

卫星遥感珊瑚礁白化概述

潘艳丽^{1,2}, 唐丹玲^{1,2,*}

(1. 遥感与海洋生态环境研究中心(RSMEE), 热带海洋环境动力学中国科学院重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 珊瑚礁白化是由于珊瑚失去体内共生的虫黄藻或者共生的虫黄藻失去体内色素而导致五彩缤纷的珊瑚礁变白的现象, 严重的白化可以带来珊瑚礁的死亡。国内外研究表明海水温度升高和珊瑚礁白化关系最为紧密。卫星遥感能够提供大范围、同步与连续的海洋数据, 如海水表层温度和海色数据, 从而能够及时监测和预测珊瑚礁的白化。基于 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, US) 开发了全球监测珊瑚礁白化的方法, 热点 (HotSpot) 和周热度 (DHW) 两种主要指数。目前, 我国珊瑚礁白化现象的监测和研究明显滞后于国际动态, 迫切需要发展和利用卫星遥感的方法监测南海珊瑚礁白化状况。

关键词: 珊瑚礁白化; 卫星遥感; 热点; 周热度; 海水表层温度

文章编号: 1000-0933(2009)09-5076-05 中图分类号: Q178 文献标识码: A

General introduction to satellite remote sensing of coral reef bleaching

PAN Yan-Li^{1,2}, TANG Dan-Ling^{1,2,*}

1 *Research Center of Remote Sensing of Marine Ecology/Environment (RSMEE), Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics (LED), South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*

2 *The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5076 ~ 5080.

Abstract: Coral reef bleaching, the ecological phenomenon of whitening of reefs, result from the loss of symbiotic zooxanthellae and/or a reduction in photosynthetic pigment concentrations in zooxanthellae residing within the gastrodermal tissues of host animals, and death of coral reef could be caused by serious bleaching. Evidences show that high sea surface temperature (SST) have close relationship with coral reef bleaching. Remote sensing technology can provide SST and ocean color data with large coverage in both space and time, and SST data can be applied in monitoring and forecasting coral bleaching. Based on Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) has developed some remote sensing techniques and products to monitor global coral bleaching, HotSpot and DHW are two most important products among them. Research on coral bleaching in China is behindhand in the world, that calls more intensive studies on coral bleaching using satellite remote sensing.

Key Words: coral reef bleaching; satellite remote sensing; HotSpot; DHW; SST

珊瑚礁被誉为“蓝色沙漠中的绿洲”, 是海洋中非常独特的生态系统, 生活在珊瑚礁区的物种异常丰富。20 世纪 90 年代以来全球珊瑚礁持续衰退, 除了受到异常气候 (如厄尔尼诺) 的影响外, 全球气候变暖的趋势也给珊瑚礁的生长带来了不利影响。珊瑚礁白化是由于珊瑚失去体内共生的虫黄藻或者共生的虫黄藻失去

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (kzcx2-yw-226); 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划资助项目; 中国科学院南海研究所知识创新领域前沿资助项目 (LYQY200701); 广东省自然科学基金团队资助项目 (8351030101000002)

收稿日期: 2008-05-06; 修订日期: 2009-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lingzistdl@126.com (DL TANG), <http://lingzis.sl.net/>; Yanli79@tom.com

体内色素而导致五彩缤纷的珊瑚礁变白的现象。珊瑚礁白化引起珊瑚礁死亡的报道最早出现于 20 世纪 80 年代^[1],此后又有类似的珊瑚礁白化事件的报道^[2~5],不断有证据表明珊瑚礁白化的时间频率和强度有不断增加的趋势^[6~10]。虽然造成珊瑚礁白化的原因有很多,例如:过低的海水温度^[11],淡水的流入^[12],病菌的腐蚀^[13]等等因素,但是海水温度的异常升高目前被认为是珊瑚礁大面积白化事件发生的最主要原因^[10,14]。

卫星遥感的方法除了可以研究珊瑚礁的地貌特征^[15]还可以研究珊瑚礁的生长环境特点包括海水表面温度,叶绿素,悬浮物,降雨量和太阳辐射等,目前研究珊瑚礁常用的卫星传感器通常有以下 3 类:(1) 中分辨率多光谱卫星:Landsat TM(Thematic Mapper), SPOT(Systeme Probatoire de l'Observations de la Terre), IRS(Indian Remote Sensing Satellite),这 3 种卫星可以观测珊瑚礁的地貌,确定浅水礁石地位置,对珊瑚礁种类(5 种以内)进行区分,对珊瑚礁在水下的深度进行测量,还可以研究珊瑚礁海域地叶绿素浓度,有害藻类以及悬浮物等方面;(2) 卫星辐射计:AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer), ATSR (Along-Track Scanning Radiometer and Advanced Along-Track Scanning Radiometer),它们可以研究珊瑚礁海区的海面温度,紫外辐射,云层覆盖以及悬浮物和海水环流等状况;(3) 低分辨率多光谱卫星传感器:SeaWiFS(Sea Wide Field-of-view Sensor), MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer),主要可以研究珊瑚礁生长的海水温度,叶绿素浓度,有害藻类,悬浮物以及海洋环流和沿岸环流等^[16~18]。

