doi: 10.6046/zrzyyg.2020391

引用格式:刘白露,管磊.南海珊瑚礁白化遥感热应力检测改进方法研究[J].自然资源遥感,2021,33(4):136-142.(Liu B L, Guan L. An improved method for thermal stress detection of coral bleaching in the South China Sea[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(4):136-142.)

南海珊瑚礁白化遥感热应力检测改进方法研究

刘白露¹, 管 磊^{1,2}

(1. 中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院/三亚海洋研究院,青岛/三亚 266100/572022;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室,青岛 266237)

摘要:近年来受全球气候变暖等因素的影响,全球珊瑚礁白化事件频发,而美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的珊瑚礁监测(Coral Reef Watch, CRW)系统在南海的监测结果存在低估问题。文章基于1985年起的180例南海及周边海域的珊瑚礁白化相关报道,通过计算不同阈值组合的白化漏检率、误检率与准确率,评估得到最佳阈值组合,最终实现对南海珊瑚礁白化热应力检测的改进。实验结果表明: ①NOAA 阈值对应的白化检测结果漏检率为70.70%,长期的白化低估现象确实存在;②采用改进后的临界阈值(critical threshold,CT)与警报阈值(alert threshold,AT),可将白化检测准确率由58.13%提升至73.90%,同时漏检率与误检率均低于30%。通过2007年6月南沙群岛的白化事件,发现相较过去的低估,改进后的热应力指数能对事件做到有效检测,并能适时标记白化警报级别。结果证明热应力检测的改进方法能提高珊瑚白化监测水平,有利于南海珊瑚礁的管理与保护。

关键词:珊瑚礁白化;南海;遥感;SST;热应力 中图法分类号:TP 79;P 76 文献标志码:A

文章编号: 2097-034X(2021)04-0136-07

0 引言

珊瑚礁生态系统作为古老的海洋生态系统,总 面积仅占全球海域面积约0.5%,生物种类却占到 了海洋物种总数的约30%^[1],生产力水平与生物多 样性极高。珊瑚对环境变化极为敏感,当环境发生 剧烈变化时,恶劣的生存条件会使得珊瑚体内虫黄 藻被排出或(和)失去体内色素,最终会裸露出底层 的白色碳酸钙珊瑚骨架,这一过程被称为珊瑚礁白 化^[2]。据研究,最适宜珊瑚生长的温度为 25~29 ℃^[3], 且大部分热带珊瑚生活在它们能忍受的海温上限边 缘约1~2℃^[2],这使得珊瑚很难适应短时间内剧 烈的海温变化。伴随着全球气候变暖,海水温度的 异常升高已经成为珊瑚礁白化的主要原因之一。 1980-1997年,全球共报道约370次珊瑚白化事 件;而在1998-2010年期间,全球白化报道达到了 3 700 多次^[4], 珊瑚白化发生的频率和严重程度不 断增加。2015—2017 年连续 3 a 记录到了 19 世纪 以来的全球最高年平均海温^[5],与之相对应的是有 史以来最严重、持续时间最长的全球性珊瑚白化事 件^[6]。

中国南海分布着众多珊瑚礁,主要包括西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛、东沙群岛、台湾岛、海南岛以及大陆沿岸共128个礁区,总面积约为30000 km^{2[7]}。 受人类活动与气候变暖等因素的共同影响,南海珊 瑚礁从20世纪60年代至今经历了严重的退化,活 珊瑚覆盖度下降了约80%^[8],亟需在南海建立完善 的珊瑚礁白化监测与管理系统。

早在 1990 年, Glynn 等^[9] 就通过在造礁珊瑚上 进行耐高温实验, 证实当环境温度升高 1~2 ℃时, 就会发生珊瑚白化现象, 活珊瑚表面积显著减少。 并且因热异常导致的珊瑚礁白化存在一定的滞后 性, 在急性热应力消退后, 白化程度会随着热应力的 累积继续加重^[10]。随着卫星遥感技术的发展和对 珊瑚礁热白化的进一步研究, 美国国家海洋和大气 管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 从 2000 年起开始实施珊瑚礁监测计

