

陆永强, 陈正华, 余克服, 等. 1985–2019 年南海诸岛珊瑚礁区热压力时空变化研究分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 179–190, doi:10.12284/hyxb2022129

Lu Yongqiang, Chen Zhenghua, Yu Kefu, et al. Spatio-temporal variations of heat stress in coral reef regions over the South China Sea islands from 1985 to 2019[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(11): 179–190, doi:10.12284/hyxb2022129

1985–2019 年南海诸岛珊瑚礁区 热压力时空变化研究分析

陆永强^{1,2,3}, 陈正华^{1,2,3*}, 余克服^{1,2,3*}, 何鑫^{1,2,3}, 张威^{1,2,3}, 兰思香^{1,2,3}

(1. 广西大学 海洋学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 珊瑚礁研究中心, 广西 南宁 530004)

摘要: 全球气候变暖引起的热压力增大是南海诸岛珊瑚礁面临的最主要威胁, 基于热压力对珊瑚礁白化的评估有利于对其保护和管理。周热度 (Degree Heating Week, DHW) 可以衡量热压力的强度和持续时间, 代表过去连续 12 周珊瑚礁区海表温度 (SST) 正异常的累积。本文基于美国国家海洋和大气管理珊瑚礁监测计划 (National Oceanic and Atmospheric Administration-Coral Reef Watch, NOAA-CRW) 海表温度数据集, 逐像元对 35 个年最大周热度数值进行 *K*-means 聚类分析, 将南海诸岛珊瑚礁区分为 6 个区域: 南沙-1、南沙-2、南沙-3、东沙、西沙和中沙珊瑚礁区。分析南海诸岛珊瑚礁区 1985–2019 年热压力时空变化及其与 El Niño 的相关关系。结果表明: (1) 南海诸岛珊瑚礁区最大 DHW 为 0~12.9℃-周, 纬度上由高到低呈现减小变化规律。(2) 线性拟合法分析 1985–2019 年的年最大 DHW, 显示南海诸岛珊瑚礁区热压力强度呈现上升趋势, 为 0.013~0.174℃-周/a, 南海诸岛珊瑚礁区最大 DHW 出现在 1998 年、2010 年、2014 年。(3) 年最大 DHW 可能造成 93.9% 的珊瑚礁发生超过一次白化的风险, 19.6% 的珊瑚礁发生超过一次死亡的风险。(4) 南海诸岛珊瑚礁区的月均 DHW 和 ONI 交叉小波分析显示两者存在多时段 8~32 个月共振周期的时频特征和时滞相关性, 证实南海诸岛珊瑚礁热压力随着厄尔尼诺事件发生而显著增大; 时滞相关分析表明, ONI 与南海诸岛珊瑚礁区热压力呈正相关关系, 后者滞后于前者 7~9 个月的时间。

关键词: 珊瑚白化; 周热度; 热压力; 厄尔尼诺; 南海

中图分类号: P737.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)11-0179-12

1 引言

珊瑚礁是世界上生物多样性最丰富的生态系统, 被称为海洋里的“热带雨林”, 对人类和海洋生物有着重要的意义^[1-2]。近几十年来全球气候变暖造成海表温度(SST)上升^[3], 导致大规模珊瑚礁白化和死亡^[4]。SST

超过夏季最高温度 1℃, 珊瑚便会受到热压力影响排出体内共生的藻类(或共生虫黄藻失去体内色素), 珊瑚露出白色的碳酸钙骨架, 这种现象称为白化^[5-6]。若热压力增强或持续时间过长, 珊瑚就会死亡^[7]。珊瑚白化对珊瑚礁的生物多样性和生态系统服务功能产生了严重的影响, 预计 21 世纪末全球暖化将导致

收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-05-29。

基金项目: 国家自然科学基金(42090041, 42030502); 广西科技项目(AD17129063, AA17204074); 广西自然科学基金(2018GXNSFAA281100)。

作者简介: 陆永强(1996—), 男, 贵州省晴隆县人, 主要研究热压力对南海珊瑚礁区的胁迫作用。E-mail: YongJohnLu@163.com

* 通信作者: 陈正华(1979—), 女, 重庆市人, 副教授, 博士, 主要从事海洋及海岸带的生态和环境研究。E-mail: chen.zhenghua@163.com; 余克服(1969—), 湖北省公安县人, 教授, 博士, 主要从事珊瑚礁地质、生态与环境的研究。E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

珊瑚礁减少 75%^[8]。

我国珊瑚礁主要分布在南海诸岛, 面积约为 30 000 km², 占世界珊瑚礁面积的 5%^[9-10]。研究发现南海诸岛珊瑚礁正处于快速退化状态^[11-12], 如西沙群岛 2005-2006 年活珊瑚平均覆盖度为 65%~70%^[13], 到 2015 年西沙群岛活珊瑚平均覆盖度为 16.3%^[11]。南海诸岛珊瑚礁是易受热压力影响的地区之一^[14]。有研究表明南海诸岛珊瑚礁的热压力、白化和死亡与厄尔尼诺(El Niño)存在紧密的联系^[15], El Niño 一方面通过大气桥理论与南海进行大气环流^[16], 另一方面吕宋海峡海流将 El Niño 与南海相连^[17]。珊瑚白化与热压力有直接关系^[18], 在南海诸岛珊瑚礁退化的背景下, 亟需对南海诸岛珊瑚礁区热压力及 El Niño 对其影响展开研究。对于珊瑚礁热压力和白化的研究, 传统研究手段大多集中在部分岛礁, 南海诸岛珊瑚礁分布零散, 研究人员无法定期访问所有珊瑚礁区域^[19]。遥感具有覆盖范围广、时间空间分辨率高、成本低、可实现连续观测等特点, 随着遥感技术的迭代升级, 大范围的珊瑚礁区监测可以通过遥感卫星实现^[20-21]。

本文将使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)珊瑚礁监测中心(CRW)的 1985-2019 年每日 5 km 分辨率 SST 数据集^[22-23], 对南海诸岛珊瑚礁区的热压力进行时空变化分析, 基于热压力评估珊瑚礁白化和死亡的风险。一方面可以探究珊瑚礁对大规模热压力的抵抗能力^[24], 另一方面可以找出珊瑚礁热胁迫最小的地点, 以便找出合适珊瑚礁区避难所^[25-26]。珊瑚白化与 El Niño 显著相关^[27], 本文将对珊瑚礁区热压力和 El Niño 进行相关性分析, 量化 El Niño 对南海诸岛珊瑚礁区热压力变化的影响。对南海诸岛珊瑚礁热压力的研究, 有利于科学管理南海珊瑚礁, 推进珊瑚礁生态系统的可持续发展^[28]。

2 数据来源和方法

2.1 研究区域

珊瑚礁数据从全球珊瑚礁分布(Global Distribution of Coral Reefs)网站获取, 网址 <https://data.unep-wcmc.org/datasets/1>。南海诸岛珊瑚礁远离陆地受到人类活动影响较小, 本文将南海诸岛珊瑚礁作为研究区。为了准确评估珊瑚礁区的热压力时空变化, 本文将南海珊瑚礁进行 20 km 缓冲扩展来表示南海珊瑚礁研究区^[29]。缓冲后的珊瑚礁区主要分布在东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛(黄岩岛)和南沙群岛(图 1a)共 4 851 个像元, 因此本文便将南海珊瑚礁研究区分为东沙珊瑚礁区(20°20'~21°10'N, 116°26'~117°10'E)、西沙珊瑚礁区(15°32'~17°18'N, 110°59'~112°58'E)、

中沙珊瑚礁区(14°53'~15°25'N, 117°29'~118°03'E)和南沙珊瑚礁区(7°03'~12°13'N, 109°23'~118°02'E)。

2.2 数据来源

2.2.1 海表温度

海表温度数据选取自美国国家大气与海洋中心管理局珊瑚礁观测计划中心(<https://coralreefwatch.noaa.gov/index.php>)的两组数据集:(1)1985 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的每日更新 5 km SST 数据集, 该数据集是 CRW 在 2014 年发布的每日 5 km 分辨率的海表温度产品, 时间跨度是 1985 年至今^[23];(2)3.1 version 5 km 分辨率的最热月平均数据(The Maximum Monthly Mean, MMM), MMM 代表 1985-2012 年每个像元最热月平均气候 SST 值^[30]。

