

基于历史数据的南海海表温度百年时空变化特征分析

赵强¹, 陶京¹, 刘豪¹, 刘东^{2,3}, 范伟¹

(1.安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2.中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031; 3.皖江新兴产业技术发展中心, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 海表温度是海气相互作用最重要的因子, 它在约束空气-海洋的湿热交换中起着关键作用。本文基于线性回归、经验正交函数分解、小波分析以及多重分形去趋势波动分析方法, 研究了 1923—2022 年南海海表温度的时空变化情况。结果表明, 南海近百年来海表温度整体呈上升趋势, 但空间各处对海表升温的响应不同。经验正交函数分析表明, 第一模态呈现全海盆升温的情况。第二模态和第三模态表明, 南海海表温度呈东北-西南和西北-东南反向变化。小波分析得到南海海表温度变化为 2 年、3~4 年的周期, 并验证了其变化的趋势特性与季节特性。通过多重分形分析发现, 南海海表温度变化具有较弱的长程自相关性, 且在不同区域具有不同的多重分形性质。

关键词: 南海; 海表温度; 趋势; 周期; 多重分形

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2025)02-0304-08

Characterization of 100-year temporal and spatial variations of sea surface temperature in the South China Sea based on historical data

ZHAO Qiang¹, TAO Jing¹, LIU Hao¹, LIU Dong^{2,3}, FAN Wei¹

(1.School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2.Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3.Wan Jiang New Industry Technology Development Center, Tongling 244000, China)

Abstract: Sea surface temperature (SST) is the most important factor in ocean-atmosphere interaction, playing a crucial role in constraining the moist heat exchange between the air and the ocean. This study, based on linear regression, empirical orthogonal function (EOF) decomposition, wavelet analysis, and multifractal detrended fluctuation analysis (MFDFA), investigates the spatiotemporal variations of sea surface temperature in the South China Sea (SCS) from 1923 to 2022. The results indicate an overall increasing trend in SST over the past century, but with varying responses to the warming at different locations. EOF analysis reveals the first mode showing a basin-wide warming trend. The second and third modes indicate a northeast-southwest and northwest-southeast reversal in SST in the SCS. Wavelet analysis identifies periodicities of 2 years and 3—4 years in the SST changes, validating the trend characteristics and seasonal patterns. MFDFA suggests weak long-term autocorrelation in the SST changes, with different multifractal properties observed in different regions.

Key words: South China Sea; sea surface temperature; trends; cycles; multiple fractals

收稿日期: 2023-11-30, 修订日期: 2024-02-03

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2208085UQ01); 国家自然科学基金项目(42105076, 41005016); 安徽省高校优秀科研创新团队(2022AH010018); 安徽省气象探测装备工程技术研究中心开放基金(2023QXTC08)

作者简介: 赵强(1981—), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 主要研究方向为环境遥感与城市空间信息技术, E-mail: rommel99@163.com

通信作者: 陶京(1999—), 女, 安徽怀宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋温度遥感, E-mail: tj124857@126.com

海洋环境是地球上最复杂和多样的系统之一,其动态特性对全球气候、生态系统和人类社会都有深远的影响。其中,海表温度(sea surface temperature, SST)不仅是描述海洋表面热力状态的主要指标,也是海洋影响大气环流和气候变化的重要因素^[1]。很多文献都对南海不同时期、不同区域的海表温度变化进行了研究。首先,近百年来南海海表的变暖趋势是明确的^[2]。其次,由于SST是海洋热力、动力学过程以及海气相互作用的结果,因此南海各区域的变暖是不均匀的^[3]。气温、太阳辐射^[4]和季风系统^[5]等的变化也会通过海面风和气温差等变化直接或间接地影响南海SST的变化。最后,南海的海表温度变化有一定的时间规律,例如,其变化的年际振荡与ENSO遥相呼应^[6]。南海SST的变暖特征比较复杂,对其变暖机制目前也没有明确的结论,目前的研究多集中在ENSO对南海SST变化的影响^[7]以及南海SST变化对周边大陆与海洋异常气象的影响^[8-9],而南海SST长时间序列的时空变化特征,特别是波动特征的研究很少。在气候变化的背景下,分析海表温度长时间序列的变化特征,将有利于深入了解南海对全球变暖的响应情况,对于气候异常的监测与生态的保护也有重要意义。