通信作者: 管 磊(1969 –),女,教授,主要从事海洋遥感研究。Email: leiguan@ouc.edu.cn。

收稿日期: 2020-12-02;修订日期: 2021-02-02

基金项目:自然资源部"全球变化与海气相互作用"专项项目"西太平洋东印度洋 PACIND – YGST03 区块海洋环境参数遥感调查 Ⅱ 期"(编号: GASI – 02 – PACIND – YGST2 – 03)资助。

第一作者: 刘白露(1997-),女,博士研究生,主要从事海洋遥感研究。Email: bailu0126@ stu. ouc. edu. cn。

划(Coral Reef Watch, CRW),并证实了基于遥感海 表面温度(sea surface temperature, SST)数据集开发 的热应力检测产品:热点(Hotspot)与周热度(degree heating week, DHW),能对大规模珊瑚礁白化 的发生与发展进行有效监测^[11-12]。

作为业务化的全球珊瑚礁白化监测产品,Hotspot 与 DHW 已经得到了全世界珊瑚礁研究与管理 人员的广泛使用,但其白化监测的准确度却一直存 在争议。通过对全球 1985—2005 年的珊瑚礁白化 事件进行评估, Donner^[13]发现在全球使用 DHW 平 均能检测到的珊瑚白化事件仅占40%,这种低预测 性能可能是因为使用了全球固定的高于长期最热月 海温1℃的热阈值; 而根据 Kleypas 等^[14]的报告, 赤道西太平洋的珊瑚礁对小幅度的温度升高更敏 感,在月海温异常低至0.4℃而不是1℃时,珊瑚就 有可能会发生白化; Kumagai 等^[15]基于 668 例发生 在日本西南部琉球群岛海域的白化事件,对包括 DHW 在内的指数进行了改进,得到了更适合该区域 的临界阈值 0.68 ℃与白化警报阈值 2.07 ℃ - 周; 李淑等^[16]在2007年6月航次的南沙群岛调查中, 发现在热异常指数 Hotspot 低于1℃时,调查区域就 已经发生了珊瑚礁白化,因此认为 NOAA 的白化热 应力监测指数在南海的实际应用结果可能会存在低 估的现象。

针对南海的白化热应力可能被低估,进而产 生白化事件漏检的问题,为了提高南海珊瑚礁白 化遥感监测的准确度,本文对珊瑚礁白化遥感热 应力检测指数进行了评估与改进。并在2007年6 月的南沙群岛珊瑚礁白化事件中,使用改进前后 的阈值结果分别进行了DHW 与白化警报区域的 计算。

1 研究区域概况与数据源

南海位于太平洋西部、亚洲大陆南部,北至华南 大陆沿岸,东至菲律宾群岛,西部与南部分别至越南 与马来半岛,是中国的三大边缘海之一。本文的研 究区域为南海及其周边海域,处在珊瑚三角区(coral triangle)的西北部,是全球珊瑚礁生态系统的重要 组成部分。地理位置(E105°~125°,N0°~25°)与 主要的珊瑚礁分布情况如图 1。本文使用的 SST 数 据集来自 NOAA 的国家环境卫星信息资料中心 (National Environmental Satellite, Data, and Information Service, NESDIS),下载地址: ftp: //ftp. star. nesdis. noaa. gov/pub/sod/mecb/crw/data/coraltemp/ v3.1/nc/。为了满足 NOAA CRW 在检测珊瑚礁白 化热应力时对长期稳定的 SST 数据的需求,NESDIS 开发了这套分辨率为5 km 的,静止卫星与极轨卫星 融合的全球夜间再分析遥感 SST 数据集^[17]。数据 集的时间跨度为1985 年1月1日至今,本文采用的 是3.1 版本。



Fig. 1 Sketch map of main coral reefs in the study area^[17]