1 遥感研究珊瑚礁的进展

遥感研究珊瑚礁的报道最早见于 1977 年的 ICRS(The International Coral Reef Symposium)3, Hopley 和 Steveninck^[19]用空中红外摄影术研究珊瑚礁,发现珊瑚礁对红外线的反射率取决于与其共生的虫黄藻的浓度。Armstrong^[20]在 1981 年的 ICRS4 会议录里发表了遥感研究珊瑚礁的文章,他在 1936、1951、1963、1971、1978 和 1979 年对波多黎哥的珊瑚礁进行空中摄影,并且对珊瑚礁进行了实地考察,然后把二者比对,结果发现有两个区域的珊瑚礁在 43a 内发生了很大的变化。Armstrong 指出用空中摄影的方法可以记录珊瑚礁的覆盖率等信息,这些信息非常有用,如果将来珊瑚礁由于受到人类的影响或者自然灾害而退化时,这些信息就提供了参照,用以估计珊瑚礁受损的程度。

从 1985 年开始有了用卫星遥感的方法研究珊瑚礁的报道。Pirazzoli^[21]对珊瑚礁的研究基于 Landsat3,他把实测的珊瑚礁区水深和由 Landsat 记录的水深值进行比对,绘出详细的珊瑚礁的水深图。Bainbridge^[22]对 Landsat MSS 和 SPOT XS 的珊瑚礁图像进行信息准确度的评估,结果表明 SPOT XS 珊瑚礁的有关数据和实地实测数据有很高的吻合性,Landsat MSS 的表现要差一些,这与两个遥感器的空间分辨率有关,SPOT XS 的分辨率更高一些。在国内近几年也出现了卫星遥感为手段研究珊瑚礁的报道,侧重点是解译卫星数据得到珊瑚礁图片,进而对珊瑚礁的地貌等信息进行研究^[15,23]。

1996 举行的 ICRS8 会议上出现了遥感水温的方法研究珊瑚礁白化的报道,Strong^[24]发现当海水表面温度超过月平均最高温度 1℃时,珊瑚礁白化就会出现,提供海水表面温度数据库的遥感器是 AVHRR。值得注意的是 Strong 的这篇报道只是用遥感海水表层温度研究珊瑚礁白化的一个开始,1997~1998 年的厄尔尼诺效应带来的全球海水温度的升高造成了全球各地珊瑚礁的大面积白化,从而引起了科学家对珊瑚礁白化与海水温度关系的持续关注和深入研究,目前监测水温成为预测珊瑚礁白化的有效方法。在一般情况下,区域海面温度大于该区平均夏季最高温度 1℃,持续时间达到数天或者数星期,就会导致珊瑚礁白化的发生^[25~27]。

2 卫星遥感研究珊瑚礁白化的方法

早于 1997 年,NOAA(National Oceanic and Atmosphere Administration)/NESDIS(National Environmental Satellite, Data, and Information Service)就开始研发遥感卫星全球 50km 分辨率的珊瑚礁白化温度产品白化热点(HotSpot)和周热度(Degree Heating Weeks, DHW),把它们作为研究与珊瑚礁白化有关的海水温度压力(Thermal Stress)的指数^[28,29]。产品基于 AVHRR 接收的遥感数据(<http://www.osdpd.noaa.gov/PSB/EPS/SST/methodology.html>),主要依据 HotSpot 和 DHW 来判断珊瑚礁的健康状态,也即判断珊瑚是否发生白化以及白化的级别。目前,越来越多的科学家用这些产品来研究本国乃至全球的珊瑚礁,澳大利亚科学家用它们

来研究 2002 年大堡礁的白化现象,对比了现场观测数据和卫星数据,结论是 HotSpot 和 DHW 能成功地监测 2002 年大堡礁海域的温度异常,可以对大堡礁的白化提前预警^[30]。目前,HotSpot 和 DHW 逐渐被证明可以对大范围珊瑚礁白化的发生提供成功率相当高的预测^[31,32]。