为更好地理解 and 解释海表温度时空序列数据的特征,研究者们对时空序列数据采用多种信号分解方法研究不同时间和空间尺度下海表温度的变化规律。例如,李彦等^[10]对SST进行正弦拟合处理,振幅表示海温变化的剧烈程度,相位表示该区域海表温度达到峰值时的月份;Jönsson等^[11]利用移动标准差饱和度方法来分析SST时间尺度变异性的显著差异;王浩等^[12]采用功率谱和相关性分析等方法,研究了长江口邻近海域SST的时空变化特征以及影响因素等。本文针对南海海表温度100年的时空序列,利用多种时空序列分解的方法,从时间和空间角度对南海海表温度的变化特征进行分析,并探讨这些特征背后的影响因素。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文以南海为研究区域,具体位置为4°N—

24°N, 106°E—122°E。南海地形是一个菱形的半封闭盆地,被大陆和岛屿包围,主要通过台湾海峡、吕宋海峡、苏里高海峡、巴拉巴克海峡和卡里马塔海峡与邻近海域交换海水^[13]。南海纬度低,太阳辐射强,整个海域的海温较高,具有一定的热带深海水文特征。此外,南海位于全球最典型的季风区和东亚局部哈德莱环流影响区之间,靠近赤道暖池和沃克环流上升区^[14],又靠近亚洲大陆,可从众多河流中获得大量淡水。因此,南海各区域的海表温度随季节变化,且有不同的特征^[15]。

1.2 数据获取

本研究采用英国Hadley中心的海冰和海表温度数据集(HadISST1)^[16],其空间分辨率为1°×1°,时间跨度为1923年1月到2022年12月,从Hadley官网(<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/index.html>)下载获得。

1.3 研究方法

时间序列通常包括趋势、周期和随机波动上的特征。本文首先应用线性拟合查看南海SST近百年来时间和空间上的变化趋势。其次采用经验正交函数分解(empirical orthogonal function decomposition, EOF)识别南海SST变化的主要空间模态和变化趋势^[17],结合线性拟合的结果分析各个模态的主要影响因素,并应用小波分析方法提取SST时间序列及EOF得到的3种时间系数中的周期性变化及其定位特征^[18]。最后对分析得到的几个变率中心应用多重分形去趋势波动分析(multifractal detrended fluctuation analysis, MFDFA)检测SST时间序列波动的尺度结构和长程相关性^[19]。通过以上4种方法,期望构成一个完整的研究框架对南海海表温度时空序列进行分解,以深入了解南海海表温度长时间序列的多维度变化。

2 结果与讨论

2.1 南海百年SST变化趋势特征

通过100 a南海海表温度的距平数据进行线性回归,得到南海表层温度以0.10 °C/10 a的趋势升温,通过10年趋势线看(图1),从20世纪50年代到90年代南海SST升温趋势比较明显,

90年代的升温趋势达 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。2010年前的海表温度研究表明,南海在90年代有最快的变暖期^[20]。根据IPCC报告,全球海洋自1970年以来持续变暖,吸收了气候系统90%以上的多余热量,自1993年以来,海洋变暖增速1倍多^[21]。从图1中可以看出,南海海面在2000年停止变暖,甚至出现冷却趋势。在这一时期,全球海洋平均表面升温出现一个停顿。Dai等^[22]认为这个间断出现在2000—2012年,在2015—2016年结束,当时东赤道太平洋急剧变暖,形成极端的厄尔尼诺现象。2011—2016年,南海表面也出现大幅升温,但2010年的升温较80年代、90年代的趋势放缓。