Reefbase^[18] 是全球珊瑚礁监测网络(Global Coral Reef Monitoring Network, GCRMN) 以及国际珊 瑚礁行动网络(International Coral Reef Action Network, ICRAN)的官方数据库,记载了大量的珊瑚礁 现场调查数据,但其中的观测有主要集中在热点研 究海域的特点。Donner 等^[19]认为 ReefBase 的白化 事件数据库遗漏了部分数据,特别是缺乏太平洋地 区的数据,因此他们在 ReefBase 的基础上,通过有 针对性地与国际珊瑚礁监测领域的研究人员进行交 流,以及对报道和文献资料的检索补充,开发了一个 全新的、高分辨率的全球大型珊瑚礁白化数据库 "Coral Bleaching Database V1",时间范围为 1985— 2010 年,可在 http: //www. simondonner. com/ bleachingdatabase 网站上获得。上述两个数据库是 本文珊瑚礁白化观测报道的主要来源,此外还有从 GCRMN 历年报告^[20-22]以及文献^[23-26]中得到的白 化事件记录。通过对 1985 年起至今,研究范围 (E105°~125°,N0°~25°)内的事件进行检索,筛除 重复报道事件与非热异常引起的白化事件,共得到 180 例事件报道,其中白化事件 157 例,未白化事件 23 例。

2 评价指标

2.1 气候学与热应力指标

评价一个地区的热异常,首先需要确定当地的 气候学基准。检测珊瑚礁白化热应力的气候学基准 需要代表当地长期最热月的平均海温,所以通常使 用最大月平均(maximum monthly mean, MMM)海 温。计算方法是先求出当地 12 个月的长期月平均 海温,然后从中取最大值。

对气候学基准进行了改进,使用 1985—2019 年 共 35 a 的再分析 SST 数据计算气候学基准。遵循 NOAA CRW 第 3 版的气候学协议^[27],为了更好地 确定珊瑚礁的热应力阈值,应用文献^[28]中提供的方 法对气候学基准进行时间上的再中心化处理,计算 公式为:

$$T_{85-19} = T_{85-93} - slope \times (t_{85-19} - t_{85-93}) , \quad (1)$$

式中: *T* 为气候学基准; *t* 为时间中心; *slope* 为每个单元格内的月平均 SST 长期变化率; 85 - 19 指 1985—2019 年, 85 - 93 指 1985—1990 加 1993 年, 代表再中心化前后的两个时间段。

热点(Hotspot)与周热度(DHW)是 NOAA CRW 开发的珊瑚礁白化遥感热应力监测产品,其中热点 Hotspot 是基于 MMM 气候学基准计算的正异常值, 用来表征每日海温热异常的大小,单位为℃,计算公 式为^[27]:

 $Hotspot = \begin{cases} SST_{daily} - MMM & (SST_{daily} > MMM) \\ 0 & (SST_{daily} \le MMM) \end{cases}^{\circ}$ (2)

珊瑚礁的热白化是一个长期的过程,除了短期的热应激,研究证明长期的热量累积也是重要的白化指标,并且能更有效地监测大规模珊瑚白化^[9]。 周热度 DHW 是最近 12 周(84 d)热应力强度(Hotspot)的累积量,单位为 \mathbb{C} – 周。连续一周的 2 \mathbb{C} Hotspot 与连续两周的 1 \mathbb{C} Hotspot 所对应的 DHW 值是相同的,都是 2 \mathbb{C} – 周^[27]。在计算 DHW 时,为 了避免长期低热量累积导致指数虚高,并不会将所 有的 Hotspot 进行累加。设置一个临界阈值(critical threshold, CT)来对热量累积进行限制,即把每个单 元格的 MMM + CT 设置为当地热应力积累的高通滤 波值。通常 CT 为 1 \mathbb{C} ,在本文研究中会对 CT 进行 改进。DHW 计算公式^[27]为:。

$$DHW = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^{5^{\circ}} (Hotspot_i, if Hotspot_i \ge CT) \ . (3)$$

根据执应力指数的大小可以判断一个区域是否

应该发出珊瑚礁白化警报。NOAA CRW 将4℃ – 周 DHW 作为判断白化发生可能性的重要阈值,当 珊瑚礁附近的数值达到 DHW≥4℃ – 周时,NOAA 会向当地有关部门发出白化警报^[29]。本文将这个 判断是否达到白化警报级别的 DHW 值称为警报阈 值(alert threshold,AT),AT 也将是本文的改进对象。

