

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, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.03.011

Jia Dandan, Chen Zhenghua, Zhang Wei, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of sea surface temperature variations over the past 34 years in coral reef areas of the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(3): 112–120, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.03.011

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

贾丹丹^{1,2,3}, 陈正华^{2,3*}, 张威^{2,3}, 余克服^{2,3}, 王纪坤¹, 马小雨¹, 许华⁴

(1. 广西大学 环境学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 珊瑚礁研究中心, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 海洋学院, 广西 南宁 530004; 4. 中国科学院遥感与数字地球研究所 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101)

摘要: 选取 NOAA OISST 数据集的 1982–2015 年南海月平均海洋表面温度(SST), 先对东沙、西沙和南沙礁区海域的多年 SST 进行时间尺度上的统计, 然后对该数据集进行距平场的经验正交函数(EOF)分解, 研究南海海表温度的时间和空间年际变化特征。研究显示:(1)不同的礁区海域 SST 升温趋势不同, 东沙礁区海域 SST 升温趋势最明显($0.216^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$), 西沙和南沙礁区 SST 的升温趋势分别为 $0.180^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 和 $0.096^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$; (2)西沙和南沙礁区全年处于珊瑚生长的最适海温范围内, 东沙一年中有 4 个月海温较低, SST 最高的月份分别集中在 7 月(东沙礁区)、6 月(西沙礁区)和 5 月(南沙礁区); (3)EOF 第一模态的空间分布显示南海 SST 变化是同相位的, 由西北—东南振幅量值递减, 在礁区振幅从大到小依次为东沙、西沙、南沙; (4)EOF 第一模态时间系数显示南海 SST 变化与 El Niño 事件相关。南海海表温度异常场与 Niño3.4 指数的相关性分析显示两者关联度最高为 0.723, 平均关联度也高达 0.655; 南海 SST 的变化滞后 Niño3.4 区 7~8 个月。综上, 在全球变暖背景下, 南海 SST 的变化不仅受到 El Niño 事件的影响, 其不断上升也在悄然威胁珊瑚的正常生长。

关键词: 南海; 海表温度; 珊瑚礁区; 经验正交函数; 厄尔尼诺

中图分类号: P731.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)03-0112-09

1 引言

海洋表面温度(sea surface temperature, SST)是研究海面水汽和热量交换的一个重要物理参数, 是影响造礁珊瑚的生长和分布的关键环境因子^[1–3]。南海位于印度洋与太平洋的结合位置, 是珊瑚礁面积十分丰富的海域。据王丽荣等^[4]统计, 南海的珊瑚礁总面积约 $37\,935\text{ km}^2$, 占世界珊瑚礁面积的 5%, 主要分

布在西沙群岛、东沙群岛、中沙群岛、南沙群岛、海南岛、台湾岛和华南大陆沿岸等地。相较于近岸分布的少量珊瑚岸礁, 南海诸岛珊瑚礁主要是环礁^[5], 珊瑚种类多样, 具有极高的经济价值和不可估量的生态价值。

南海受厄尔尼诺(El Niño)的影响很大, El Niño 事件会引起南海 SST 的异常升高^[6]。研究发现, El Niño 引起的海面温度异常(sea surface temperature a-

收稿日期: 2017-03-23; 修订日期: 2017-06-30。

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956102)。

作者简介: 贾丹丹(1992—), 女, 河北省河间市人, 主要从事遥感海洋表面温度的研究。E-mail: 15078809465@163.com

* 通信作者: 陈正华, 副教授, 主要从事海洋及海岸带的生态和环境研究。E-mail: chen.zhenghua@163.com

nomaly, SSTA) 升高是导致大面积珊瑚礁白化的一个最主要原因^[7-10]。Yu 等^[11]对南沙群岛的死亡大块状珊瑚进行高精度测年,结果表明珊瑚死亡的年份基本与历史上已知的 El Niño 高温年对应。蔡榕硕等^[12]应用 HadISST 数据集对 1950—2006 年间的 SST 进行时空分析,表明南海中部海区 SSTA 的变化最显著,南海多年平均 SST 升高 0.92℃;钮智旺^[13]分析南海西沙海洋站 1961—1987 年的表层水温月平均资料表明,El Niño 期间,南海 SST 升温明显,且滞后于秘鲁外海 2~8 个月;何有海和关翠华^[14]证明 El Niño 年南海上层热含量的年际变化与赤道东太平洋海温变化趋势相同,但延迟半年左右。陈海英等^[15]应用 OISST 数据集对 1981—2004 年的南海 SSTA 与 Niño3.4 指数进行时滞相关分析,当前者平均滞后于后者 6.67 个月时,二者相关系数最大。虽然前人已经有很多南海 SST 的研究工作,但是专门针对珊瑚礁区 SST 的时空变化研究鲜见。

本文立足于应用遥感同化数据研究南海海域 SST 的异常变化,首先分析其时空变化以及对 El Niño 的响应,进一步结合相关文献探讨南海珊瑚礁区 SST 的变化及其对珊瑚生长发育的影响,旨在为南海的环境变化和珊瑚礁生态系统的保护提供 SST 变化的时空背景。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