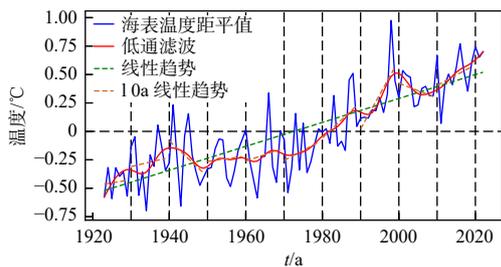


图1 南海百年海表温度变化趋势

Fig. 1 Century-long SST trends in the SCS

对南海每个数据位点的SST按月分别进行线性拟合,从其不同月海表温度变化趋势的空间分布可以得到,南海大部分区域呈不同程度的变暖,但北部湾附近的变暖趋势基本没有通过显著性检验,在夏、秋季节还出现降温趋势。此外,南海西南部越南南岸附近海域在冬、春季节也没有明显的变暖趋势,这两个地方的共同点是都位于浅水区。结合南海的月度海流图分析,这两个地区的海流也区别于其他地区。北部湾纬度较高,海温变化剧烈,且与其周围洋流沟通较少,而越南南部海岸的SST受到其他大陆架冷水的影响,导致这两个地区的升温趋势不明显。此外,在中国广东沿海可以看到较低的变暖趋势,珠江冲淡水在夏季同时向粤西和粤东两侧扩展,冲淡水扩展范围最大^[23],部分羽流可以到达台湾海峡,推测其为珠江冲淡水流向南海所致。

此外,南海北部台湾岛附近海域的变暖趋势具有明显的季节性特征。冬季升温趋势最强,随季节的更替,强烈升温区域变小,夏、秋两季的

升温趋势与海盆中心的升温趋势接近。研究表明,这与台湾海峡的流动系统有关^[24]。台湾海峡由3个流系组成:黑潮暖流、大陆沿岸流和南海暖流。在夏季由于反向季风的作用,几乎没有黑潮水流入台湾海峡,而来自南海的季风漂流向北流经整个台湾海峡^[25]。随着东北季风场在台湾海峡的建立,一部分黑潮在11月开始侵入台湾海峡南部。在冬季,几乎没有南海洋流向北进入台湾海峡,同时,黑潮是以反气旋环流的形式到达台湾海峡南部,其有一个分支可以向北侵入台湾海峡^[26]。而黑潮冬、春季强,秋季弱^[27],所以黑潮入侵的特点很好地解释了台湾海峡表层海温变化的季节性特征。

2.2 南海百年SST变化主空间分布模态及时间序列振幅

在EOF分解中,特征值按其解释的方差百分比排序,可以直接识别数据集中的主要变化模式^[17]。在本研究中,首先对SST数据集去除其各自的气候学平均值,其次进行EOF分析,得到南海SST变化的典型空间分布模态以及对应的时间变化特征(图2)。由于前三种模态都有统计学意义,因此可以用其解释南海的SST变化。

第一模态的方差贡献率为71.19%,表明该模式是SST变化的最主要形式。第一空间模态显示SST的变率均为正值,说明南海SST变化的分布具有良好的一致性。SST变化的正中心主要位于南海中部的深海盆地,并沿东北和西南方向呈舌状延伸。SST的变率从海盆中心向近岸逐渐减弱,在北部湾达到最弱。结合时间系数PC1可以看出,南海SST变化的第一空间模态是正向发展趋势,说明南海主要变化形式是全海盆尺度的升温。

第二模态的方差贡献率为7.96%。第二空间模态表明海表温度变率的负值主要出现在台湾岛附近海域,而正值主要出现在越南南部海域。由于降温中心和升温中心分别位于南海的东北部和西南部,刘雪等^[28]认为该模式为跷跷板模式。由于第二模态的时间系数趋势为负,表明第二模式的海表温度变率有较多的反向变化,即南海西南部海表温度按照第二模态变化的趋势降低,而东北部海域SST增加。该模态与南海

