波长 669 nm 处出现一个显著的波谷; 白化疣状杯形珊瑚的反射率光谱明显高于健康疣状杯形珊瑚的反射率光谱, 但是其波形相对较为平缓, 在波长 663 nm 处存在一个相对较弱的波谷。反射率光谱导数分析发现健康与白化疣状杯形珊瑚存在多个可区分波段, 其中主要可区分波段包括: 一阶导数, 404~425, 456~466, 513~532, 563~568 和 661~667 nm 等; 二阶导数, 408~420, 542~556, 563~573, 615~634 和 687~695 nm 等; 四阶导数, 402~418, 466~472, 478~481, 617~622 和 684~689 nm 等。

关键词 三亚湾鹿回头; 疣状杯形珊瑚; 反射率光谱

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0441-05

引言

珊瑚礁生态系统拥有可以媲美热带雨林的丰富物种, 对人类社会有非常重要的社会经济和文化价值^[1]。随着全球气候的变化, 人类破坏活动加剧等使珊瑚礁生态系统受到严重破坏, 大规模珊瑚白化死亡事件频现^[2-4]。过去的 30 年里, 我国南海海域珊瑚礁已有 80% 退化^[5-8]。遥感技术具有大面积、实时监测等优点, 可以作为珊瑚礁生态系统监测的高效工具^[6-7]。地物光谱特征的测量和分析是遥感理论研究的重要内容, 也是各种遥感应用分析的基础^[9]。随着高光谱遥感技术的迅速发展, 已经能够准确、快速地提供各种地面遥感数据。本工作通过珊瑚礁底质反射率光谱特征研究, 实现珊瑚礁底质光谱识别, 为珊瑚礁遥感技术打下理论基础, 具有重要的意义^[9-10]。

国外学者根据导数分析证实了不同珊瑚礁底质反射率光谱具有可区分性^[11-13], 为光谱反射率识别不同珊瑚礁底质奠

定了基础, 促进了遥感技术在珊瑚礁监测与管理工作中的广泛应用。我国南海分布着大量的珊瑚, 是世界珊瑚礁的重要组成部分。珊瑚反射率光谱相关研究方兴未艾^[7-8]。更多代表性区域珊瑚光谱特征与敏感波段的深入研究与分析, 更具实际应用价值。

为更加深入研究三亚湾海域常见珊瑚礁反射率光谱特征, 以三亚湾鹿回头湾沿岸优势种疣状杯形珊瑚为对象, 测量和分析健康和白化疣状杯形珊瑚反射率光谱, 旨在分析其光谱响应特征, 尝试识别健康、白化疣状杯形珊瑚反射率光谱之间的区别, 寻找其识别敏感波段。并对所得反射率光谱进行导数分析, 确定健康与白化疣状杯形珊瑚敏感波段, 为珊瑚礁遥感实际应用提供理论基础。

1 实验部分

1.1 样品处理

2013年2月1日上午, 在海南岛三亚湾鹿回头附近海域

收稿日期: 2017-05-03, 修订日期: 2018-01-10

基金项目: 中国国家留学基金项目, 国家自然科学基金青年基金项目(41306144, 41406186)和国家海洋局近岸海滨生态环境重点实验室开放基金项目(201807)资助

作者简介: 陈永强, 1982年生, 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室(LMB)助理研究员 e-mail: yqchen@scsio.ac.cn

雷新明, 1981年生, 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室(LMB)助理研究员 e-mail: leixm@scsio.ac.cn

陈永强, 雷新明: 并列第一作者 * 通讯联系人 e-mail: huanghui@scsio.ac.cn

(图 1), 采集了健康疣状杯形珊瑚; 并对已有的白化的疣状杯形珊瑚进行了样品处理。珊瑚群体样品大小控制在 6 cm 左右。健康疣状杯形珊瑚暂养于岸基实验室珊瑚养殖循环系统, 充分模拟野外环境, 海水经过简单过滤, 水温控制在 26 °C, 光线为实时太阳光。珊瑚在外界环境条件胁迫下逐渐失去虫黄藻直至死亡这一过程称为珊瑚白化, 其间包含虫黄藻的失去和周围水体藻类的附着, 其实为一种较为不稳定的状态。为了便于分析比较, 本实验白化珊瑚借鉴光合色素提取方法, 样品块用 90% 丙酮 24 h 浸泡处理, 以去除其中多余色素, 处理后的样品视为死亡珊瑚稳定白化的理想状态。该方法的优势在于岸基单独测量能够有效摒除海底原位测量时周围环境其他珊瑚或地物的影响, 测量更加精准。