2.2.2 ONI

本文选取热带太平洋(5°N~5°S, 120°~170°W)海域(即 Niño 3.4 区)的海表温度异常(Oceanic Niño Index, ONI)来表征 El Niño。ONI 来源于 NOAA 气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)发布的第五版数据集(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ENSOstuff/ONI_v5.php), 时间选择 1985 年 3 月至 2019 年 12 月。当 Niño 3.4 区的海表温度距平值连续 5 个月超过 0.5°C 就可以被判定为一次 El Niño 事件。

2.3 研究方法

2.3.1 周热度

周热度(Degree Heating Week, DHW)是表示热压力大小的一个指标^[31], 表示珊瑚礁区域连续 3 个月(12 周)海表温度超过最热月平均温度(MMM)1°C 及以上的累积值。本文用来描述 1985-2019 年南海诸岛珊瑚礁区热压力的时空变化。本文逐像元提取南海诸岛珊瑚礁区的 SST 数据集和 MMM 数据, 基于 CRW 开发的热压力计算方法算出白化热点(HotSpot, HS)和 DHW。其中, HS 是海表温度超过最大月平均 SST 时, 表示某个时间点的珊瑚礁受到热胁迫程度^[32]。DHW 表示最近 84 d HS 的累计值, 在此期间只有 HS 超过 1°C, 珊瑚礁区才会受到热胁迫累积^[33]。DHW 可根据 Liu 等^[34]提出的计算公式求得:

$$HS = \begin{cases} SST_{\text{daily}} - MMM, & SST_{\text{daily}} > MMM, \\ 0, & SST_{\text{daily}} \leqslant MMM, \end{cases} \quad (1)$$

$$DHW = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^{84} (HS_i, HS_i \geqslant 1^\circ\text{C}),$$

式中, SST_{daily} 为每天 5 km 分辨率的海表温度; 当 HS 为负值时, 珊瑚礁不受热胁迫作用, HS 记为 0, 单位: °C; 一个 DHW 代表一星期的 HS 大于 1°C, 单位为 °C-周。

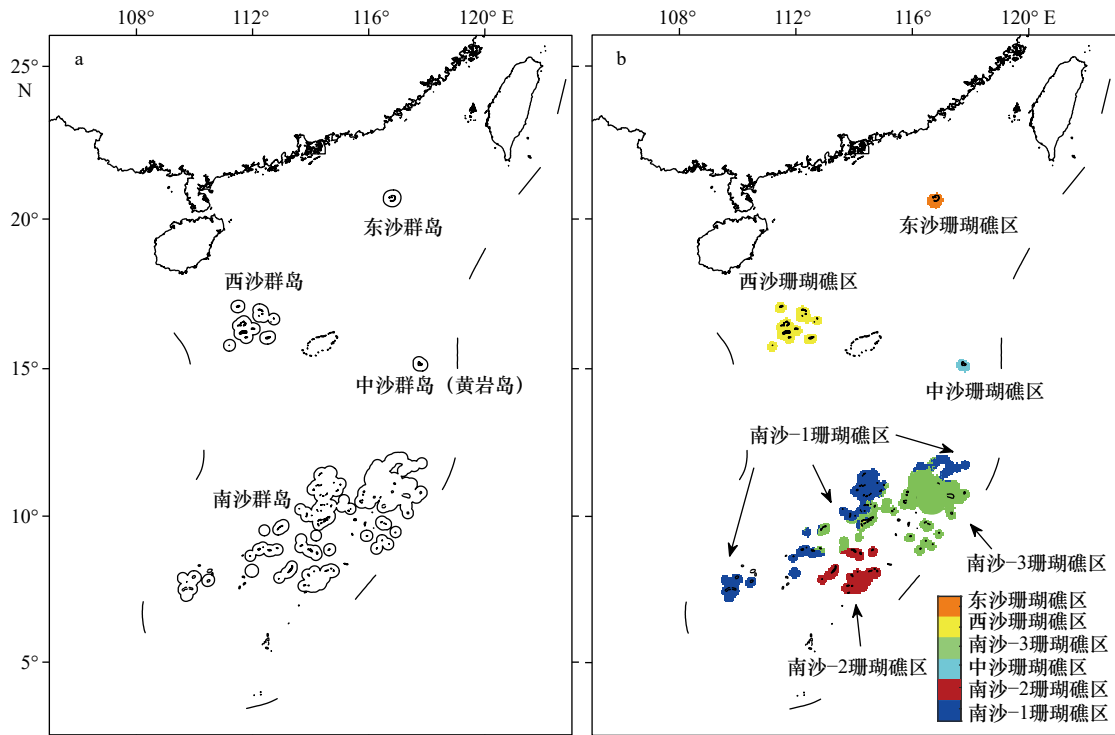


图1 南海诸岛珊瑚礁研究区

Fig. 1 Location of coral reef regions in the South China Sea islands

南海诸岛珊瑚礁区 20 km 缓冲(a)和 K-means 聚类分区(b)的地理空间分布(地图底图来自国家基础地理信息中心, 网址:

<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)

Geographical distribution of 20 km buffer (a) and K-means clustering partition (b) in the coral reef regions of the South China Sea islands

参照 CRW 珊瑚白化预警判断标准^[23,35]:当 $DHW \geq 4^\circ\text{C}-\text{周}$ 时,珊瑚礁受到的热胁迫使得珊瑚有白化风险;随着珊瑚礁受到热胁迫的强度提升,当 $DHW \geq 8^\circ\text{C}-\text{周}$ 时,珊瑚礁区的珊瑚存在死亡风险。

2.3.2 热压力统计分析

热压力胁迫作用可能致使珊瑚礁白化,可用最大周热度(Maximum DHW)来量化^[36]。本文计算 35 a 南海诸岛珊瑚礁区时间序列(每天)逐像元(共 4 851 个像元)DHW 值,逐像元提取每年最大周热度(Annual Maximum DHW)的值。年最大 DHW 可以表征当年度最大的热压力强度,可用于评估南海诸岛珊瑚礁受到热压力胁迫的程度及其可能的白化和死亡风险^[37]。基于 NOAA CRW 的 SST 数据集和 MMM 数据集,计算得到 35 a 4 851 个像元的年最大 DHW 值。珊瑚礁区所受的热压力时空变化可以通过以下指标来量化:(1)珊瑚礁区逐像元的最大 DHW;(2)基于最小二乘法原理的线性趋势拟合方法^[38]来评估 1985–2019 年珊瑚礁区年最大 DHW 的变化趋势;(3)珊瑚礁区最大 DHW 发生的时间;(4)35 a 珊瑚礁区热压力造成珊瑚礁白化风险(年最大 $DHW \geq 4^\circ\text{C}-\text{周}$)和死亡风险(年最大 $DHW \geq 8^\circ\text{C}-\text{周}$)的频数。

2.3.3 南海珊瑚礁分区

南海诸岛珊瑚礁分布在不同纬度上。南沙珊瑚礁面积过大、经纬度跨越范围大,不利于南海诸岛珊瑚礁空间异质性体现。因此本文对南沙珊瑚礁区进行分区,参照 Muñiz-Castillo 等^[39]在加勒比海珊瑚礁的分区方法,将南沙珊瑚礁区 35 a 的年最大 DHW 进行 K-means 聚类分析。为了评估 K-means 聚类模型的聚类能力与数据的分类效果,引入 CH(Calinski-Harabaz)指数(K)^[40],指数值越高表明该聚类模型对数据的聚类效果越好。当 $K=3$ 时 CH 系数最大,聚类效果最好,南沙群岛珊瑚礁可分为 3 个研究区:南沙-1 珊瑚礁区、南沙-2 珊瑚礁区和南沙-3 珊瑚礁区。因此南海珊瑚礁区(图 1b)为:东沙珊瑚礁区、西沙珊瑚礁区、中沙珊瑚礁区、南沙-1 珊瑚礁区、南沙-2 珊瑚礁区和南沙-3 珊瑚礁区。

2.3.4 DHW 与 ONI 相关关系分析

El Niño 事件造成的热通量变化是南海海域 SST 上升的主要原因^[41],本文将对珊瑚礁区的热压力与 ONI 进行相关性分析。首先对珊瑚礁区每日周热度(Daily DHW)的值进行月平均获得 6 个珊瑚礁区月均时间序列,提取每个珊瑚礁区 DHW 的中位数代表其