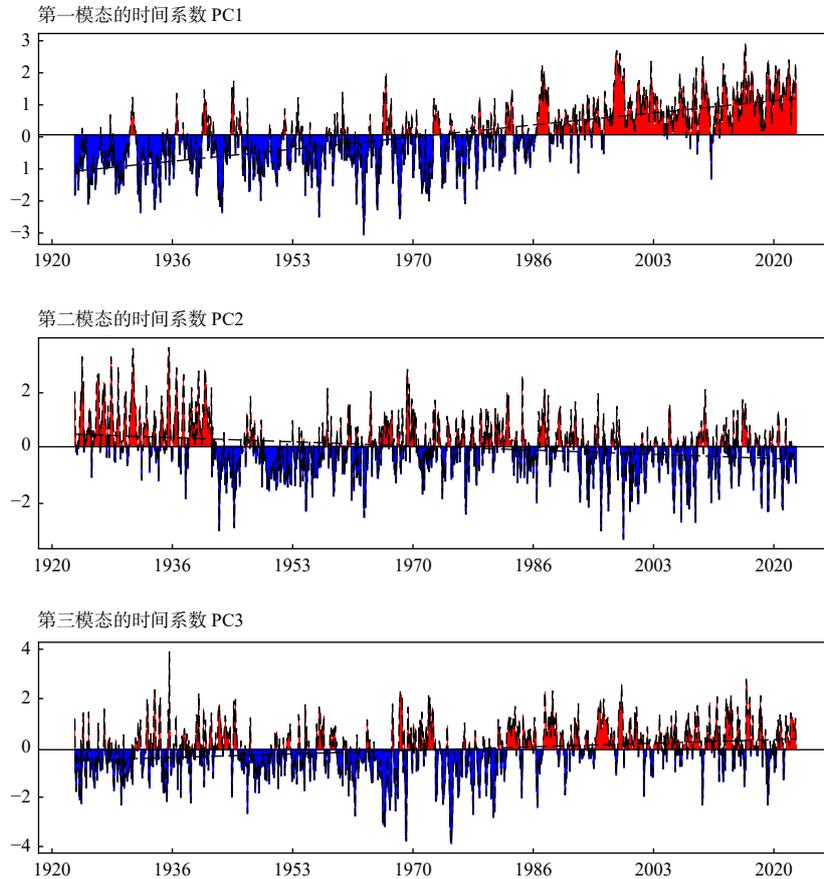


图 2 南海 SST EOF 分析时间系数变化图

Fig. 2 Plot of three time coefficients for the EOF decomposition of SCS SST

冬春季 SST 变化趋势的分布相似。南海在冬季盛行的东北风比夏季盛行的西南风强很多,而东北季风从大陆带来大量的干冷空气,南海东北部水深较浅,受大陆冷空气作用更加明显^[28]。有研究表明,太平洋西部反气旋的中心在冬季厄尔尼诺成熟的时候会向东传播并到达菲律宾海,导致异常反气旋的西南部主导南海,它在南海上空提供了异常的西南风应力,从而显著减弱了气候上的东北风,并且其减弱作用在南海北部比南部更显著, Liu 等^[29]认为这种异常的大气环流导致了同时期潜热通量异常的南北偶极子格局。

第三模态的方差贡献率为 6.9%。第三模态描述了整个海域呈西北-东南方向梯度变化的分布,海表温度变化的负值主要出现在海南岛,正值主要出现在吕宋岛周边海域和苏禄海区,并且时间系数 PC3 趋势为正,表明该特征在第三模态的形式下正向发展。该分布与夏、秋季南海 SST 变化趋势分布类似。7—10 月是热带气旋盛

行的时期,热带气旋分别在南海西北部和东南部产生正、负风应力旋度,导致西北部和东南部分别出现上升流和沉降流^[30]。有研究指出,热带气旋在夏季使得南海除东南区域外的混合层加深,同时使夏季南海混合层温度降低 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[31]。因此,第三种模态可以认为与南海夏季的热带气旋关系密切。

2.3 南海百年 SST 变化周期特征

首先,从原始的时间序列中去除年内季节性变化的周期和线性趋势,以消除较长周期的相干性的影响,然后对季节性序列进行小波变换,得到近百年来南海 SST 序列的小波功率谱图 3a 和全局功率谱图 3b。小波功率谱可以用来定位 SST 序列演变过程中存在的主周期,从图 3a 中等高线所包围的区域可以看出明显的周期尺度和对应的年份。20 世纪 90 年代之前存在明显小于 1 年、2 年和 3~4 年周期,在 90 年代之后, SST 的各种周期变化特征变得不再明显。图 3b