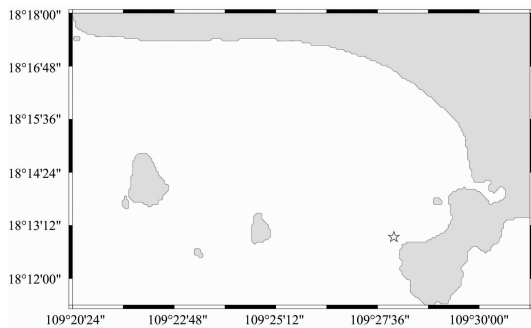


图 1 采样位置所在海域

☆: 采样海域; 灰色颜色: 陆地; 白色区域: 海洋

Fig. 1 Geographic location of the sampling sea area

Sampling sea marked by ☆, light grey represents land, white area is ocean

1.2 反射率光谱数据采集

所采集健康疣状杯形珊瑚样品暂养于岸基实验室养殖缸内缓冲 4 h, 等其生理状态基本保持稳定以后, 分别测量各样品块的反射率光谱。光谱数据采集条件为, 天空晴朗, 无云遮挡^[7-8]。实验使用美国海洋光学光谱仪(USB2000+), 其测量范围 200~850 nm, 分辨率 1.34 nm, 采样步长 0.6 nm, 视角角为 25°。测量时将样品放在装有海水的玻璃缸内的平台上, 26 °C 过滤海水持续缓慢注入, 以保持玻璃缸内水温一致; 多余的从缸壁四周缓慢溢出以保证水面无波纹扰动, 以去除入射光线经过非平静水表面折射进入水体后将发生“汇聚现象”给光谱测量带来的诸多问题; 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引起误差。为了最小化光纤探头和珊瑚样品块之间的海水对光线产生的影响, 光纤探头与所测样品之间的距离定为 5 cm, 以减少光谱仪探头与所测样品之间海水柱的吸收和散射对光谱测量的影响, 每个样品块测量重复 10 次取其平均值。测量光源为太阳光, 为减少测量时间变化对光强度的影响, 每次新的测量开始前须重新校正光谱仪^[7-8], 在能够优先保证所测数据质量的前提下, 尽可能地缩短测量所用时间。共获得 50 组健康疣状杯形珊瑚反射率光谱和 40 组白化疣状杯形珊瑚反射率光谱。

1.3 数据处理

可见光是电磁波谱中在水体内穿透能力较强波段, 尤其是其中的蓝色光波段在清澈水域能深入到水下达 40 多米处,

这使得可见光波段能很好地用于珊瑚礁水下遥感监测^[7-8]。因此, 选用 400~700 nm 波段下样品的反射率光谱进行分析。通过多次测量取平均值的方法, 测定健康和白化疣状杯形珊瑚的反射率光谱。

利用导数分析的方法能放大不同研究对象反射率光谱间的差异, 便于确定健康与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱的敏感波段^[9]。通过对反射率光谱求导数, 从混合的反射率光谱中分离出被覆盖住的弱的波峰, 同时导数光谱仍保持多元组分光谱的线性叠加性的特征。四阶导数光谱法在提高检测灵敏度, 改善分辨率和加强抗干扰力等方面具有独特的优点^[9]。使用统计软件 Origin 10 分别进行反射率光谱数据一阶、二阶导数和四阶导数分析, 根据反射率光谱导数之间的差异确定健康和白化疣状杯形珊瑚光谱的敏感波段。