赵焕庭等^[16]统计南海东沙、西沙、南沙珊瑚礁面积约为 28 312.4 km²。其中,东沙群岛干出礁面积为 417 km²,是南海诸岛中最靠近大陆的群岛^[17];西沙群岛干出礁面积 1 836.4 km²,是典型的大洋型珊瑚礁^[18];南沙群岛水深 200 m 以上含干出礁面积为 26 059 km²,位于赤道地区,是典型的热带珊瑚礁群岛^[19]。本文研究海域位于 2.5°~24.5°N, 99.5°~124.5°E。根据南海珊瑚礁的分布特点,在其中选取东沙群岛、西沙群岛和南沙群岛及其周围海域作为珊瑚礁区的代表海域,研究区域内的 SST 时空变化情况。选取范围如图 1 所示。

2.2 研究数据

SST 资料主要来自美国国家海洋和大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的最优插值(Optimum Interpolation, OI)月平均海洋表面温度产品,即 OISST V2。这一数据集是 NOAA/AVHRR 多通道 SST 产品的最优化插值的结果,并经

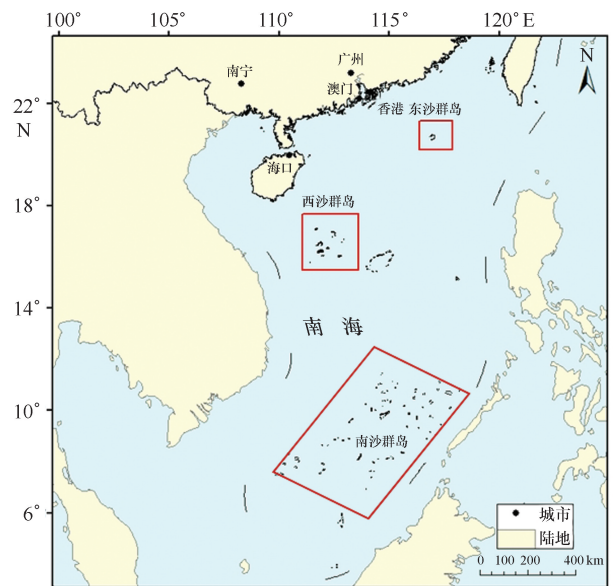


图1 南海及珊瑚礁区地理位置

Fig.1 The study area of the South China Sea and coral reef islands

过了浮标、船舶等观测数据的校正,再结合数值模拟资料综合所得。该数据集为全球格点资料,空间分辨率为 1°×1°。研究的时间跨度为 1982 年 1 月至 2015 年 12 月,共 34 年。珊瑚白化资料来源于相关文献和 NO-AA Coral Reef Watch(<https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/ge/index.php>)。Niño3.4 指数来源于 NCEP (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)。

2.3 研究过程与方法

2.3.1 珊瑚礁区 SST 分析过程

针对东沙、西沙和南沙珊瑚礁区 3 个重点研究区域,采用 MATLAB 软件提取 3 个礁区 34 年的月平均 SST,进行统计分析。首先归纳 SST 年变程,然后统计每年的 SST 最高月和最低月的温度值,探讨 34 年来的变化情况,并结合相关文献分析其对珊瑚生长的影响。

2.3.2 南海 SST 分析过程

针对整个研究海域,本文主要利用经验正交函数分解法(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析南海 SSTA 场的时间和空间变化特征,进一步计算关联度来分析南海 SST 与 El Niño 事件的相关性,最后采用时滞相关分析法得到南海 SSTA 场与 Niño3.4 指数的滞后时间。

2.3.3 EOF 分析方法

EOF 分析是一种分析矩阵数据中的结构特征和

提取主要数据特征量的方法。20 世纪 50 年代, Lorenz^[20]首次将其引入气象和气候研究,目前在海洋科学的研究中应用广泛。首先对南海 SST 月平均场求距平,借助 MATLAB 软件编程做 EOF 分析,得到 SSTA 场模态方差贡献率,作为选取分析模态的依据,再进行 North 准则检验获取有效模态^[21-22]。

3 结果与讨论

3.1 南海珊瑚礁区的 SST 月平均变化规律

造礁珊瑚的最适生长海温范围是 25 ~ 30℃^[23-24],珊瑚钙化的最佳温度约为 27℃^[25-27]。本文统计 1982—2015 年的月平均 SST 发现,东沙、西沙

和南沙群岛珊瑚礁区的海温变化范围为 22.02 ~ 30.88℃,基本适合造礁珊瑚生长,如图 2 所示,总体来说,西沙和南沙礁区全年处于珊瑚生长的最适海温范围内,东沙礁区一年中有 4 个月海温较低。SST 最高的月份分别集中在 7 月(东沙礁区)、6 月(西沙礁区)和 5 月(南沙礁区)。34 年来月平均 SST 升高趋势分别为 0.216℃/(10 a)(东沙礁区)、0.180℃/(10 a)(西沙礁区)、0.096℃/(10 a)(南沙礁区)。其中,东沙礁区周围 SST 升温最明显,西沙礁区次之,南沙礁区最小,反映出在全球变暖背景下纬度越高升温越明显。南沙礁区 SST 在 5 月的 34 年平均为 29.79℃,十分接近 30℃。