热压力, 同时进行 pettie 非参数检验^[42], 以确定 6 个珊瑚礁区月均热压力显著变化时间点。其次, 本文对热压力和 El Niño 进行交叉小波分析(XWT), 分析后者对前者的影响。交叉小波分析可以揭示南海诸岛珊瑚礁区热压力与 El Niño 在时频中高能量区的能量共振和协方差分布规律, 呈现两者的周期相似性和相位关系^[43], 计算过程参考文献 [44]; El Niño 事件对南海的影响具有滞后性, 为了量化南海诸岛珊瑚礁区对 El Niño 响应的时滞效应, 最后本文对月均热压力和 El Niño 时间序列进行时滞相关分析^[45]。

3 结果与讨论

3.1 南海诸岛珊瑚礁区热压力特征分析

3.1.1 南海诸岛珊瑚礁区最大 DHW 的空间变化规律

本文逐像元提取 1985–2019 年南海诸岛珊瑚礁区最大 DHW 的值。南海诸岛珊瑚礁区最大 DHW 空间变化如图 2 所示, 最大 DHW 的大小范围为 0~12.9℃-周, 最大 DHW 在空间上呈现西北往东南逐渐

减少的变化: 东沙珊瑚礁区受到热胁迫最严重, 热胁迫最小的是在南沙-1 珊瑚礁区。约 93.9% 的珊瑚礁区 $DHW \geq 4^\circ\text{C}-\text{周}$, 即热压力可能造成珊瑚礁白化的风险, 约 19.6% 的珊瑚礁区(东沙和部分西沙珊瑚礁区) $DHW \geq 8^\circ\text{C}-\text{周}$, 此时存在热压力造成珊瑚礁死亡的风险。由图 3a 可以看出, 南海诸岛珊瑚礁区最大 DHW 取值在 5~6℃-周的像元数量最多(31.5%), 主要分布在南沙和中沙珊瑚礁区。东沙珊瑚礁区最易受到热压力及其造成白化和死亡风险的影响, 因为最大热压力都大于 11℃-周; 西沙珊瑚礁区热压力都大于 5℃-周; 中沙珊瑚礁区热压力强度为 4~7℃-周; 南沙-1 珊瑚礁区热压力强度为 2~7℃-周; 南沙-2 珊瑚礁区热压力强度在 4~8℃-周; 南沙-3 珊瑚礁区热压力在 4~11℃-周。

本文结果显示最大 DHW 在纬度上呈现由北向南减小的变化规律(图 2, 图 3a)。南海诸岛珊瑚礁区热压力和同纬度的印度洋珊瑚礁区热压力几乎相同, 印度洋珊瑚礁区最大 DHW 为 0~13℃-周^[46], 明显低于

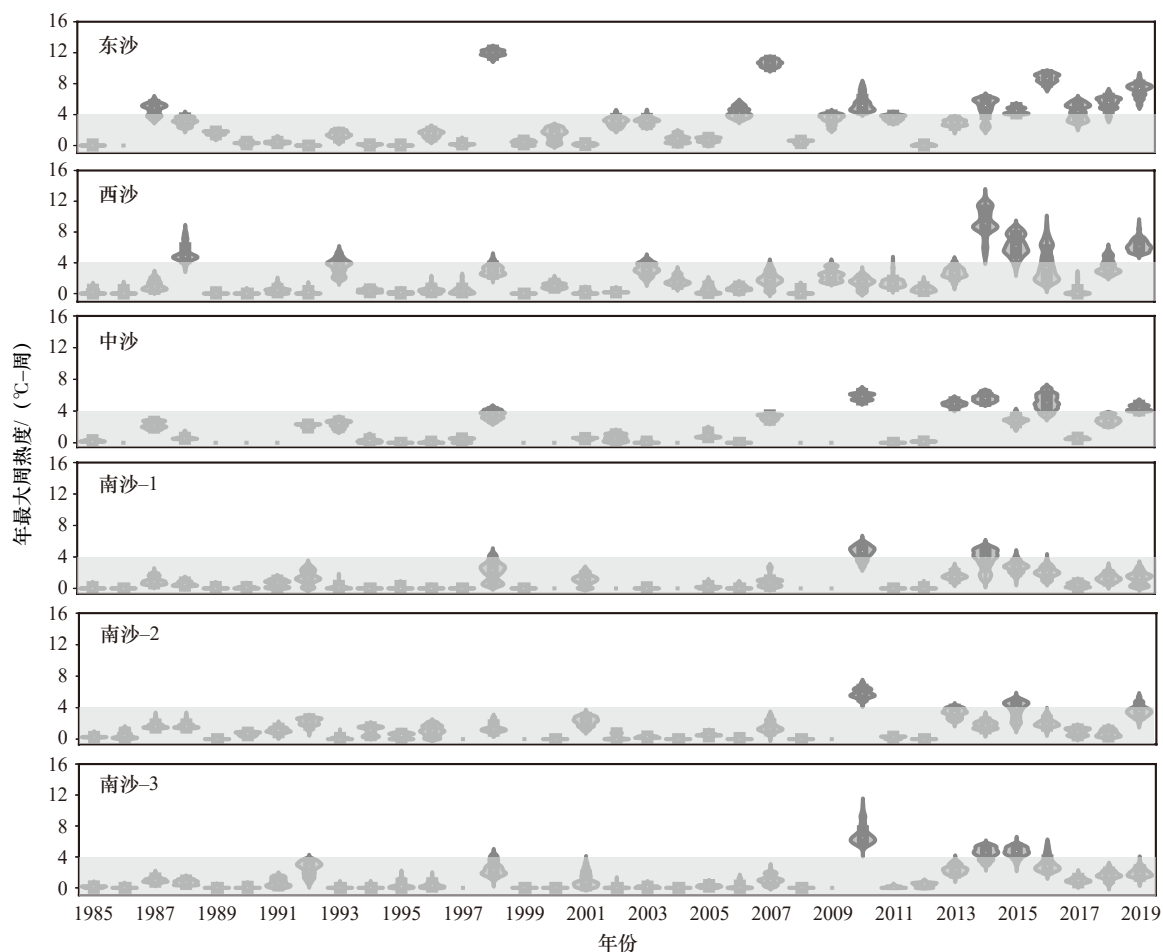


图 2 南海诸岛珊瑚礁区年最大周热度小提琴图

Fig. 2 The violin plots of the annual maximum degree heating week in the coral reef regions of the South China Sea islands