得到区域的 Hotspot 值与 DHW 值后,根据大小可以进行白化热应力级别的划分。参考 NOAA CRW 的白化级别划分^[27],本文将按表1确定热应力检测指数对应的白化级别。

表 1 白化热应力级别划分 Tab. 1 Coral bleaching thermal stress levels

级别	定义	对珊瑚礁的影响
无压力	$Hotspot \leq 0$	—
观察	0 < Hotspot < CT	—
白化警告	$Hotspot \ge CT, DHW < AT$	可能发生白化
白化警报	$Hotspot \ge CT, DHW \ge AT$	极易发生白化

2.2 白化阈值的评价指标

为了得到适合南海珊瑚礁的 CT 与 AT,本文将 不同阈值组合应用到收集的白化调查事件中,将得 到的漏检率(false negative rate, FNR)、误检率(false positive rate, FPR)与准确率(accuracy, ACC)作为检 验白化阈值的标准。

对于珊瑚礁白化来说,报道中的白化事件可能 被热应力指数成功检测(true positive, TP),也可能 未被成功检测(false negative, FN)。未被成功检测 的事件在所有白化事件中的占比即为漏检率 FNR, 公式为:

$$FNR = FN/(TP + FN) \quad (4)$$

如果情况相反,报道中是未发生白化事件,其热应力指数或者未达到白化警报级别(true negative, TN),或者达到了白化警报级别发生虚警(false positive,FP)。发生虚警的事件在所有未白化事件中的 占比即为误检率 FPR,公式为:

$$FPR = FP/(FP + TN) \quad (5)$$

最佳的白化阈值,需要兼顾 FNR 与 FPR 的大小。因为如果 FNR 太高,会导致白化事件的漏报; 而 FPR 太高,则会发生白化虚警。所以选择准确率 ACC,它表示所有检测结果中正确的事件占全部事 件的比率,其公式为:

$$ACC = (TP + TN)/(TP + TN + FN + FP) \circ$$
(6)

以上3个评价指标: FNR, FPR 和 ACC, 将是本 文对白化热应力检测阈值改进的主要依据。改进后 将得到研究区域的最佳阈值组合, 进而获得更准确 的珊瑚白化检测结果。 3

3.1 白化阈值的分析

对白化阈值组合进行研究评价,将 CT 设为0~ 1.5 ℃,AT 设为0~8 ℃ - 周,取值间隔为0.01 个 单位,得到 151×801 的阈值矩阵,其中的每个点 对应一种阈值组合。由于白化事件报道的时间精 度不一,在每种阈值组合下取对应的 157 例白化 事件发生当年的 DHW 最大值。未白化事件均为 现场调查记录,所以在每种阈值组合下取 23 例未 白化事件调查当月的 DHW 最大值。依据式(4)和 式(5),求得不同阈值组合对应的漏检率与误检率 如图 2 所示。





图 2(a)可以看到 FNR 随 CT 与 AT 的增加逐 新增加,即越高的 CT 与 AT 越不利于白化事件检 出。红圈(1.0 °C,4.0 °C – 周)处为 NOAA CRW 的阈值组合,对应的 FNR 为 70.70%。这意味着 在南海及其周边海域,NOAA CRW 阈值下热应力 指数仅能成功检出约 30% 的白化事件,小于全球 平均的 40% 白化事件检出率^[13]。与 FNR 相反,图 2(b)的 FPR 值随 CT 与 AT 的增加逐渐减小,即越 高的 CT 与 AT 越不易发生白化虚警。黑圈处的误 检率值为 13.04%,意味着 NOAA CRW 阈值下判 断未白化事件的成功率较高。过高的 FNR 与低 FPR,说明 NOAA CRW 的阈值设置对南海珊瑚白 化情况会产生低估。