2.1 珊瑚白化热点(Coral Bleaching HotSpots):

热点 HotSpot(°C)是基于 50km 分辨率夜间温度和最大月平均温度计算得来^[33],公式如下:

$$\text{HotSpots} = \text{SST_analysis} - \text{SST_interpolated_MMM}$$

MMM:最大月平均温度值(maximum monthly mean climatology)

$$\text{SST_interpolated_MMM} = \frac{(D_{\text{analysis}} - D_{\text{last_mon}}) \times (b_2 - b_1)}{D_2 - D_1} + b_1$$

式中,SST_analysis 为 50km 分辨率夜间温度,该数据每周发布两次, D_{analysis} 为采集 SST_analysis 的日期, $D_{\text{last_mon}}$ 为采集 SST_analysis 的当月的 15 号(采集时间晚于 15 号时)或者上个月的 15 号(采集时间早于 15 号时), b_1 为采集 SST_analysis 当前月的(采集时间晚于 15 号时)或者前一个月(采集时间早于 15 号时)的月平均温度值, b_2 为采集 SST_analysis 当月的(采集时间早于 15 号时)或者下个月的(采集时间晚于 15 号时)月平均温度值, D_1 为 b_1 数据发布的日期, D_2 为 b_2 数据发布的日期。

2.2 珊瑚礁白化周热度(Degree Heating Weeks)

$$\text{DHW} = 0.5 \sum_{i=1}^{24} \text{HWH}_i, (\text{当 HWH}_i \geq 1^\circ\text{C 时})$$

式中,HWH 为半周热点(half-weekly HotSpot),即以半周为时间分辨率计算的热点。

周热度 DHW 是指珊瑚礁在 3 个月内承受的热应力的累积,一个 DHW(单位:°C 周)表示温度超过 MMM1°C 的时间为一个星期,两个 DHW 表示温度超过 MMM1°C 的时间为两个星期,或者温度超过 MMM2°C 的时间为一个星期,以此类推。根据对一些珊瑚礁白化事件的现场观察(包括 1998 全球大范围的白化现象),当 DHW 达到 4 时相当比例的特殊珊瑚虫种类会开始白化,当 DHW 达到 8 时,大部分珊瑚种类会白化并同时伴随着大面积的死亡^[34]。

2.3 珊瑚礁白化预警系统

NOAA CRW (Coral Reef Watch) 开发了“珊瑚礁卫星白化预警系统(Satellite Bleaching Alert, SBA)”,SBA 系统的运作始于 2005 年 7 月,该系统可以提供实时信息,为珊瑚礁管理者,科学家和对珊瑚礁的现状比较热心的人们提供了研究珊瑚礁的有效工具。珊瑚礁白化预警级别共有 5 个(表 1)。

3 卫星遥感监测中国南海珊瑚礁白化的迫切性

我国的珊瑚礁资源丰富,是位于印度尼西亚、澳大利亚、菲律宾、法国(包括位于赤道附近的一些珊瑚礁资源很丰富的附属小国)、巴布新几内亚、斐济、马尔代夫之后的世界第八位,但是我国对珊瑚礁的重视程度却相当之低,对于珊瑚礁白化现象的监测和研究都明显滞后于国际动态。国内虽然有珊瑚礁白化的零星报道,但一般都是以新闻的形式,鲜见严谨的研究文章,但是这并不意味着没有必要研究我国珊瑚礁的白化,根据我国珊瑚礁科学家对南沙群岛、海南三亚以及雷州半岛等礁区的考查经验看,珊瑚礁白化在这些地方发生的可能性存在^[35,36],目前的难题是用什么样科学有效的方法去深入研究它。在“Status of coral reefs of the world”的系列著作中,依照区域(国家)对全世界珊瑚礁的健康状况进行定期报道,我国南沙群岛,也称 Spratlys (spratly islands),被划规在东南亚珊瑚礁区,菲律宾、马来西亚和越南的珊瑚礁白化报道中出现了我

表 1 珊瑚礁白化预警

Table 1 Satellite Bleaching Alert levels of coral reefs

珊瑚礁白化预警级别 Coral Reef Bleaching Alert Level	警报标准 Alert Criterion
无危险 No Stress	HotSpot ≤ 0
白化监视 Bleaching Watch	0 < HotSpot < 1
白化警告 Bleaching Warning	1 ≤ HotSpot and 0 < DHW < 4
白化警报级别 1 Bleaching Alert Level 1	1 ≤ HotSpot and 4 ≤ DHW < 8
白化警报级别 2 Bleaching Alert Level 2	1 ≤ HotSpot and DHW ≥ 8