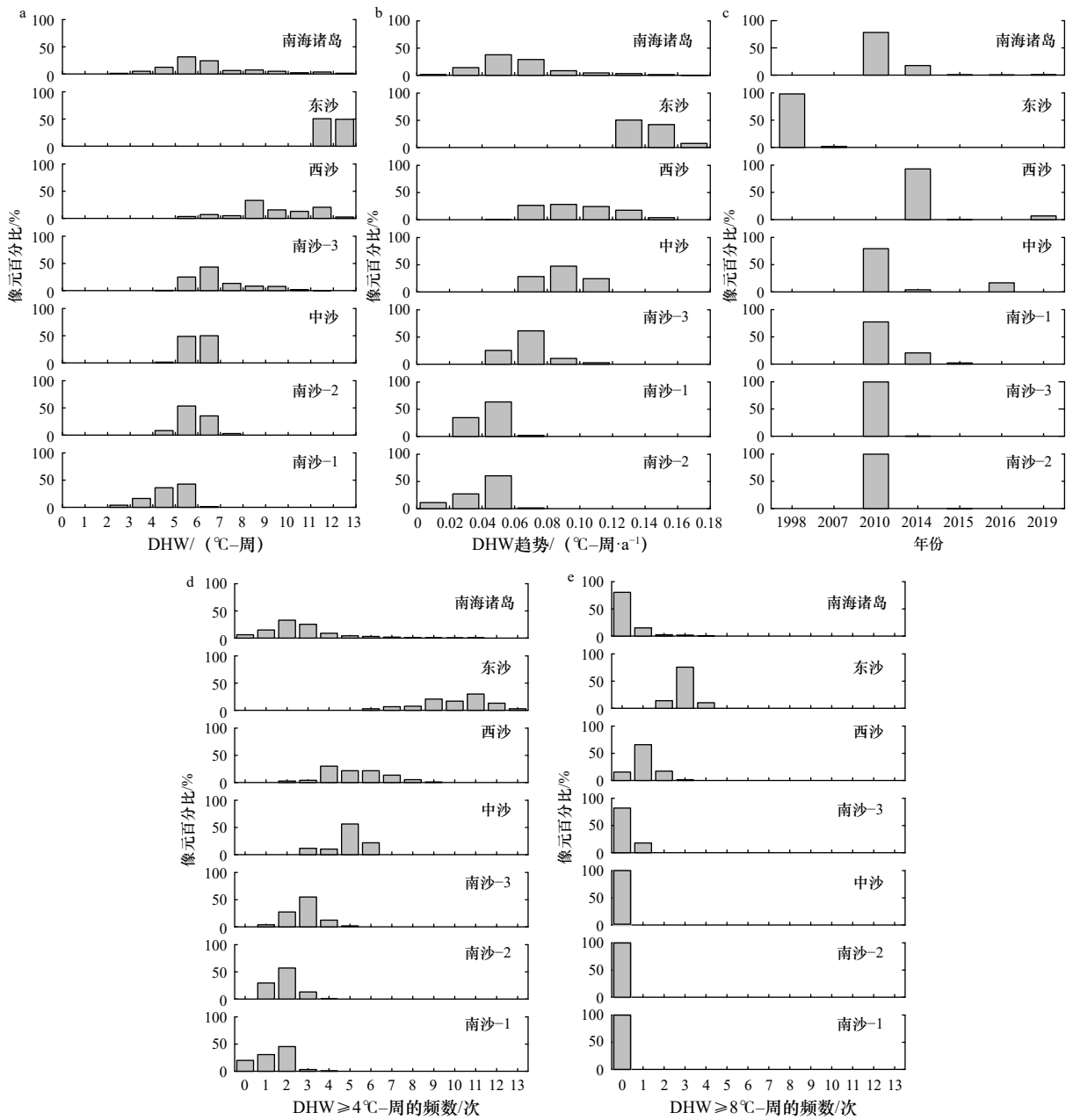


图3 1985-2019年南海诸岛珊瑚礁区热压力异质性变化

Fig. 3 Heat stress heterogeneity changes in the coral reef regions of the South China Sea islands from 1985 to 2019

最大周热度(DHW)(a)、年最大 DHW 趋势(b)、最大 DHW 年份(c)、年最大 DHW $\geq 4^{\circ}\text{C}$ -周发生的频数(d)、年最大 DHW $\geq 8^{\circ}\text{C}$ -周发生的频数(e)的百分比直方图

Percentage histogram of the distribution of maximum degree heating weeks (DHW) (a), annual trend of maximum DHW (b), maximum DHW value in each year (c), frequency of annual maximum DHW $\geq 4^{\circ}\text{C}$ -weeks (d), frequency of annual maximum DHW $\geq 8^{\circ}\text{C}$ -weeks (e)

同纬度加勒比珊瑚礁区最大 DHW 的 $0\sim 25.6^{\circ}\text{C}$ -周^[29]。南海诸岛珊瑚礁区热压力最强区域在高纬度地区, 加勒比珊瑚礁区最强区域在低纬度地区。出现纬度变化原因: 一方面是南海 SST 较低^[47], 1988-2015年南海珊瑚礁区年平均 SST 未超过 30°C , 最高值在南沙珊瑚礁区, 最低位于东沙珊瑚礁区; 另一方面是该区域最热月平均的值(MMM)较小, 其在东沙珊瑚礁

区最小, 南沙珊瑚礁区最大, 造成了热压力在东沙珊瑚礁区最大, 南沙珊瑚礁区最小。

3.1.2 珊瑚礁区年最大 DHW 变化趋势

南海诸岛珊瑚礁区的热压力在 1985-2019 年呈上升趋势, 如图 3b 所示, 研究区热压力上升趋势的值在 $0.013\sim 0.174(^{\circ}\text{C}\text{-周})/\text{a}$ 之间。在纬度上呈现由北向南逐渐变小: 珊瑚礁区年 DHW 变化趋势最强的区

域是东沙珊瑚礁区,都大于 $0.12(\text{°C}\cdot\text{周})/\text{a}$;西沙珊瑚礁区年最大 DHW 变化趋势大于 $0.04(\text{°C}\cdot\text{周})/\text{a}$;中沙珊瑚礁区年最大 DHW 变化趋势在 $0.06\sim 0.12(\text{°C}\cdot\text{周})/\text{a}$ 的区间;南沙-1 珊瑚礁区年最大 DHW 变化趋势为 $0.02\sim 0.08(\text{°C}\cdot\text{周})/\text{a}$;南沙-2 珊瑚礁区年最大 DHW 变化趋势为 $0\sim 0.08(\text{°C}\cdot\text{周})/\text{a}$,在南海诸岛珊瑚礁区中变化趋势最小;南沙-3 珊瑚礁区年最大 DHW 变化趋势是 $0.04\sim 0.12(\text{°C}\cdot\text{周})/\text{a}$ 。

本文研究结果显示 1985–2019 年南海诸岛珊瑚礁区热压力持续增强,与前人研究南海东沙、西沙和南沙珊瑚礁区的急性和慢性热压力都呈现升高趋势一致^[48]。枝状珊瑚热胁迫适应性小于块状珊瑚,南海珊瑚优势属从枝状珊瑚属逐渐转化为块状珊瑚属^[47],热压力增强是重要原因。东沙珊瑚礁区升温最剧烈,增温速率的值最大^[49]。造成热压力上升最主要的因素可能是 El Niño 事件对海水的增温效果^[50],叠加人类气溶胶排放增加导致东亚夏季风减弱^[51],云量减少使得太阳有效辐射增加和海气交换的热量损失降低等^[52]。以上因素共同作用加强了热压力的增强趋势,纬度上呈现由北向南递减的现象。

3.1.3 珊瑚礁年最大 DHW 发生的时间

南海诸岛珊瑚礁区最大 DHW 主要集中在特定的年份。如图 3c 显示,南海珊瑚礁区最大 DHW 出现的时间按像元比例由高到低分别为 2010 年、2014 年、1998 年、2016 年、2019 年和其他年份,与 El Niño 事件时间匹配^[53]。约 78.4% 南海诸岛珊瑚礁年最大 DHW 发生在 2010 年,主要分布在南沙珊瑚礁区和中沙珊瑚礁区;其次是 2014 年,占南海诸岛珊瑚礁区像元比例约为 17.6%,主要分布在西沙珊瑚礁区和南沙北部少许区域。第 3 个最大年份 DHW 发生在 1998 年,占南海诸岛珊瑚礁区像元比例约为 2.2%,分布在东沙珊瑚礁区。约 1.7% 南海诸岛珊瑚礁年最大 DHW 发生在 2015 年、2016 年和 2019 年。东沙珊瑚礁区年最大 DHW 发生在 1998 年和 2007 年;西沙珊瑚礁区年最大 DHW 发生在 2014 年和 2019 年;中沙珊瑚礁区年最大 DHW 发生在 2010 年、2014 年和 2016 年;南沙-1 珊瑚礁区年最大 DHW 发生在 2010 年、2014 年和 2015 年;南沙-2 和南沙-3 珊瑚礁区年最大 DHW 基本都发生在 2010 年。

西沙珊瑚礁生态监控区的监测站(永兴岛及七连屿)2007–2015 年监测数据显示^[54]:平均活珊瑚覆盖度由 53.80% 下降到 5.44%。2011 年之前活珊瑚覆盖

度急速下降,2011 年之后基本平稳;2012–2014 年活珊瑚覆盖度有少许恢复,珊瑚补充量增多、珊瑚种类增多;2014 年之后活珊瑚平均覆盖率与补充量降低。2007–2014 年,热压力不会造成珊瑚礁白化(图 2),人类活动、长棘海星暴发以及海洋 pH 偏低等因素与 SST 升高叠加是珊瑚覆盖度降低的重要原因^[55]。2014–2015 年热压力可能有造成西沙珊瑚礁发生白化的风险(图 2),这可能是珊瑚礁再次退化的重要原因。2007 年 5–6 月生态调查发现异常高温和过度捕捞的威胁造成南沙群岛渚碧礁和美济礁至少 35 种珊瑚发生白化^[12]。本文结果显示 2007 年最大 DHW 不会造成珊瑚礁白化的发生(图 2),说明南沙渚碧礁和美济礁的珊瑚白化阈值可能小于 $4\text{°C}\cdot\text{周}$ 。珊瑚礁白化是多种因素共同作用,彼此相互影响的结果^[13,56],基于 DHW 评估珊瑚礁白化可能存在低估的情况。