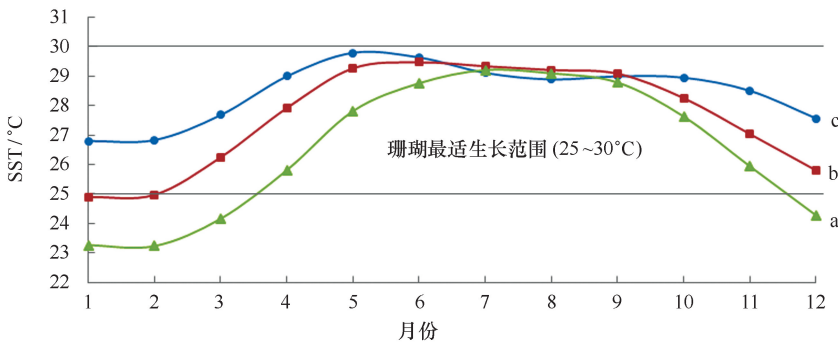


图 2 东沙、西沙、南沙珊瑚礁区多年月平均 SST 年变程

Fig.2 The annual variabilities of monthly mean SST at coral reef areas of Dongsha, Xisha and Nansha Islands

a. 东沙礁区; b. 西沙礁区; c. 南沙礁区

a.Dongsha Islands; b.Xisha Islands; c.Nansha Islands

3.2 珊瑚礁区 SST 年际变化规律

3.2.1 南海珊瑚礁区年最低 SST 变化特征

东沙礁区海域 SST 最低多出现在 2 月,1 月次之;西沙礁区海域则多出现在 1 月,2 月次之;南沙礁区海域 SST 最低出现在 1 月和 2 月的概率几乎各占一半。如图 3 所示,3 个礁区海域年月平均最低 SST 都有轻微上升的趋势,且波动规律大体一致。东沙海域 SST 最低,西沙海域 SST 稍高,两者相差大约 1.0 ~ 2.2℃;南沙海域最低 SST 又比西沙海域高 1.5 ~ 2.3℃。南沙海域 34 年最低 SST 均值为 26.63℃,适合珊瑚生长。西沙和东沙海域 34 年最低 SST 均值分别为 24.77℃和 23.10℃,也基本满足珊瑚的生长需求。

3.2.2 南海珊瑚礁区年最高 SST 变化特征

东沙礁区海域 SST 最高多出现在 6 月、7 月和 8 月;西沙礁区海域则多出现在 5 月、6 月和 7 月;南沙礁区海域 SST 最高多出现在 5 月和 6 月。如图 4 所

示,年月平均最高 SST 基本上保持着从高到低依次为南沙、西沙、东沙的格局,3 个礁区的升降较复杂,整体上呈震荡上升趋势。东沙礁区年内最高 SST 升高最剧烈,升温速率约为 0.249℃/(10 a)。南沙礁区在 2007—2015 年出现波动剧烈。

由于珊瑚生长的海域环境和珊瑚种属的多样,珊瑚白化的温度上限至今没有统一的标准。根据 Lough^[28]的研究,1997—1998 年白化事件中,全球 47 个珊瑚白化地点的最高月平均 SST 均值为 30.3℃,变化范围为 28.4 (Abrolhos) ~ 34.9℃ (Babrian)。Shuail 等^[29]在 2012 年阿拉伯/波斯湾海峡发生的白化事件中计算了 3 个礁区白化的 SST 阈值(34.48℃, 34.55℃, 35.05℃),发现三者之间差异约 0.5℃。图 4 中南沙礁区 2007 年、2009 年、2014 年的月平均最高 SST 均高于 1998 年,也就意味着在南沙礁区暴发 1998 年类似的大规模白化事件可能性将变大。其中,2007 年的南沙群岛渚碧礁和美济礁珊瑚的生态

调查结果显示 2007 年 6—7 月南沙群岛珊瑚礁发生了白化事件^[30],永暑礁水文观测站的 SST 资料也显示 2007 年 6 月的 SST 接近 1998 年导致全球珊瑚礁大幅度退化的异常高温,但持续时间稍短。2014 年南沙珊瑚礁区的最热月 SST(30.87℃)在 34 年中最高,明显高于珊瑚的最适生长海温。ReefBase 提供的 2014 年 5 月到 8 月珊瑚白化指标热点(HotSpots)和

周热度(Degree Heating Weeks,DHW),南海整体海域均处于 Hotspots>1 并且 DHW>6 的高热胁迫水平,十分遗憾目前没有找到相关文献具体说明南海在该时间范围的白化情况,但未来可以应用大型块状珊瑚的死亡指示过去的极端高温事件^[31]的原理,深入研究。