国南沙群岛部分岛礁的珊瑚礁白化情况,例如在“Status of coral reefs of the world,1998”^[37]中,记载了我国中业岛(菲律宾称为 Pag-asa Island)的珊瑚礁从1998年7月中旬开始发生白化。

对珊瑚礁进行野外实地考察需要人力、物力以及大量的经费投入,我国南海的珊瑚礁岛礁众多,被分为五个礁区,共有上百个岛礁^[38],尤其是南沙群岛距离我国大陆十分遥远,致使对珊瑚礁的研究受到诸多限制,所以迫切需要引进和发展新的技术。卫星遥感的优点是能够提供大范围、同步与连续的海洋数据并且成本较低,许多遥感卫星都可以提供连续实时的海洋表层水温数据,由这些数据可以进一步得到预测珊瑚礁白化的指标,目前是热点(HotSpot)和周热度(DHW)。综上所述用卫星遥感监控和预测我国珊瑚礁生态状况,是完全可行的

References:

- [1] Glynn P W. Extensive ‘bleaching’ and death of reef corals on the Pacific coast of Panama. *Environ. Conserv.*, 1983,10:149 – 154.
- [2] Roberts L. Coral bleaching threatens Atlantic reefs. *Science*,1987,238:1228 – 1229.
- [3] Lang J C, Lasker H R, Gladfelter E H, Hallock P, Japp W C, Losada F J, Muller R G. Spatial and temporal variability during periods of “recovery” after mass bleaching on Western Atlantic. *Coral reefs*,1992, 32:696 – 706.
- [4] Hoegh-Guldberg O, Salvat B. Periodic mass-bleaching and elevated sea temperature; bleaching of outer reef slope communities in Moorea, French Polynesia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1995,121:181 – 190.
- [5] Brown B E. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs*,1997,16:129 – 138.
- [6] Glynn P W. Coral reef bleaching in the 1980s and possible connections with global warming,1991. *Trends Ecol. Evol.*,1991,6:175 – 179.
- [7] Glynn P W. Coral reef bleaching: ecological perspectives. *Coral Reefs*,1993,12:1 – 17.
- [8] Goreau T J. Bleaching and reef community change in Jamaica;1951 – 1991, *American Zoologist*,1992,32:683 – 695.
- [9] Winter A, Appeldoorn R S, Bruckner A, Williams E H, Goenaga C. Sea surface temperatures and coral reef bleaching off La Parguera, Puerto Rico (northeastern Caribbean Sea). *Coral Reefs*,1998,17:377 – 382.
- [10] Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world’s coral reefs. *Mar. Freshwater Res.*,1999,50:839 – 866.
- [11] Yu K F, Zhao J X, Liu T S. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum. *Earth Planet Sci. Lett.*, 2004,224:143 – 155.
- [12] Goreau T F. Mass expulsion of zooxanthellae from Jamaican Reef communities after hurricane Flora. *Science*,1964,145:383 – 386.
- [13] Kushmaro A, Loya L, Fine M. Bacterial infection and coral bleaching. *Nature*,1996,380:396.
- [14] Douglas A E. Coral bleaching — how and why? *Mar. Pollut. Bull.*,2003,46(4):385 – 392.
- [15] Pan Y L, Tang D L. Preliminary observations of Nansha reefs based on Landsat7 ETM + images. *Journal of Tropical Oceanography*,2007,26(1): 77 – 78.
- [16] Mumby P J, Skirving W, Strong A E, Hardy J T. Remote sensing of coral reefs and their physical environment. *Mar. Pollut. Bull.*,2004,48(3): 219 – 228.
- [17] Tang D L, Kester D R, Wang Z D, *et al.*, AVHRR Satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, Nuclear Power Station, China. *Remote Sensing of Environment*,2003,84(4): 506 – 515.
- [18] Tang D L, Kawamura H, Shi P, *et al.* Seasonal phytoplankton blooms associated with monsoonal influences and coastal environments in the sea areas either side of the Indochina Peninsula. *JGR-Biogeog.*, 2006, Vol. 111, G01010. doi:10.1029/2005JG000050.
- [19] Hopley D, Steveninck A. Infra-red aerial photography of coral reefs. *Proceedings of Third International Coral Reef Symposium Vol 2. Geology. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, Miami, Florida, 1997. 305 – 311.*
- [20] Armstrong R A. Changes in a Puerto Rican coral reef from 1936 – 1979 using aerial photoanalysis. *Proceedings of the 4th International Coral Reef Symposium Vol 1. Marine Science Center, University of the Philippines, Manila, Philippines, 1981. 309 – 316.*
- [21] Pirazzoli P A. Bathymetric mapping of coral reefs and atolls from satellite. *Proceedings of The Fifth International Coral Reef Congress. Tahiti, 27 May-1 June 1985. Vol 6: Miscellaneous Paper (B), 1985. 539 – 599.*
- [22] Bainbridge S J, Reichelt R E. An assessment of ground truth methods for coral reef remote sensing. *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium. Vol 2: Contributed Papers. Townsville, Australia, 1998. 439 – 444.*
- [23] Song W, Zhang J, Ji G R, Meng J M. Characteristic analysis of Nansha Shuangzi Reefs based on SAR and TM images. *Advances in Marine Science*, 2004,22(10):177 – 181.
- [24] Strong A E, Barrientos C S, Duda C, Saper J. Improved satellite techniques for monitoring coral reef bleaching. *Proceedings of the 8th International*