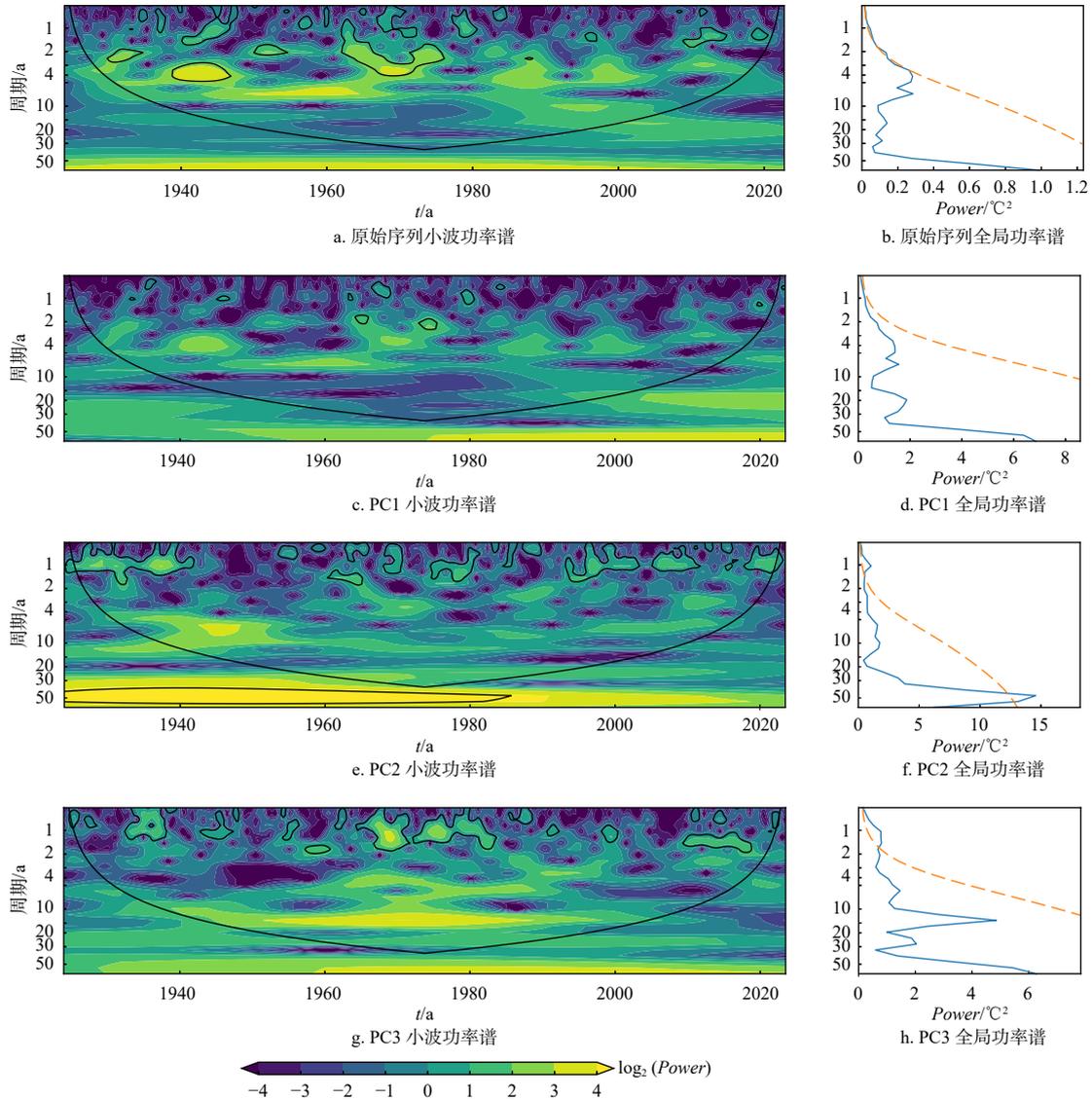


图 3 南海 SST 原始序列及 EOF 分解三种时间系数小波分解图

Fig. 3 Wavelet decomposition of the original SCS SST sequence and three time coefficients of the EOF decomposition