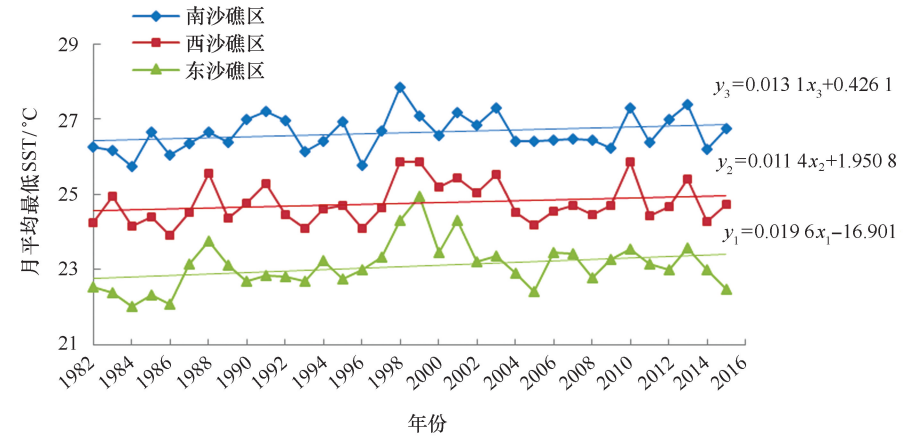


图 3 东沙、西沙、南沙珊瑚礁区海域月平均最低 SST 变化

Fig.3 The variabilities of the lowest monthly SST at coral reef areas of Dongsha, Xisha and Nansha Islands

y_1, y_2, y_3 分别为东沙、西沙、南沙礁区最低 SST 趋势线

y_1, y_2, y_3 are the trend lines of the lowest monthly SST at coral reef areas of Dongsha, Xisha and Nansha Islands

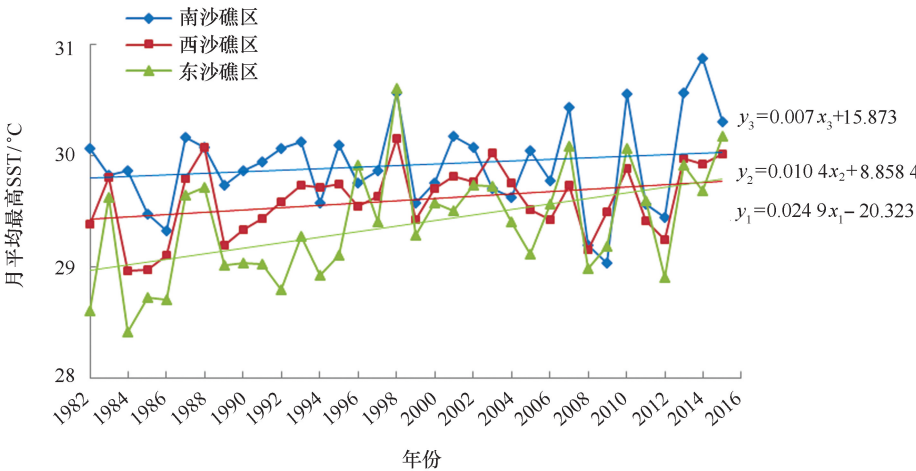


图 4 东沙、西沙、南沙珊瑚礁区海域月平均最高 SST 变化

Fig.4 The variabilities of the highest monthly SST at coral reef areas of Dongsha, Xisha and Nansha Islands

y_1, y_2, y_3 分别为东沙、西沙、南沙礁区最高 SST 趋势线

y_1, y_2, y_3 are the trend lines of the highest monthly SST at coral reef areas of Dongsha, Xisha and Nansha Islands

3.3 南海 SST 年际变化的时空分析

为了研究南海海域 SST 的时间和空间年际变化特征,对该数据集进行月距平场的经验正交函数

(EOF)分解,得到南海 SST 变化的典型空间和时间模态。表 1 为前 6 个模态的方差贡献(通过 North 准则检验),累积方差贡献率高达 83.39%,可以代表原

始场的主要特征,同时也说明影响南海 SST 变化的因素十分复杂。其中,第一个模态的方差贡献率为 48.09%,代表原始场的最主要特征,反映南海海表温

度 34 年的主要分布特征和变化趋势,所以本文仅对第一模态进行时空分布特征分析。

表 1 南海 SSTA 场前 6 个模态方差贡献率
Tab.1 Variance contribution rates of the top six modes of EOF for SSTA in the South China Sea

模态	1	2	3	4	5	6
方差贡献	48.09%	15.84%	9.09%	4.35%	3.67%	2.36%
累积方差贡献	48.09%	63.93%	73.02%	77.36%	81.04%	83.39%

3.3.1 第一模态时空分析

图 5 是第一模态的空间分布图。从图中可以看出第一模态的量值在整个海区均为正值,说明南海海区的增温、降温在此模态中是同相的。整体上,南海海域呈现由西北—东南振幅量值逐渐减低的分布,最

大正值中心位于南海西北部。如图 5 所示,西沙群岛珊瑚礁区处于 SST 振幅量值最大的海域,东沙礁区次之,南沙礁区振幅量值最小。也就是说,在整个南海背景下,第一模态空间分布显示,西沙礁区的 SS-TA 变化最剧烈。