Coral Reef Symposium Vol 2. Smithsonian Tropical Research Institute, Panama, 1996. 1495 – 1498.

- [25] Jokiel P L, Coles S L. Response of Hawaiian and other Indo-Pacific reef corals to elevated temperature. *Coral Reefs*, 1990, 8:155 – 162.
- [26] Podesta G P, Glynn P W. Sea surface temperature variability in Panama and Galapagos: Extreme temperatures causing coral bleaching. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(C7):15749 – 15759.
- [27] Podesta G P, Glynn P W. The 1997-98 El Nino event in Panama and Galapagos: An update of thermal stress indices relative to coral bleaching. *Bulletin of Marine Science*, 2001, 69:43 – 59.
- [28] Strong A E, Goreau T J, Hayes R. Ocean HotSpots and coral reef bleaching: January-July 1998. *Reef Encounters*, 1998, 24:20 – 22.
- [29] Toscano M A, Strong A E, Guch I C. New analyses for ocean HotSpots and coral reef bleaching. *Reef Encounters*, 1999, 26:31.
- [30] Liu G, Strong A E. Remote Sensing of Sea Surface Temperatures During 2002 Barrier Reef Coral Bleaching. *Eos Trans.*, AGU, 2003, 84(15):137 – 144.
- [31] Goreau T, McClanahan T, Hayes R. Conservation of coral reefs after the 1998 global bleaching event. *Conservation Biology*, 2000, 14(1):5 – 15.
- [32] Wellington G M, Glynn P W, Strong A E. Crisis on coral reefs linked to climate change. *EOS*, 2001, 82(1):1.
- [33] Liu G, Strong A E, Arzayus LF. Overview of NOAA coral reef watch program's near-real time satellite global coral bleaching monitoring activities. 2005, Proc. 10th Int Coral Reef Symp, Okinawa, Japan, 2004, 1:1783 – 1793.
- [34] Wilkinson C, Linden O, Cesar H. Ecological and socioeconomic impacts of 1998 coral mortality in the Indian Ocean: an ENSO impact and a warning of future change? *AMBIO*, 1999, 28(2):188 – 196.
- [35] Li S, Yu K F. Recent development in coral reef bleaching research. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):2059 – 2069.
- [36] Yu K F, Jiang M X, Cheng Z Q, Chen T G. Latest forty-two years' sea surface temperature change of Weizhou Island and its influence on coral reef ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3):506 – 510.
- [37] Wilkinson C. Status of southeast Asian coral reefs, in: Status of coral reefs of the world; 1998. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia, 1998. 87 – 96.
- [38] Nie B F, Chen T G, Liang M T, *et al.* The relationship between reef coral and environmental changes of Nansha Islands and the adjacent regions. Beijing: Science Press, 1997. 5 – 28.

参考文献:

- [15] 潘艳丽, 唐丹玲. 南沙群岛部份岛礁的 Landsat7 ETM + 图像观察. *热带海洋学报*, 2007, 26(1):77 ~ 78.
- [23] 宋玮, 张杰, 姬光荣, 孟俊敏. 基于 SAR 与 TM 图像南沙群岛特征分析. *海洋科学进展*, 2004, 22(10):177 ~ 181.
- [35] 李淑, 余克服. 珊瑚礁白化研究进展. *生态学报*, 2007, 27(5):2059 ~ 2069.
- [36] 余克服, 蒋明星, 程志强, 陈特固. 涠洲岛 42 年来海面温度变化及其对珊瑚礁的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(03):506 ~ 510.
- [38] 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 钟晋梁著. 南沙群岛及其临近礁区造礁珊瑚与环境变化的关系. 第一版. 北京: 科学出版社, 1997. 5 ~ 28.