2 实验部分

2.1 健康疣状杯形珊瑚反射率光谱

如图 2 所示为健康疣状杯形珊瑚反射率光谱谱线, 可见光范围内反射率光谱谱线较为平坦, 其值介于 3%~20% 之间。健康疣状杯形珊瑚反射率光谱在蓝紫光波段(400~480 nm)附近出现相对低值, 这在很大程度上与光合色素吸收有关(叶绿素两个最强的光谱吸收区域之一为: 430~450 nm 波段); 515, 580, 604.7 和 647 nm 处为波峰; 669 nm 处出现波谷; 之后反射率光谱明显增强(图 2)。

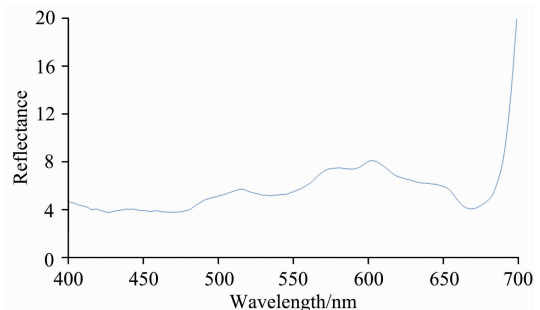


图 2 健康状态疣状杯形珊瑚的反射率光谱

Fig. 2 Reflectance spectrum of healthy *Pocillopora verrucosa*

白化状态下疣状杯形珊瑚的反射率光谱波形起伏相对平缓, 与健康状态疣状杯形珊瑚反射率光谱的相比, 白化珊瑚的反射率光谱值相对较高, 其值差别比较明显。相对于健康疣状杯形珊瑚反射率光谱波谷出现于 669 nm, 白化疣状杯形珊瑚的反射率光谱相对较弱的波谷出现于 663 nm 处。白化疣状杯形珊瑚反射率光谱波形平缓, 变化相对单调, 其值介于 45%~55% 之间; 其中 400~550 nm 波段变化相对较大, 550~663 nm 波段呈现缓慢下降趋势, 663~700 nm 波段急剧升高; 除 550 nm 处有一个平缓波峰外无显著波峰, 663 nm 处出现相对较弱的波谷, 总体趋势较为平缓(图 3)。

2.2 健康和白化状态疣状杯形珊瑚反射率光谱的对比分析

如图 4 所示, 可见光波段内(400~700 nm)健康疣状杯形珊瑚反射率光谱整体上小于 10%, 白化疣状杯形珊瑚反射率光谱明显大于健康疣状杯形珊瑚反射率光谱处于 45%~

55%之间。相较于健康疣状杯形珊瑚的反射率光谱, 白化疣状杯形珊瑚反射率光谱波形相对平缓, 相对较弱的波谷出现于 663 nm 处, 与健康状态疣状杯形珊瑚出现在 669 nm 处的波谷有一定差异。515, 580, 604.7 和 647 nm 特征波峰处亦无明显波峰(图 4)。