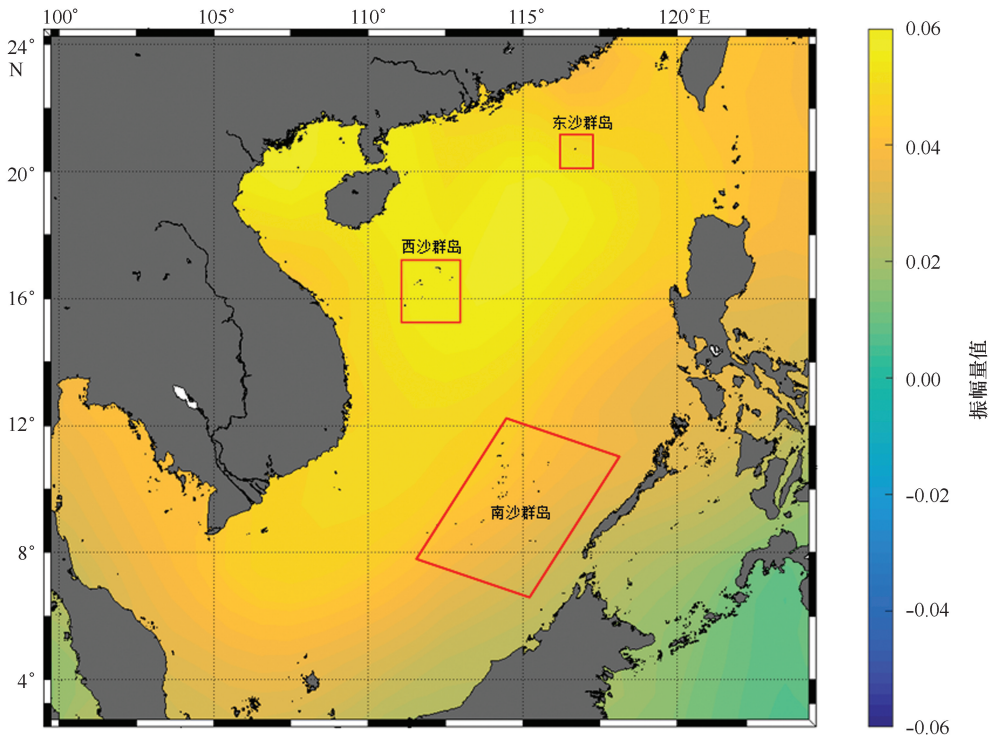


图 5 南海 SSTA 场的 EOF 分解第一模态的空间分布
Fig.5 The spatial pattern of the first mode of EOF for SSTA in the South China Sea

全球变暖的背景下,20 世纪 80 年代至今南北半球的温差减弱直接导致亚洲季风的减弱^[32],云量减少^[33],季风减弱引起海水潜热减少,云量减少导致太阳辐射增加,所以 SST 上升情况显著。另外,也可能是入海河流造成淡水和海水强烈混合,河流推着淡水

入海^[34]。以上共同作用,造成 SSTA 场的第一模态呈现由近海向外延伸振幅量值递减的现象。

图 6 为第一模态时间系数序列图。整体上,可以看出南海 SSTA 场在 34 年间有几次有明显的起伏,并且呈现出典型的年际变化,正值较大的年份主要分

布在 1987/1988 年、1998/1999 年、2001/2002 年、2003 年、2009/2010 年、2014/2016 年,并且在 2015/2016 年有明显的峰值更高的趋势。所以,南海 SST 的年际变化明显与 El Niño 事件(1982/1983、1986/1988、1997/1998、2002/2003、2006/2007、2009/2010、2012、

2014/2015)有关。图 6 中红色方框圈出较强 El Niño 年份对应的第一模态时间系数,可以看出 21 世纪以来,El Niño 发生的频率高、强度大,年际信号周期(3~7 a)^[35]越来越短,说明全球变暖将会使 El Niño 事件成为常态^[36]。

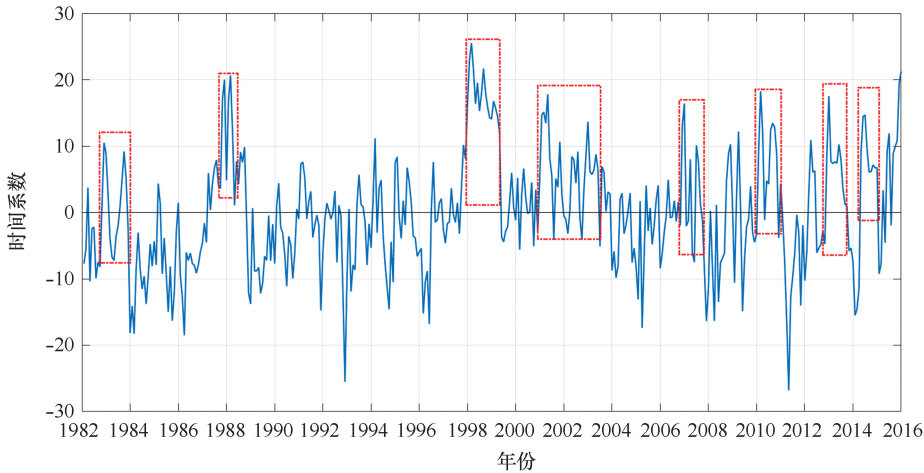


图 6 南海 SSTA 场的 EOF 分解的第一模态时间系数
Fig.6 The time coefficient of the first mode EOF for SSTA in the South China Sea