3.1.4 珊瑚礁区热压力造成白化和死亡风险的频数

本文逐像元提取南海珊瑚礁区 1985–2019 年共 35 个年最大 DHW,频数表示 35 年的年最大周热度可能造成珊瑚礁白化和死亡风险的次数^[4]。当 $\text{DHW}\geq 4\text{°C}\cdot\text{周}$,热压力可能有造成珊瑚礁发生白化的风险; $\text{DHW}\geq 8\text{°C}\cdot\text{周}$,热压力可能有造成珊瑚礁发生死亡的风险^[37,57]。如图 3d 和图 3e 显示,1985–2019 年南海诸岛珊瑚礁区 $\text{DHW}\geq 4\text{°C}\cdot\text{周}$ 的频数为 $0\sim 13$ 次,约 93.9% 的珊瑚礁可能有超过 1 次白化的风险;南海诸岛珊瑚礁区 $\text{DHW}\geq 8\text{°C}\cdot\text{周}$ 的频数为 $0\sim 4$ 次,约 19.6% 的珊瑚礁可能有超过 1 次死亡的风险。 $\text{DHW}\geq 4\text{°C}\cdot\text{周}$ 和 $\text{DHW}\geq 8\text{°C}\cdot\text{周}$ 发生频数在纬度上总体呈现由北向南递减:东沙珊瑚礁区最容易受到白化和死亡风险的影响,热压力可能造成该区全部珊瑚礁超过 6 次白化风险和 2 次死亡风险;西沙珊瑚礁区热压力可能造成该区全部珊瑚礁超过 2 次白化风险,约 84.6% 的珊瑚礁存在 1 次死亡风险;中沙珊瑚礁区热压力可能造成该区全部珊瑚礁超过 3 次白化风险;热压力可能造成南沙-1 珊瑚礁区约 80% 的珊瑚礁,南沙-2 和南沙-3 珊瑚礁区全部珊瑚礁超过 1 次白化风险,约 18% 的南沙-3 珊瑚礁区可能发生 1 次珊瑚死亡事件,中沙、南沙-1 和南沙-2 珊瑚礁区都没有发生死亡风险。

东沙珊瑚礁区受到的热压力最大,可能经历过多次海表温度异常导致珊瑚白化事件。这与前人的研究结果基本一致^[58],例如 1998 年严重的热白化导致东沙珊瑚礁潟湖内的珊瑚大量白化(超过 90%),到

2007年珊瑚礁仅呈现初步恢复或几乎没有恢复的状态,异常高温潟湖珊瑚礁再次发生白化^[14]。然而,由于吕宋海峡潮汐产生了内波,深部海水间歇上升使得东沙珊瑚礁区环礁北部和东部外礁斜坡的海表温度骤降^[59],东沙环礁珊瑚覆盖率仍然很高。内波可能使东沙环礁成为一个独特的珊瑚生态系统,东沙环礁未来可以作为珊瑚的热避难所^[58]。

3.2 El Niño 对南海诸岛珊瑚礁区热压力的影响

南海远岸海域 SST 升高主要受到 El Niño 事件导致热通量变化影响^[60]。为了研究南海诸岛珊瑚礁区热压力对 El Niño 的响应,本文逐像元对 1985–2019 年南海诸岛 6 个研究区每日 DHW 进行月平均处理,

选取各礁区中位数代表其月平均 DHW 值,得到如图 4 所示的月平均 DHW 时间序列数据:南海诸岛珊瑚礁区较强的热压力主要出现在 1998–1999 年、2010–2011 年和 2014–2017 年。pettie 非参数检验表明南海诸岛珊瑚礁区热压力变化时间主要在 2010–2014 年之间。东沙珊瑚礁区在 1998 年,西沙珊瑚礁区在 2014–2015 年,中沙和南沙 3 个珊瑚礁区在 2010 年观测出最大热压力事件。1988 年以来南海诸岛珊瑚礁区便受到热压力的影响,自 2010 年以后,南海诸岛珊瑚礁区大部分区域便受到持续的热压力作用。同时,本文发现 El Niño 事件发生后南海诸岛热压力存在一定时间的滞后增强的现象。

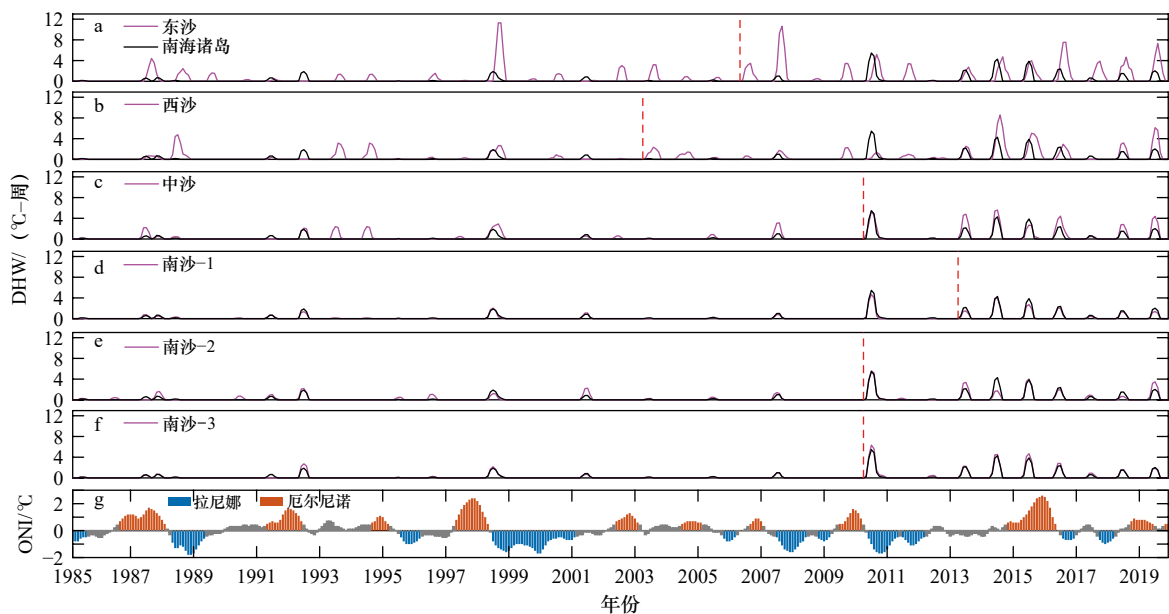


图 4 1985–2019 年珊瑚礁区月平均周热度(DHW)和 ONI 时间序列

Fig. 4 Time series of monthly mean degree heating week (DHW) of coral reef area and oceanic Niño index (ONI) from 1985 to 2019

时间序列显示南海诸岛珊瑚礁热压力受到 El Niño 影响(图 4),两者间的相关特征及周期有待进一步深入研究。交叉小波分析可以确定热压力与 El Niño 显著共振周期性,相互影响的时延相关特征和时频位相关关系。图 5 为南海诸岛珊瑚礁月平均 DHW 与 ONI 的交叉小波功率谱,呈现出间歇式的相位动态变化特征:6 个珊瑚礁区共同存在 3 个主要 16~64 个月的显著共振周期:1998–2000 年、2010–2012 年以及 2014–2017 年。1985 年之后,南海珊瑚礁的热压力受到 El Niño 的影响不断增强,2014–2015 年之后有所减弱。6 个珊瑚礁区的小波功率谱也有不同,东沙珊瑚礁区 1998–1999 年受到 El Niño 影响最强,两者存在 16~64 个月的显著共振周期;西沙珊瑚礁区直到 2014 年受到 El Niño 影响弱,2014–2017 年两者存在 8~16

个月的显著共振周期;中沙、南沙-1 和南沙-3 珊瑚礁区在 2010–2012 年 16~64 个月的显著共振周期;南沙-2 珊瑚礁区 2010 年之前受到 El Niño 影响最小。

6 个珊瑚礁研究区热压力事件最强时间段(1998–2000 年、2010–2012 年以及 2014–2017 年)与 El Niño 发生的时间基本吻合,总体呈现反相位变化,通过显著性检验的粗黑线区域内箭头总体特征表现为向上,表明 El Niño 在主要周期尺度领先热压力不少于 $\pi/2$ 个相位。DHW 对 ONI 的响应具有滞后性,ONI 值越大,南海诸岛珊瑚礁热压力越大,造成珊瑚白化和死亡的可能性越大。