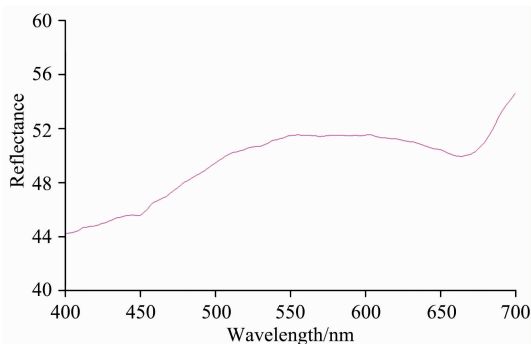


图 3 白化状态疣状杯形珊瑚的反射率光谱

Fig. 3 Reflectance spectrum of bleached *Pocillopora verrucosa*

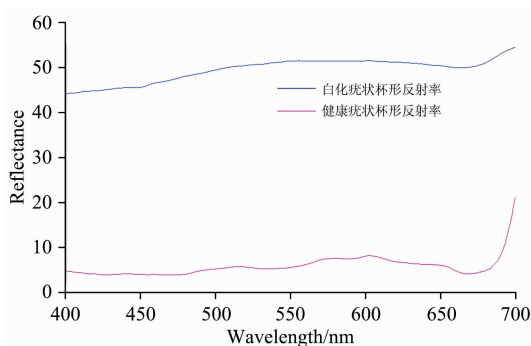


图 4 健康疣状杯形珊瑚与白化疣状杯形珊瑚的反射率光谱对比

Fig. 4 Reflectance spectrum of healthy and bleached *Pocillopora verrucosa*

2.3 健康与白化状态疣状杯形珊瑚反射率光谱的导数分析

反射率光谱的导数分析能够反映出健康与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱信号相反的区域, 根据相反的信号能够识别不同状态的珊瑚。本研究采用 4 nm 的波长间隔, 采用导数分析法分析了健康状态疣状杯形珊瑚与白化状态疣状杯形珊瑚反射率光谱一阶导数、二阶导数和四阶导数。由图 5—图 7 可见, 反射率光谱一阶导数差别并不明显, 二阶导数和四阶导数结果可区分波段相对较多, 曲线平滑, 极值明显。

反射率光谱的一阶导数结果显示, 可见光(400~700 nm)范围内白化疣状杯形珊瑚反射率光谱导数与健康疣状杯形珊瑚反射率光谱的导数存在 7 个信号相反的波段, 即 404~425, 456~466, 513~532, 556~560, 563~568, 592~596 和 661~667 nm 波段范围内, 健康与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱导数信号相反, 这能够将健康与白化疣状杯形珊瑚很好地区分开来; 其余波段, 一阶导数值差异并不明显, 不能用以识别不同状态珊瑚(图 5)。

反射率光谱二阶导数分析结果表明: 可见光范围内健康

与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱二阶导数可区分波段相对较多, 在 408~420, 435~439, 472~484, 542~556, 563~573, 577~584, 587~592, 615~634, 650~654, 655~658, 662~665, 681~684 和 687~695 nm 等波段范围内, 健康与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱信号相反, 能够很好地区分健康与白化疣状杯形珊瑚; 其他波段范围内, 健康与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱二阶导数值差异不明显, 难以进行区分(图 6)。

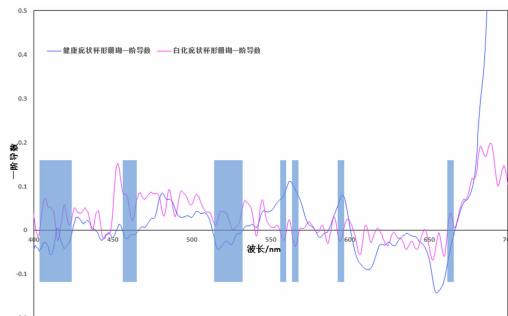


图 5 健康疣状杯形珊瑚与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱的一阶导数

Fig. 5 First-order derivatives of healthy and bleached *Pocillopora verrucosa* reflectance spectrum

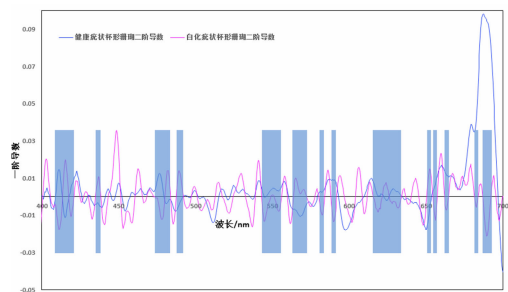


图 6 健康疣状杯形珊瑚与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱的二阶导数

Fig. 6 Second-order derivatives of healthy and bleached *Pocillopora verrucosa* reflectance spectrum

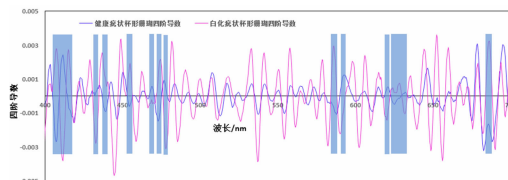


图 7 健康与白化状态疣状杯形珊瑚反射率光谱的四阶导数

Fig. 7 Fourth-order derivatives of healthy and bleached *Pocillopora verrucosa* reflectance spectrum

反射率光谱四阶导数分析结果表明: 健康与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱四阶导数可区分波段在 402~418, 430~435, 436~442, 452~457, 466~472, 473~477, 478~481, 584~588, 589~594, 617~622, 623~634 和 684~689 nm 波段范围内, 健康与白化状态疣状杯形珊瑚反射率光谱的四