综合考虑检测白化事件与未白化事件的正确 率,根据式(6),不加任何限制条件,求得不同阈值 组合对应的 ACC 如图 3(a),黑圈(1.0 ℃,4.0 ℃ -周)处的 ACC 为 58.13%, 而蓝圈(0.72 ℃, 0.86 ℃ -周)处可取得图 3(a) 中准确率的最大值 75.66%。 使用 FNR 与 FPR 对阈值的取值范围加以限制,从图 3(b)和(c)的变化中可以看出,蓝圈处所对应的 FNR 与 FPR 小于 40% 但大于 35%。而根据图 3(c) 与 (d), FNR 与 FPR 小于 35% 后, ACC 最大值 73.90% 出 现在红圈(0.68 ℃,2.87 ℃ - 周)处,且此处 FNR 与 FPR 都小于 30%, 优于(0.72 ℃, 0.86 ℃ - 周)处 的结果。结合图2可以看出,(0.72℃,0.86℃-周) 处的高 ACC 是 FNR 与 FPR 的相对差异大导致的 虚高。综合考虑 FNR、FPR 与 ACC,最佳白化阈值 组合为临界阈值 = 0.68 ℃、警报阈值 = 2.87 ℃ -周。





3.2 改进阈值在白化事件检测中的应用

2007 年,李淑等^[16]在南沙群岛进行了实地生态调查,发现在6月19日时有部分珊瑚已经或正在发生白化,可能处在热白化事件的初始阶段,然而采样期间的DHW 均小于3℃-周,并不能达到NOAA CRW 认为的足以发生显著性白化事件的警报阈值(至少4℃-周),所以认为在南沙群岛的珊瑚白化热应力监测可能存在低估现象。应用 NOAA CRW

的临界阈值(1℃)与改进后的临界阈值(0.68℃),分 别在研究区域计算2007年6月19日、22日与25日 的DHW值(图4)。两种计算阈值下得到的DHW 在6月19—25日这一周都有逐渐增加的趋势,表明 调查时正处于升温状态,很可能是热应力导致珊瑚 礁白化的初期阶段。通过图4(a)—(c)与(d)— (f)的对比可以看到,临界阈值的改进能在反映区域 升温特征的同时,显著提高DHW值。



8 C (e) 2007-06-22 CF 为0.68 C (f) 2007 图 4 南海 DHW 分布

Fig. 4 DHW in the South China Sea

按1℃与0.68℃两种计算阈值,分别计算得到 2007年6月19—25日一周的 Hotspot 与 DHW。再 按照4℃-周与2.87℃-周的警告阈值,用表1的 标准划分白化区域级别。为了更直观地比较两种阈 值组合产生的白化区域级别的范围差异,分别求取 2007年6月19—25日最大白化区域级别(图5)。



图 5 2007 年 6 月 19 — 25 日最大白化区域级别^[16] Fig. 5 Maximum bleaching area level in seven days from June 19, 2007 to June 25, 2007^[16] 绿色框内为此次南沙群岛白化事件的大致调查 区域^[16],通过区域内7d最大白化级别的对比发 现:NOAA CRW产品在7d内未发出白化警报,仅 认为有可能发生白化,对实际白化情况产生了低估 (图5(a));而在阈值改进后,调查区域内同时段有 大范围的白化警报区域,与现场调查得到的结果相 吻合,白化警报会有助于珊瑚礁管理人员掌握更真 实的情况(图5(b))。通过两种结果的对比,证明 经过改进后的白化热应力指数会更适合在南海的珊 瑚礁白化监测。

4 结论

本文基于遥感海温数据集与白化指数 Hotspot 与 DHW,依据 180 例南海及周边海域珊瑚礁白化报 道事件,使用漏检率 FNR、误检率 FPR 与准确率 ACC 等评价指标,对珊瑚礁白化热应力检测中的两 个关键阈值进行了评估与确定,从而实现了对白化 热应力检测的改进。

1) 经改进后的白化指数在热应力检测能力上 有大幅提升,白化监测的准确率由 58.13% 提升至 73.90%,且漏检率和误检率都在 30% 以下,更能准 确反映南海海域珊瑚礁白化的实际情况;

2)结合 2007 年 6 月在南沙群岛调查得到的珊 瑚礁白化事件,对比了阈值改进前后白化指数的应 用效果,改进后的检测结果有显著改善;