交叉小波分析已确认南海诸岛珊瑚礁区热压力与 El Niño 具有多时段显著滞后共振周期,但是滞后时间不明确。因此本文使用时滞相关分析研究热压

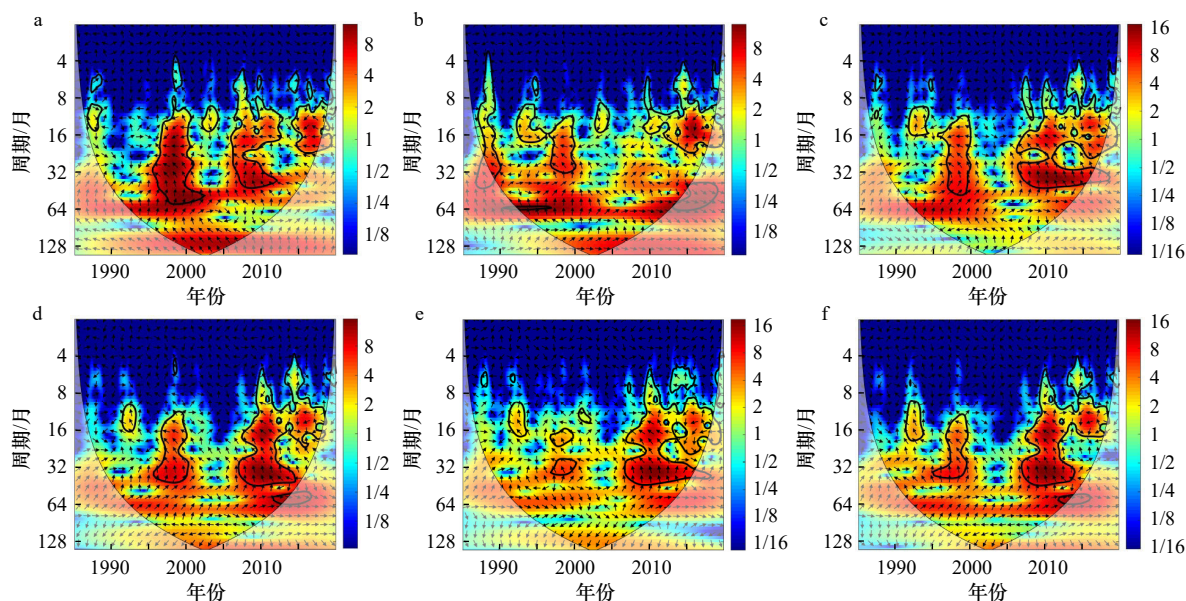


图5 东沙(a)、西沙(b)、中沙(c)、南沙-1(d)、南沙-2(e)、南沙-3(f)珊瑚礁区月平均周热度(DHW)和ONI的交叉小波能量谱

Fig. 5 The cross wavelet transform characteristics of monthly mean degree heating week (DHW) of Dongsha (a), Xisha (b), Zhongsha (c), Nansha-1 (d), Nansha-2 (e), and Nansha-3 (f) coral reef area with oceanic Niño index (ONI) 黑线包围区域内表示其通过 5% 显著性水平的标准红噪声检验。←表示 El Niño 与 DHW 为负位相变化, →表示 El Niño 与 DHW 为同位相变化, ↓表示 El Niño 落后 DHW 变化 3 个月, ↑表示 El Niño 超前 DHW 3 个月

The black lines surrounding areas indicate that it has passed the standard red noise test at the 5% significance level. ← denotes the negative phase change between El Niño and DHW, → denotes the same phase change between El Niño and DHW, ↓ denotes that El Niño lags behind DHW for 3 months, ↑ denotes that El Niño advances DHW for 3 months

力与 El Niño 的时滞关系。结果如图 6 所示: El Niño 与南海诸岛热压力之间存在较弱的正相关($r>0$), 存在 7~9 个月的滞后时间, 与贾丹丹等^[49]分析南海 SSTA 滞后于 El Niño 3.4 区 7~8 个月时间基本一致。其中, 东沙和西沙珊瑚礁区滞后 El Niño 9 个月时间(图 6a, 图 6b), 中沙珊瑚礁区滞后 El Niño 8 个月时间(图 6c), 南沙 3 个珊瑚礁区均滞后 El Niño 7 个月时间(图 6d 至图 6f)。总之, El Niño 事件发生后产生的延迟效应致使 7~9 个月后南海诸岛珊瑚礁区热压力增强, ONI 越高 DHW 越强, 珊瑚受到的热胁迫越严重。

4 结论

本文首先提取南海诸岛 6 个珊瑚礁区年最大 DHW 来研究其热压力时空变化规律, 并基于年最大 DHW 评估珊瑚礁白化和死亡风险。其次计算南海诸岛 6 个珊瑚礁区月平均 DHW, 利用交叉小波相关分析法和时滞相关分析对月平均 DHW 和 ONI 进行相关性分析。得到以下结论: 1985-2019 年南海诸岛珊瑚礁区中的热压力为 0~12.9℃-周, 呈上升趋势, 在纬度上由北到南呈递减变化; 南海诸岛珊瑚礁区最

大 DHW 主要发生在 2010 年、2014 年和 1998 年; 南海诸岛珊瑚礁区热压力可能造成珊瑚礁白化风险($DHW \geq 4^\circ\text{C}-\text{周}$)和死亡风险($DHW \geq 8^\circ\text{C}-\text{周}$)的频数也纬度上由北到南呈递减变化: 93.9% 的南海诸岛珊瑚礁区可能会发生一次白化风险, 80.4% 的珊瑚礁区热压力不会引起珊瑚死亡; 东沙珊瑚礁区受到的热压力最强, 热压力可能造成珊瑚白化和死亡的风险频数最大, 南沙-1 珊瑚礁区受到热压力的影响最少。El Niño 事件影响了南海诸岛珊瑚礁区热压力(1998-1999 年、2010-2011 年和 2014-2017 年)变化, El Niño 和热压力之间存在 16~64 个月显著共振周期的反相位关系, 南海诸岛珊瑚礁区热压力会随着 El Niño 事件发生而滞后增大, 南海诸岛珊瑚礁区热压力滞后 El Niño 事件 7~9 个月的时间。大部分区域 2010 年以后热压力强度显著增强, 珊瑚礁白化和死亡风险增加。结合西沙珊瑚礁站点监测和南沙(美济礁和渚碧礁)珊瑚礁调查数据, 发现多因素互相作用会导致珊瑚礁发生白化, 基于热压力对南海诸岛珊瑚礁区白化评估存在低估的可能, 南海诸岛珊瑚礁的白化阈值可能小于 4℃-周。