阶导数信号符号相反,可以用以区分健康与白化症状杯形珊瑚;其他波段范围的波段内,健康与白化症状杯形珊瑚反射率光谱四阶导数值差异不明显,不能光谱识别健康与白化状态症状杯形珊瑚(图 7)。

随着全球经济的发展,珊瑚礁生态系统受气候变化和人类活动的影响也日益加剧,其多样性剧减,生态功能退化严重^[14]。我国珊瑚礁生态系统主要分布于南海,绝大多数岛礁地理位置偏远,造成监测与管理诸多不便^[15],珊瑚礁遥感监测与保护开展尤为迫切。遥感技术可以实时、大面积监测,便于珊瑚礁监测、保护和管理^[7-8]。珊瑚光谱特征是珊瑚礁遥感基础研究的重要内容,可以作为使用遥感技术研究珊瑚礁的重要理论基础。因此,测量和研究珊瑚礁底质光谱反射率光谱尤为重要。

本工作测量和分析了健康和白化状态的疣状杯形珊瑚反射率光谱,实验结果表明反射率光谱识别能够很好地应用于我国海南三亚湾鹿回头海域优势物种疣状杯形珊瑚。健康疣状杯形珊瑚反射率光谱在 515, 580, 604.7 和 647 nm 处出现显著波峰,与 Hochberg^[9]等所描述的典型棕色型珊瑚光谱(即,反射率光谱最大值出现在 600 nm,两肩峰分别为 570 和 650 nm)虽有所差异,但基本一致;此外在 515 nm 绿光处存在一个不显著波峰。可见光波段内,与国外学者 Hochberg 所测白化珊瑚反射率光谱的波形差别较大,表现为白化疣状杯形珊瑚反射率光谱明显高于健康疣状杯形珊瑚反射率光谱,不但反射率光谱整体相对偏高(45%~55%之间),而且波形相对平缓,669 nm 处也未出现明显的波谷,而是在 663

nm 处出现一个微弱波谷。这可能由于本实验与 Hochberg 所研究用白化珊瑚样品白化程度不同有关,本实验白化珊瑚经 90%丙酮浸泡处理过的样品,而 Hochberg 所用白化珊瑚为自然状态下白化的样品。自然状态下白化珊瑚表面会附着生有藻类,从而改变了其反射率光谱特征^[16]。

珊瑚反射率光谱敏感波段的确定,能为珊瑚礁遥感监测技术的发展起到指导性作用。导数分析能放大不同地物反射率光谱的差异,可以确定不同目标地物的反射率光谱敏感波段。通过不同健康状况疣状杯形珊瑚反射率光谱一阶导数分析,发现 404~425, 456~466, 513~532, 563~568 和 661~667 nm 波段处反射率光谱信号相反区域能够很好地区分健康与白化疣状杯形珊瑚,与 Holden 等^[16]所得不同健康状况下珊瑚敏感波段(500~590 nm)的结果有所差异。其差异可能是因为我们所选用的白化珊瑚样品为理想化状态下的完全白化样品,而 Holden 等所用样品为自然状态下部分白化样品。研究表明,珊瑚光谱的变化直接与其体内色素相关。而珊瑚在受到温度压力时会向外释放虫黄藻或色素,严重情况下甚至出现白化或死亡的现象^[6, 10-11]。自然状态珊瑚部分白化难以界定,原因在于白化后可能受环境水体藻类附着污染。有关珊瑚白化程度对珊瑚反射率光谱的影响,有待进一步研究。二阶导数分析表明,健康与白化疣状杯形珊瑚反射率光谱二阶导数可区分波段相对较多、波段较短主要为 408~420, 542~556, 563~573, 615~634 和 685~693 nm 等波段;四阶导数分析表明可区分波段为 402~418, 466~472, 478~481, 617~622 和 685~690 nm 波段。