3.3.2 南海 SSTA 与 Niño3.4 指数的相关性

南海海域的年均 SST 距平明显低于 Niño3.4 区(图 7),即南海 SST 变化相对于 Niño3.4 区不仅时间滞后,强度也有大幅度下降。2014 年以后出现超强 El Niño^[37],2015 年的 Niño3.4 指数达到 34 年最高。为了得到南海 SST 的变化与 El Niño 事件之间的具体关系,采用灰色关联度法探索两者之间的相关性^[38-39],得到平均关联度 0.655,其中 1982/1983 年

关联度高达 0.723;2006/2007 年次之,也超过了 0.7(表 2)。时滞相关分析显示,当南海的 SSTA 变化滞后 Niño3.4 区 SSTA 变化 7、8 个月,相关系数分别为 69.07%和 65.28%,说明南海 SST 的变化在 El Niño 年份的滞后于 Niño3.4 区 7~8 个月,与文献[14]中的平均滞后 6.67 个月相比,滞后时间稍长。综上,说明通过 El Niño 事件可以预测南海 SST 异常变化的大致时间。

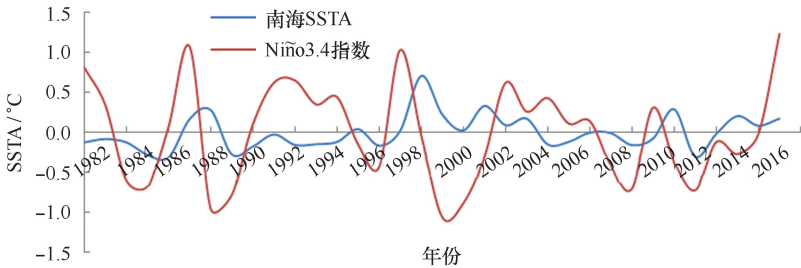


图 7 年均 Niño3.4 指数与南海年均 SSTA
Fig.7 The index of yearly average Niño3.4 and yearly South China Sea SSTA

表 2 典型 El Niño 年南海 SSTA 与 Niño3.4 指数的关联度							
Tab.2 The gray correlation of the South China Sea SSTA and the index of Niño3.4 in the typical El Niño year							
年份	1982/1983	1987/1988	1991/1992	1997/1998	2002/2003	2006/2007	2009/2010
关联度	0.723	0.648	0.660	0.598	0.675	0.702	0.629
							2014/2015
							0.605

4 结论

卫星同化数据显示东沙、西沙和南沙 3 个礁区海域连续 34 年 SST 上升的趋势,分别为 $0.216^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ (东沙礁区)、 $0.180^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ (西沙礁区)、 $0.096^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ (南沙礁区)。IPCC 第四次评估报告指出,1906—2005 年全球变暖趋势为 $0.074^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ^[40],所以 SST 的增温速率在 3 个礁区海域都高于全球温度增温率。NOAA Coral Reef Watch 在 2007 年 10 月至 2014 年 10 月的监测显示,南沙礁区海域属于白化监视和警告的级别,西沙礁区海域的周热度也在 3~9 之间,热应力较高。所以在全球变暖

背景下,SST 的不断上升再加上近年岛礁建设、远洋捕捞等人类活动的共同作用,都对南海诸岛珊瑚礁的生长发育存在潜在的不利影响。

El Niño 事件对 1982—2015 年南海 SST 的影响十分显著,尤其南海北部的 SST 时空变化情况最明显;南海 SSTA 第一模态的时间系数升高的年份与 El Niño 事件对应。另外南海 SSTA 与 Niño3.4 指数做关联度分析,得到 El Niño 年份两者关联度均大于 0.6,南海 SST 异常滞后于 El Niño 事件 7~8 个月。不同年份的 El Niño 事件对南海珊瑚礁区 SST 的影响情况有差异,1998 年对东沙海域和西沙海域影响较强,2009 年则使南沙和西沙海域 SST 升高更剧烈。

参考文献:

- [1] Veron J E N, Minchin P R. Correlations between sea surface temperature, circulation patterns and the distribution of hermatypic corals of Japan[J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(7/8): 835—857.
- [2] Lough J M, Barnes D J. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2000, 245(2): 225.
- [3] Lough J M, Cooper T F. New insights from coral growth band studies in an era of rapid environmental change[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 108(3): 170—184.
- [4] 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 Huaning, et al. Economic valuation of the coral reefs in South China Sea[J]. Tropical Geography, 2014, 34(1): 44—49.
- [5] 张乔民,余克服,施祺,等. 中国珊瑚礁分布和资源特点[C]//提高全民科学素质,建设创新型国家——2006 中国科协年会论文集(下册). 北京:中国科学技术出版社,2006.
Zhang Qiaomin, Yu Kefu, Shi Qi, et al. Distribution and resource characteristics of coral reefs in China[C]//Improve the scientific quality of the whole people, and build an innovative country-Proceedings of the China Association for Science and Technology in 2006(Volume 2). Beijing: Science Press, 2006
- [6] 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(12): 917—932.
- [7] Arceo H O, Quibilan M C, Aliño P M, et al. Coral bleaching in Philippine reefs: coincident evidences with mesoscale thermal anomalies[J]. Bulletin of Marine Science, 2001, 69(2): 579—593.
- [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 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.
- [9] Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs[J]. Marine and Freshwater Research, 1999, 50(8): 839—866.
- [10] Yu K F, Zhao J X, Liu T S, et al. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 224(1): 143—155.
- [11] Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. U-series dating of dead *Porites* corals in the South China Sea: evidence for episodic coral mortality over the past two centuries[J]. Quaternary Geochronology, 2006, 1(2): 129—141.
- [12] 蔡榕硕,张启龙,齐庆华. 南海表层水温场的时空特征与长期变化趋势[J]. 台湾海峡, 2009, 28(4): 559—568.
Cai Rongshuo, Zhang Qilong, Qi Qinghua. Spatial and temporal oscillation and long-term variation in sea surface temperature field of the South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2009, 28(4): 559—568.
- [13] 钮智旺. 南海表层水温的长周期振荡及其与厄尔尼诺的关系[J]. 海洋学报, 1994, 16(2): 43—49.
Niu Zhiwang. Relationships between long-term oscillation of surface water temperature in the South China Sea and El Niño[J]. Haiyang Xuebao, 1994, 16(2): 43—49.
- [14] 何有海,关翠华. 南海上层海洋热含量的年际和年代际变化[J]. 热带海洋, 1997, 16(1): 23—29.
He Youhai, Guan Cuihua. Interannual and interdecadal variability in heat content of the upper ocean of the South China Sea[J]. Tropic Oceanology, 1997, 16(1): 23—29.

- [15] 陈海英, 方国洪, 乔方利, 等. 南海海面温度与 Niño/DMI 指数年际变异的相关性分析[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(1): 20—27.
Chen Haiying, Fang Guohong, Qiao Fangli, et al. Correlation analysis of interannual variabilities in SST in SCS and Niño/DMI indices[J]. Advances in Marine Science, 2007, 25(1): 20—27.
- [16] 赵焕庭, 张乔民, 宋朝景, 等. 华南海岸和南海诸岛地貌与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 373—378.
Zhao Huanting, Zhang Qiaomin, Song Chaojing, et al. Geomorphology and Environment of the South China Coast and the South China Sea Islands[M]. Beijing: Science Press, 1999: 373—378.
- [17] 张华国, 毛志华, 陈建裕, 等. 东沙群岛卫星遥感[M]. 北京: 海洋出版社, 2007: 1—2.
Zhang Huaguo, Mao Zhihua, Chen Jianyu, et al. Dongsha Qundao Weixing Yaogan[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007: 1—2.
- [18] 黄晖, 董志军, 练健生. 论西沙群岛珊瑚礁生态系统自然保护区的建立[J]. 热带地理, 2008, 28(6): 540—544.
Huang Hui, Dong Zhijun, Lian Jiansheng. Establishment of nature reserve of coral reef ecosystem on the Xisha Islands[J]. Tropical Geography, 2008, 28(6): 540—544.
- [19] 赵焕庭, 温孝胜, 孙宗勋, 等. 南沙群岛珊瑚礁自然特征[J]. 海洋学报, 1996, 18(5): 61—70.
Zhao Huanting, Wen Xiaosheng, Sun Zongxun, et al. Natural characteristics of coral reefs in Nansha Islands[J]. Haiyang Xuebao, 1996, 18(5): 61—70.
- [20] Lorenz E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction[J]. Science Report, 1956, 409(2): 997—999.
- [21] 钱浩. 热带太平洋—印度洋上层热含量变异对我国旱涝的影响研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.
Qian Hao. Study on the impace of tropical Pacific-Indian Ocean upper layet heat comtent variation on drought and floof over China[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [22] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(7): 699—706.
- [23] 余克服, 蒋明星, 程志强, 等. 涠洲岛 42 年来海面温度变化及其对珊瑚礁的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 506—510.
Yu Kefu, Jiang Mingxing, Cheng Zhiqiang, et al. Latest forty two years' sea surface temperature change of Weizhou Island and its influence on coral reef ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 506—510.
- [24] Nie B F, Chen T G, Liang M T, et al. The Relationship Between Reef Coral and Environmental Changes of Nansha Islands and Adjacent Regions [M]. Beijing: Science Press, 1997: 5—28.
- [25] Marshall A T, Clode P. Calcification rate and the effect of temperature in a zooxanthellate and an azooxanthellate scleractinian reef coral[J]. Coral Reefs, 2004, 23(2): 218—224.
- [26] Cooper T F, DeAth G, Fabricius K E, et al. Declining coral calcification in massive Porites in two nearshore regions of the northern Great Barrier Reef[J]. Global Change Biology, 2008, 14(3): 529—538.
- [27] Tanzil J T I, Brown B E, Tudhope A W, et al. Decline in skeletal growth of the coral Porites lutea from the Andaman Sea, South Thailand between 1984 and 2005[J]. Coral Reefs, 2009, 28(2): 519—528.
- [28] Lough J M. 1997—98: unprecedented thermal stress to coral reefs? [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(23): 3901—3904.
- [29] Shuail D, Wiedenmann J, Dangelo C, et al. Local bleaching thresholds established by remote sensing techniques vary among reefs with deviating bleaching patterns during the 2012 event in the Arabian/Persian Gulf[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 105(2): 654—659.
- [30] 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): 756—764.
Li Shu, Yu Kefu, Chen Tianran, et al. Assessment of coral bleaching using symbiotic zooxanthellae density and satellite remote sensing data in the Nansha Islands, South China Sea[J]. Science China Bulletin, 2011, 56(10): 756—764.
- [31] Yu K F, Zhao J X, Lawrence M G, et al. Timing and duration of growth hiatuses in mid Holocene massive Porites corals from the northern South China Sea[J]. Journal of Quaternary Science, 2010, 25(8): 1284—1292.
- [32] 黄刚. 与华北干旱相关联的全球尺度气候变化现象[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 270—279.
Huang Gang. Global climate change phenomenon associated with the droughts in North China[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(3): 270—279.
- [33] 梁建茵, 杨崧. 南海西沙观测资料揭示的海温异常及海气相互作用[C]//中国气象学会 2007 年年会气候学分会论文集. 2007.
Liang Jianyin, Yang Song. SSTA and sea-air interactions revealed by Xisha Islands observations in the South China Sea[C]//Proceeding of Climate Science at Annual Meeting of Chinese Meteorological Society in 2007. 2007.
- [34] 宋德海, 于华明, 鲍献文. 东中国海及毗邻海域 SST 年际变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(S1): 21—28.
Song Dehai, Yu Huaming, Bao Xianwen. Analysis of the interannual variability of the Eastern China Seas and its adjacent seas surface tempreature [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(S1): 21—28.
- [35] Trenberth K E, Fasullo J T. Tracking earth's energy: From El Niño to global warming[J]. Surveys in Geophysics, 2012, 33(3): 413—426.
- [36] 厄尔尼诺—时代与生命.[2016—12—10]. http://www.iqiyi.com/a_19rrhbdy1x.html?fc=87451bff3f7d2f4a#vfrm=2-3-0-1.
- [37] 程泽梅, 汤超莲, 蔡兵, 等. 1960—2013 年华南沿海海洋站 SST 变化及其影响因子[J]. 热带地理, 2016, 36(6): 906—914.
Cheng Zemei, Tang Chaolian, Cai Bing, et al. Influencing factors of SST variation along the South China Coast during 1960—2013[J]. Tropical Geography, 2016, 36(6): 906—914.
- [38] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 23—25.