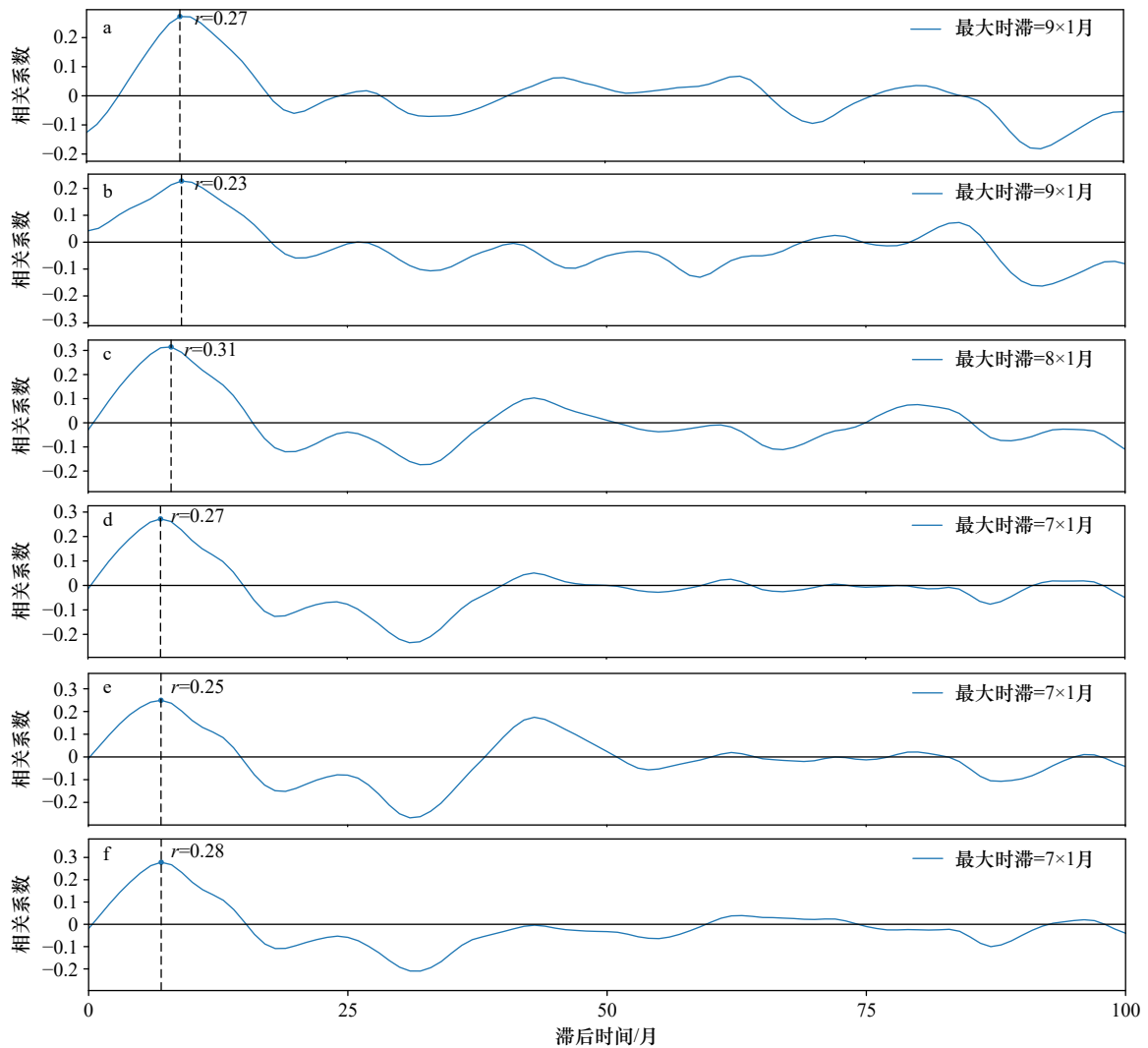


图6 东沙(a)、西沙(b)、中沙(c)、南沙-1(d)、南沙-2(e)、南沙-3(f)珊瑚礁区月平均周热度(DHW)与ONI时滞分析

Fig. 6 Time lag analysis between monthly mean degree heating week (DHW) of Dongsha (a), Xisha (b), Zhongsha (c), Nansha-1 (d), Nansha-2 (e), and Nansha-3 (f) coral reef area with oceanic Niño index (ONI)

参考文献:

- [1] Boilard A, Dubé C E, Gruet C, et al. Defining coral bleaching as a microbial dysbiosis within the coral holobiont[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(11): 1682.
- [2] 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 Kefu. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Science*, 2012, 42(8): 1160–1172.
- [3] Johnson G C, Lyman J M. Warming trends increasingly dominate global ocean[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(8): 757–761.
- [4] Hughes T P, Anderson K D, Connolly S R, et al. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene[J]. *Science*, 2018, 359(6371): 80–83.
- [5] Sully S, Burkepille D E, Donovan M K, et al. A global analysis of coral bleaching over the past two decades[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1–5.
- [6] Jokiel P L, Coles S L. Response of Hawaiian and other Indo-Pacific reef corals to elevated temperature[J]. *Coral Reefs*, 1990, 8(4): 155–162.
- [7] Lesser M P, Farrell J H. Exposure to solar radiation increases damage to both host tissues and algal symbionts of corals during thermal stress[J]. *Coral Reefs*, 2004, 23(3): 367–377.
- [8] Van Hooidonk R, Maynard J, Tamelander J, et al. Local-scale projections of coral reef futures and implications of the Paris Agreement[J].

- [Scientific Reports](#), 2016, 6(1): 1–8.
- [9] Zhang Qiaomin, Shi Qi, Chen Gang, et al. Status monitoring and health assessment of Luhuitou fringing reef of Sanya, Hainan, China[J]. [Chinese Science Bulletin](#), 2006, 51(S2): 81–88.
- [10] 王丽荣, 余克服, 赵焕庭, 等. 南海珊瑚礁经济价值评估[J]. [热带地理](#), 2014, 34(1): 44–49.
Wang Lirong, Yu Kefu, Zhao Huanting, et al. Economic valuation of the coral reefs in South China Sea[J]. [Tropical Geography](#), 2014, 34(1): 44–49.
- [11] Chen Xiaoyan, Yu Kefu, Huang Xueyong, et al. Atmospheric nitrogen deposition increases the possibility of macroalgal dominance on remote coral reefs[J]. [Journal of Geophysical Research: Biogeosciences](#), 2019, 124(5): 1355–1369.
- [12] Zhao Meixia, Yu Kefu, Shi Qi, et al. Coral communities of the remote atoll reefs in the Nansha Islands, southern South China Sea[J]. [Environmental Monitoring and Assessment](#), 2013, 185(9): 7381–7392.
- [13] 吴钟解, 王道儒, 涂志刚, 等. 西沙生态监控区造礁石珊瑚退化原因分析[J]. [海洋学报](#), 2011, 33(4): 140–146.
Wu Zhongjie, Wang Daoru, Tu Zhigang, et al. The analysis on the reason of hermatypic coral degradation in Xisha[J]. [Haiyang Xuebao](#), 2011, 33(4): 140–146.
- [14] Zuo Xiuling, Su Fenzhen, Wu Wenzhou, et al. Spatial and temporal variability of thermal stress to China's coral reefs in South China Sea[J]. [Chinese Geographical Science](#), 2015, 25(2): 159–173.
- [15] Wang Chunzai, Wang Weiqiang, Wang Dongxiao, et al. Interannual variability of the South China Sea associated with El Niño[J]. [Journal of Geophysical Research: Oceans](#), 2006, 111: C3023.
- [16] Klein S A, Soden B J, Lau N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge[J]. [Journal of climate](#), 1999, 12(4): 917–932.
- [17] Qu Tangdong, Kim Y Y, Yaremchuk M, et al. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea?[J]. [Journal of Climate](#), 2004, 17(18): 3644–3657.
- [18] Hughes T P, Kerry J T, Álvarez-Noriega M, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. [Nature](#), 2017, 543(7645): 373–377.
- [19] Yamano H, Tamura M. Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing: Simulation and data analysis[J]. [Remote Sensing of Environment](#), 2004, 90(1): 86–103.
- [20] 孙旋, 蔡玉林, 索琳琳, 等. 基于SST的珊瑚礁白化监测技术综述[J]. [国土资源遥感](#), 2018, 30(2): 21–28.
Sun Xuan, Cai Yulin, Suo Linlin, et al. Review of coral reef bleaching monitoring technology based on SST[J]. [Remote Sensing for Natural Resources](#), 2018, 30(2): 21–28.
- [21] 黄荣永, 余克服, 王英辉, 等. 珊瑚礁遥感研究进展[J]. [遥感学报](#), 2019, 23(6): 1091–1112.
Huang Rongyong, Yu Kefu, Wang Yinghui, et al. Progress of the study on coral reef remote sensing[J]. [National Remote Sensing Bulletin](#), 2019, 23(6): 1091–1112.
- [22] Skirving W J, Heron S F, Marsh B L, et al. The relentless march of mass coral bleaching: a global perspective of changing heat stress[J]. [Coral Reefs](#), 2019, 38(4): 547–557.
- [23] Skirving W, Marsh B, De La Cour J, et al. Coral temp and the coral reef watch coral bleaching heat stress product suite version 3.1[J]. [Remote Sensing](#), 2020, 12(23): 3856.
- [24] Mcclanahan T R, Maina J M, Darling E S, et al. Large geographic variability in the resistance of corals to thermal stress[J]. [Global Ecology and Biogeography](#), 2020, 29(12): 2229–2247.
- [25] Van Woesik R, Houk P, Isechal A L, et al. Climate-change refugia in the sheltered bays of Palau: analogs of future reefs[J]. [Ecology and evolution](#), 2012, 2(10): 2474–2484.
- [26] Bleuel J, Pennino M G, Longo G O. Coral distribution and bleaching vulnerability areas in southwestern Atlantic under ocean warming[J]. [Scientific Reports](#), 2021, 11(1): 1–12.
- [27] Carballo-Bolaños R, Soto D, Chen C A. Thermal stress and resilience of corals in a climate-changing world[J]. [Journal of Marine Science and Engineering](#), 2020, 8(1): 15.
- [28] França FM, Benkwitt C E, Peralta G, et al. Climatic and local stressor interactions threaten tropical forests and coral reefs[J]. [Philosophical Transactions of the Royal Society](#), 2020, 375(1794): 20190116.
- [29] Lowe R J, Falter J L. Oceanic forcing of coral reefs[J]. [Annual Review of Marine Science](#), 2015, 7(1): 43–66.
- [30] Liu Gang, Heron S F, Eakin C M, et al. NOAA coral reef watch's next-generation 5 km satellite coral bleaching thermal stress monitoring[J]. [News Journal of the International Society for Reef Studies](#), 2014, 29: 27–29.
- [31] Brown B. E. Coral bleaching: causes and consequences[J]. [Coral Reefs](#), 1997, 16: S129–S138.
- [32] Goreau T, Mcclanahan T, Hayes R, et al. Conservation of coral reefs after the 1998 global bleaching event[J]. [Conservation Biology](#), 2000, 14(1): 5–15.
- [33] Liu Gang, Strong A E, Skirving W. Remote sensing of sea surface temperatures during 2002 barrier reef coral bleaching[J]. [Eos, Transactions American Geophysical Union](#), 2003, 84(15): 137–141.
- [34] Liu Gang, Heron S, Eakin C, et al. Reef-scale thermal stress monitoring of coral ecosystems: New 5-km global products from NOAA coral reef watch[J]. [Remote Sensing](#), 2014, 6(11): 11579–11606.