References

- [1] Spillman C M. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(12): 1586.
- [2] Gleason D F, Wellington G M. Nature, 1993, 365(28): 836.
- [3] Spencer T, Telekik A, Bradshaw C. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(7): 569.
- [4] Carilli J, Donner S D, Hartmann A C. PLoS ONE, 2012, 7(3): 1.
- [5] Hughes T P, Huang Hui, Young M A. Conservation Biology, 2012, 27(2): 261.
- [6] CHEN Biao, HUANG Hui, CHEN Yong-qiang, et al(陈 标, 黄 晖, 陈永强, 等). Ocean Development and Management(海洋开发与管理), 2013, 30(Z1): 89.
- [7] CHEN Biao, HUANG Hui, CHEN Yong-qiang, et al(陈 标, 黄 晖, 陈永强, 等). Ecological Science(生态科学), 2014, 33(6): 1080.
- [8] CHEN Biao, HUANG Hui, CHEN Yong-qiang, et al(陈 标, 黄 晖, 陈永强, 等). Journal of Tropical Oceanography(热带海洋学报), 2015, 34(1): 71.
- [9] ZHANG Bo, NIU Ting, FANG Shi-feng, et al(张 波, 牛 婷, 房世峰, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(4): 1104.
- [10] LEI Xin-ming, WANG Hua-jie, HUANG Hui, et al(雷新明, 王华接, 黄 晖, 等). Journal of Tropical Oceanography(热带海洋学报), 2008, 27(5): 55.
- [11] LI Xiu-bao, HUANG Hui, FU Qu, et al(李秀保, 黄 晖, 符 曲, 等). Journal of Tropical Oceanography(热带海洋学报), 2006, 25(6): 58.
- [12] Karpouzli E, Malthus T J, Place C J. Coral Reefs, 2004, 23(1): 141.
- [13] Bertels L, Vanderstraete T, Coillie S V, et al. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(8): 2359.
- [14] Ravindran J, Kannapiran E, Manikandan B, et al. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2012, 41(1): 19.
- [15] WANG Yuan-yuan, LIU Zhi-gang, LI Jing, et al(王圆圆, 刘志刚, 李 京, 等). Advances in Earth Science, 2007, 22(4): 396.
- [16] Holden H, LeDrew E. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(13): 2545.

Reflectance Analysis of *Pocillopora verrucosa* in Luhuitou Sanya Bay

CHEN Yong-qiang^{1,2}, LEI Xin-ming¹, CHEN Biao³, HUANG Hui^{1,2*}

1. Key Laboratory of Tropical Marine Bio-Resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
2. National Experiment Station of Tropical Marine Biology, Sanya 572000, China
3. The Laboratory of Medical Mycology, Jining No. 1 People's Hospital, Jining 272111, China

Abstract Measurement and analysis of spectral features of ground objects is the theory basis of coral reefs remote sensing, and can be used as a basis for quantitative and qualitative research of coral reefs using remote sensing. In this paper, *Pocillopora verrucosa*, a common coral in Lu Huitou sea area in Sanya Bay in the northwestern South China Sea, was used to measure the reflectance spectrum using a fiber spectrometer. The spectral difference between healthy and bleached *Pocillopora verrucosa* was studied by reflectance spectrum and derivative spectroscopy. The results showed that the characteristic peak value appeared at around 580, 604.7, 647 nm, with significant trough being at 669 nm on the health *Pocillopora verrucosa* reflectance spectrum; bleached *Pocillopora verrucosa* reflectance spectrum was significantly higher than that of healthy coral reflectance spectrum, the reflectance spectrum waveform was gentle relatively, and there were relatively weak trough at the wavelength of 663 nm. Derivative spectroscopy was then used to conclude that the main distinguishable bands of healthy and bleached *Pocillopora verrucosa*. Reflectance spectral derivative analysis results showed that healthy bleached *Pocillopora verrucosa* has some distinguishing band, and the main distinguishing bands are as follows: first derivative regions, 404~425, 456~466, 513~532, 563~568 and 661~667 nm; second derivative regions, 408~420, 542~556, 563~573, 615~634 and 687~695 nm; fourth derivative regions, 402~418, 466~472, 478~481, 617~622 and 684~689 nm.

Keywords Lu Huitou Sanya; *Pocillopora verrucosa*; Reflectance spectrum

(Received May 3, 2017; accepted Jan. 10, 2018)

CHEN Yong-qiang and LEI Xin-ming: joint first authors

* Corresponding author