3)本文提到的热应力检测阈值的评估与改进 方法有很高的通用性,可根据情况继续缩小研究范围,提高地区白化热应力检测准确度。此外,海温异常并不是珊瑚发生白化的唯一因素,太阳辐射、海水 污染等也是导致珊瑚白化的重要原因,建立热应力 指数主导的多参数模型会使珊瑚礁遥感白化监测预 警系统更加准确,从而更好地对珊瑚礁进行白化监 测与管理保护。

参考文献(References):

- Reaka Kudla M L. The global biodiversity of coral reefs: A comparison with rain forests [M]//Reaka Kudla M L, Wilson E O. Biodiversity Understanding and Protecting Our Biological Resources, Washington D C: National Academy Press, 1997: 83 108.
- [2] 李 淑,余克服.珊瑚礁白化研究进展[J].生态学报,2007,27
 (5):2059-2069.

Li S,Yu K F. Recent development in coral reef bleaching research [J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(5):2059 – 2069.

[3] Wells J W. Scleractinia [M]//Moore R C. Treatise on invertebrate paleontology, Part F, Coelenterata, Geological Society of America and University of Kansas Press, Lawrence, 1956: F328 – F444.

- Burke L, Reytar K, Spalding M, et al. Reefs at risk revisited [M].
 Washington D C: World Resources Institute, 2011:1 144.
- [5] Blunden J, Arndt D. State of the climate in 2017 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018,99:Si – S332.
- [6] Eakin C M, Sweatman H P A, Brainard R E. The 2014—2017 global – scale coral bleaching event: Insights and impacts [J]. Coral Reefs, 2019, 38:539 – 545.
- [7] 张乔民,余克服,施 祺,等.中国珊瑚礁分布和资源特点[C]// 全国海洋高新技术产业化论坛,2005.
 Zhang Q,Yu K,Shi Q, et al. Distribution and resource characteristics of coral reefs in China[C]//National marine high tech industrialization forum,2005.
- [8] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应
 [J]. 中国科学:地球科学,2012,42(8):1160-1172.
 Yu K F. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes [J]. Science China Earth Sciences,2012,42(8):1160-1172.
- [9] Glynn P W, D' Croz L. Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Niño – coincident coral mortality[J]. Coral Reefs, 1990, 8:181 – 191.
- [10] Berkelmans R, Willis B L. Seasonal and local spatial patterns in the upper thermal limits of corals on the inshore Central Great Barrier Reef[J]. Coral Reefs, 1999, 18(3):219 – 228.
- [11] Strong A E, Liu G, Kimura T, et al. Detecting and monitoring 2001 coral reef bleaching events in Ryukyu Islands, Japan using satellite bleaching HotSpot remote sensing technique [C]//Proceedings of 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto; IEEE, 2002;237 – 239.
- [12] Manzello D P, Berkelmans R, Hendee J C. Coral bleaching indices and thresholds for the Florida Reef Tract, Bahamas, and St. Croix, US Virgin Islands [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 54 (12): 1923 – 1931.
- [13] Donner S D. An evaluation of the effect of recent temperature variability on the prediction of coral bleaching events [J]. Ecological Applications, 2011, 21:1718 – 1730.
- [14] Kleypas J A, Danabasoglu G, Lough J M. Potential role of the ocean thermostat in determining regional differences in coral reef bleaching events [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (3): L03613
- [15] Kumagai N H, Yamano H, Sango Map Project C. High resolution modeling of thermal thresholds and environmental influences on coral bleaching for local and regional reef management [J]. Peerj,2018,6:e4382.
- [16] 李 淑,余克服,陈天然,等.珊瑚共生虫黄藻密度结合卫星遥感分析 2007 年南沙群岛珊瑚热白化[J].科学通报,2011,56 (10):747-755.

Li S, Yu K F, Chen T R, et al. Assessment of coral bleaching using symbiotic zooxanthellae density and satellite remote sensing data in the Nansha Islands, South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin,2011,56(10):747-755.

- [17] Maturi E, Harris A, Mittaz J, et al. A new high resolution sea surface temperature blended analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(5):1015 – 1026.
- [18] Reefbase [DB/OL]. [2020 08 10]. http://reefbase.org/ main. aspx.