- [35] Wellington G M, Glynn P W, Strong A E, et al. Crisis on coral reefs linked to climate change[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2001, 82(1): 1–5.
- [36] Eakin C M, Lough J M, Heron S F. *Climate Variability and Change: Monitoring Data and Evidence for Increased Coral Bleaching Stress*[M]. Coral Bleaching, Berlin: Springer, 2009, 41–67.
- [37] Heron S F, Maynard J A, Van Hoodonk R, et al. Warming trends and bleaching stress of the world's coral reefs 1985–2012[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1–14.
- [38] 曹志浩. 数值线性代数[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
Cao Zhihao. *Numerical Linear Algebra*[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996.
- [39] Muñoz-Castillo A I, Rivera-Sosa A, Chollett I, et al. Three decades of heat stress exposure in Caribbean coral reefs: a new regional delimitation to enhance conservation[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1–14.
- [40] Caliński T, Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis[J]. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 1974, 3(1): 1–27.
- [41] Wang Dongxiao, Liu Qinyan, Huang Ruixin, et al. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product[J]. *Geophysical research letters*, 2006, 33(14): L14605.
- [42] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, 28(2): 126–135.
- [43] 祁威, 丁明虎, 杜志恒, 等. 过去2000年北极地区气候变化特征及其对AMO的响应[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(3): 691–701.
Qi Wei, Ding Minghu, Du Zhiheng, et al. Climate variability in the Arctic region over the Common Era and its response to AMO[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(3): 691–701.
- [44] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(5/6): 561–566.
- [45] 张禹舜, 贾文雄, 刘亚荣, 等. 近11 a来祁连山净初级生产力对气候因子的响应[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(1): 77–85.
Zhang Yushun, Jia Wenxiong, Liu Yarong, et al. Response of net primary productivity to climatic factors in Qilian Mountains in recent eleven years[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(1): 77–85.
- [46] Arora M, Chaudhury N R, Gujrati A, et al. Bleaching stress on Indian coral reef regions during mass coral bleaching years using NOAA OISST data[J]. *Current Science*, 2019, 117(2): 242–250.
- [47] Qin Zhenjun, Yu Kefu, Wang Yinghui, et al. Spatial and intergeneric variation in physiological indicators of corals in the South China Sea: insights into their current state and their adaptability to environmental stress[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(5): 3317–3332.
- [48] 左秀玲, 苏奋振, 张宇, 等. 全球气候变化下南海诸岛保护优先区识别分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 647–661.
Zuo Xiuling, Su Fenzhen, Zhang Yu, et al. Identifying priority conservation areas for South China Sea islands under the global climate change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 647–661.
- [49] 贾丹丹, 陈正华, 张威, 等. 南海珊瑚礁区34年卫星遥感海表温度变化的时空特征分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(3): 112–120.
Jia Dandan, Chen Zhenghua, Zhang Wei, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of sea surface temperature variabilities over the past 34 years in coral reef areas of the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(3): 112–120.
- [50] Chen Tianran, Yu Kefu, Shi Qi, et al. Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay (northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(12): 2107–2117.
- [51] Liu Yu, Cai Wenju, Sun Changfeng, et al. Anthropogenic aerosols cause recent pronounced weakening of Asian summer monsoon relative to last four centuries[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(10): 5469–5479.
- [52] Yu Yi, Zhang Haoran, Jin Jiangbo, et al. Trends of sea surface temperature and sea surface temperature fronts in the South China Sea during 2003–2017[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(4): 106–115.
- [53] Cai Wenju, Wang Guojian, Dewitte Boris, et al. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming[J]. *Nature*, 2018, 564(7735): 201–206.
- [54] 李元超, 陈石泉, 郑新庆, 等. 永兴岛及七连屿造礁石珊瑚近10年变化分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(8): 97–109.
Li Yuanchao, Chen Shiquan, Zheng Xinqing, et al. Analysis of the change of hermatypic corals in Yongxing Island and Qilianyu Island in nearly a decade[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(8): 97–109.
- [55] 张振冬, 邵魁双, 杨正先, 等. 西沙珊瑚礁生态承载状况评价研究[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(4): 487–492.
Zhang Zhendong, Shao Kuishuang, Yang Zhengxian, et al. Evaluation of the Xisha coral reef ecosystem carrying capacity[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(4): 487–492.
- [56] Barnes B B, Hallock P, Hu Chuanmin, et al. Prediction of coral bleaching in the Florida Keys using remotely sensed data[J]. *Coral Reefs*, 2015, 34(2): 491–503.
- [57] Hedley J D, Roelfsema C M, Chollett I, et al. Remote sensing of coral reefs for monitoring and management: A review[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 118.
- [58] Tkachenko K S, Soong K. Dongsha Atoll: A potential thermal refuge for reef-building corals in the South China Sea[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 127: 112–125.
- [59] Wang Yuhuai, Dai Changfeng, Chen Yangyih. Physical and ecological processes of internal waves on an isolated reef ecosystem in the South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): L18609.

[60] 龚道溢, 何学兆. 西太平洋副热带高压的年代际变化及其气候影响[J]. *地理学报*, 2002, 57(2): 185–193.

Gong Daoyi, He Xuezhao. Interdecadal change in western Pacific subtropical high and climatic effects[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 185–193.

Spatio-temporal variations of heat stress in coral reef regions over the South China Sea islands from 1985 to 2019

Lu Yongqiang^{1,2,3}, Chen Zhenghua^{1,2,3}, Yu Kefu^{1,2,3}, He Xin^{1,2,3}, Zhang Wei^{1,2,3}, Lan Sixiang^{1,2,3}

(1. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Coral Reef Research Center of China, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Increasing heat stress due to global warming is the main threat to coral reef regions over the South China Sea islands. Coral reefs bleaching events are most often predicted by heat stress, which will benefit the protection and management coral reefs. Degree heating week (DHW) is used to measure the intensity and duration of heat stress experienced on coral reefs, represents the accumulation of positive sea surface temperature (SST) anomaly at that location over the past 12 week periods. This study utilizes the National Oceanic and Atmospheric Administration-Coral Reef Watch (NOAA-CRW) SST dataset to investigate spatio-temporal in the heat stress of the coral reef regions of the South China Sea islands between 1985 to 2019 and its relevance to El Niño. *K*-means cluster analysis was performed on the 35-year maximum degree heating week values per pixel, and the coral reefs of the South China Sea islands were divided into 6 regions: Nansha-1, Nansha-2, Nansha-3, Dongsha, Xisha and Zhongsha coral reef region. The main results are as following: (1) The maximum DHW of the coral reef regions of the South China Sea islands is 0–12.9°C-week, and it decreases from high to low in latitude. (2) The linear fitting method was used to analyze the annual maximum DHW from 1985 to 2019. The results showed that the thermal pressure intensity in the coral reef area of the South China Sea islands showed an upward trend, ranging from 0.013°C to 0.174°C per week. The maximum DHW in the coral reef area of the South China Sea islands appeared in 1998, 2010, 2014. (3) The maximum annual DHW might have caused 93.9% of coral reefs to have more than one bleaching risk event, and 19.6% of coral reefs to have at least one risk of death. (4) The cross-wavelet analysis of monthly mean DHW in the coral reef regions of the South China Sea islands and Oceanic Niño index shows that there are time-frequency characteristics and time-lag correlation of multi-period 8–32 months resonance period, which confirms that the thermal pressure of coral reefs in the South China Sea islands increases significantly with the occurrence of El Niño events. The time lag correlation analysis shows that Oceanic Niño index is positively correlated with the thermal pressure in the coral reef regions of the South China Sea islands, and the latter lags behind the former by 7–9 months.

Key words: coral bleaching; degree heating weeks; heat stress; El Niño; South China Sea