- Wei Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 23—25.
- [39] 邓聚龙. 灰色系统——社会,经济[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 26—29.
- Deng Julong. Grey System—Society, Economy[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985: 26—29.
- [40] Zheng C W, Zhuang H, Li X, et al. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(1): 163—173.

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

Jia Dandan^{1,2,3}, Chen Zhenghua^{2,3}, Zhang Wei^{2,3}, Yu Kefu^{2,3}, Wang Jikun¹, Ma Xiaoyu¹, Xu Hua⁴

(1. School of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Coral Reef Research Center of China, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: A monthly sea surface temperature(SST) data from 1982 to 2015 of the South China Sea(SCS) was extracted based on the NOAA OISST data set in this study. First count up the SST at the Dongsha, Xisha and Nansha reef islands on time scale. Then the empirical orthogonal function EOF method was applied to the monthly anomaly field of the data set to analyze the characteristics of the yearly spatial and temporal variabilities of the SCS SST distribution. The study showed as follows: (1) The SST warming trends were differed at different reef areas. The rising trend of SST in the Dongsha reef area was the most significant(about $0.216^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$). The following trends were $0.18^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ at Xisha reef area and $0.096^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ at Nansha reef area, respectively; (2) The SST in the Xisha and Nansha reef areas were in the optimum growth temperature of hermatypic corals in the whole year. There were about 4 months lower SST for hermatypic corals in the Dongsha reef area. The hottest month were focus on July(Dongsha), June(Xisha) and May(Nansha), respectively; (3) The first mode of EOF showed that SST over the SCS was spatially in phase and declined from northwest to southeast. That was Dongsha>Xisha>Nansha; (4) The first mode temporal distribution of EOF showed that the variation of SST in the SCS was related to the El Niño. The correlation analysis between SSTA over the SCS and the index of Niño3.4 showed that the average incidence was 0.655, and the highest correlation degree was 0.723. The SSTA over the SCS was lag of Niño3.4 about 7—8 months. In summary, under the background of global warming, the change of SST in the SCS is not only affected by the El Niño, but the continued rising is quietly threaten the growth of corals.

Key words: South China Sea; sea surface temperature; reef area; EOF; El Niño