- [19] Donner S D, Rickbeil G J M, Heron S F. A new, high resolution global mass coral bleaching database[J]. Plos One, 2017, 12(4): e0175490.
- [20] Wilkinson C. Status of coral reefs of the world: 1998 [M]. Cape Ferguson, Queensland, and Dampier, Western Australia: Australian Institute of Marine Science, 1998.
- [21] Wilkinson C. Status of coral reefs of the world:2002[M]. Perth, Western Australia: Australian Institute of Marine Science, 2002.
- [22] Wilkinson C. Status of coral reefs of the world:2008 [M]. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia, 2008;296.
- [23] Zuo X, Su F, Shi W, et al. The 2014 thermal stress event on offshore archipelagoes in the South China Sea [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2015.
- [24] 汤超莲,李 鸣,郑兆勇,等.近45年涠洲岛5次珊瑚热白化的 海洋站SST指标变化趋势分析[J].热带地理,2010,30(06): 577-581,586.

Tang C L, Li M, Zheng Z Y, et al. An analysis on the trend of sea surface temperature indices for coral hot bleaching in Weizhou Island ocean observation station during 1966—2009 [J]. Tropical Geography, 2010, 30(06):577 – 581,586.

[25] Li X, Liu S, Huang H, et al. Coral bleaching caused by an abnormal water temperature rise at Luhuitou fringing reef, Sanya Bay, China[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2012, 15 (2):227-233.

- [26] 陈标.西沙群岛 2010 年珊瑚热白化卫星遥感监测[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Earth Science and Remote Sensing(ESRS 2012),2012. Chen B. Satellite remote sensing monitoring coral bleaching during the 2010 bleaching event at Parcel Islands, South China Sea[C]// Proceedings of 2012 International Conference on Earth Science and
- [27] Liu G, Heron S F, Eakin C M, et al. Reef scale thermal stress monitoring of coral ecosystems: New 5 – km global products from NO-AA Coral Reef Watch [J]. Remote Sensing, 2014, 6(12):1579 – 1160.

Remote Sensing (ESRS 2012),2012.

- [28] Heron S F, Liu G, Eakin C M, et al. Climatology development for NOAA Coral Reef Watch's 5 - km product suite [R]//NOAA Technical Report NESDIS 145. NOAA/NESDIS. College Park, MD. 2015, 21.
- [29] Liu G, Rauenzahn J L, Heron S F, et al. NOAA Coral Reef Watch 50 km satellite sea surface temperature – based decision support system for coral bleaching management [R]//NOAA Technical Report NESDIS 143; NOAA/NESDIS: College Park, MD, USA, 2013,33.

An improved method for thermal stress detection of coral bleaching in the South China Sea

LIU Bailu¹, GUAN Lei^{1,2}

(1. College of Marine Technology/Faculty of Information Science and Engineering/Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Qingdao/Sanya, 266100/572024, China; 2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: In recent years, coral bleaching events have frequently occurred globally due to global warming and other factors. However, the Coral Reef Watch (CRW) program established by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) has underestimated the actual situation of coral bleaching in the South China Sea. Based on 180 cases of coral bleaching in the South China Sea and its surrounding waters since 1985, this paper obtains the optimum threshold combination by calculating the false negative rate (FNR), the false positive rate (FPR), and the accuracy (ACC) of different threshold combinations, thus improving the detection accuracy of coral bleaching events in the South China Sea. The results are as follows: (1) The FNR of the bleaching detecting results obtained using the NOAA threshold was 70. 70%, indicating the long – term underestimation of the coral bleaching; (2) With the optimized critical threshold (CT) and alert threshold (AT), the ACC was improved from 58.13% to 73.90%, meanwhile the FNR and FPR were both less than 30%. As revealed by the coral bleaching event in the Nansha Islands in June 2007, the optimized thermal stress index can be used to effectively detect the event and mark the bleaching alarm level in time compared to the past underestimation. Therefore, the improved method for thermal threshold detection can improve the monitoring level of coral bleaching and are conducive to the management and protection of coral reefs in the South China Sea.

Keywords: coral bleaching; the South China Sea, remote sensing; SST; thermal stress