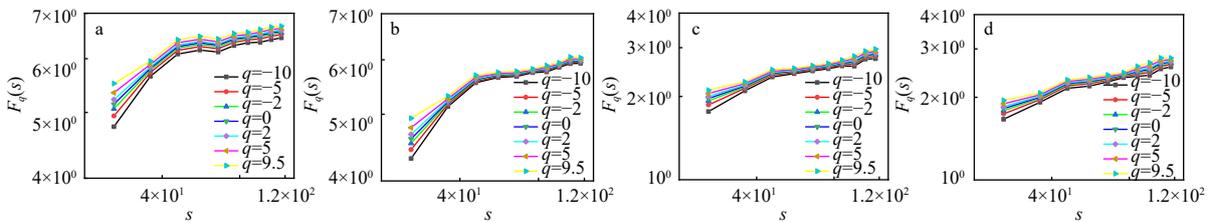


图 4 南海 SST 序列的时间尺度 s 与波动函数 $F_q(s)$ 的双对数

Fig. 4 Log-Log plot of the time scale s versus the fluctuation function $F_q(s)$ for the SCS SST series

是小波功率谱显著性检验的小波全谱。红色噪声线下峰值最高的周期是最主要的周期，而红线外的峰值未通过显著性检验而被忽略。图 3b 显示，近百年来 SST 变化最突出的周期是 3~4

年，其次是 2 年，这一结论与王卫强等的研究^[32]一致。

其次，由 2.2 节可知，对南海 SST 变化主要模态的时间系数进行小波分析可以得到各模态

变化的周期,通过比较其他因素的变化周期可以进一步推测各模态形成的影响因素。表现南海 SST 变化普遍状态的第一模态,其时间系数表现了很强的趋势性,从图 3c 和图 3d 中可以看出,PC1 的周期性并不明显。PC2 表现出明显的 1 年周期和 50 年周期,根据李娟等的研究^[1],在影响海洋温度的因素中,南海 SST 距平与具有准 50 年周期的太平洋年代际振荡存在明显的正相位相关关系。PC3 表现出频繁的 1 年周期变化特征,此外,从图 3 中可以看出 PC3 有不太显著的 11 年周期,11 年太阳周期对 ENSO 年代际变化的贡献已被广泛讨论^[33]。而太阳活动与南海夏季风建立日期以及热带气旋的发生之间也存在调制作用^[34-35],热带气旋与夏季风之间关系紧密^[36]。结合空间模态的分析结果,南海 SST 的变化可能是对太平洋海温变化的响应,通过大气和环流的影响使南海 SST 变化产生季节特性。

2.4 南海百年 SST 变化多重分形特征

通过上述分析可以发现,台湾海峡、北部湾、南海中部盆地以及越南沿岸是几个比较明显的

SST 变率中心,依次选取四个研究区域(A: 116°E—120°E, 20°N—24°N; B: 107°E—111°E, 18°N—22°N; C: 113°E—117°E, 12°N—16°N; D: 106°E—110°E, 6°N—10°N),通过 MFDFA 分析,分别从 SST 的长程相关性、多重分形特性等角度进行深入分析,判断其演变趋势,发现并提取南海 SST 时间序列波动的主要行为特征。

在时间序列中,分形性质意味着数据在不同的时间尺度上均表现类似的统计特性,即具有自相似性。海表温度序列的自相似性则表示某一段时间的温度变化在不同的时间尺度上呈现与整体相似的统计分布、振幅和模式。多重分形的起源是长记忆的持久性^[37]。通过选取不同的权重因子 q ,将分形体分成不同层次的区域进行研究^[38],不仅能对海表温度的非平稳时间序列中分形结构的不规则和均匀程度进行度量,还能识别其序列中存在的长期持续性特征。多重分形特征的准确估计依赖于识别之前确定合理的输入参数。从图 4 中可以看出,时间尺度 s 与相应的波动函数 $F_q(s)$ 之间为近似线性关系,这有助于提取海表温度时间序列的分形特性。

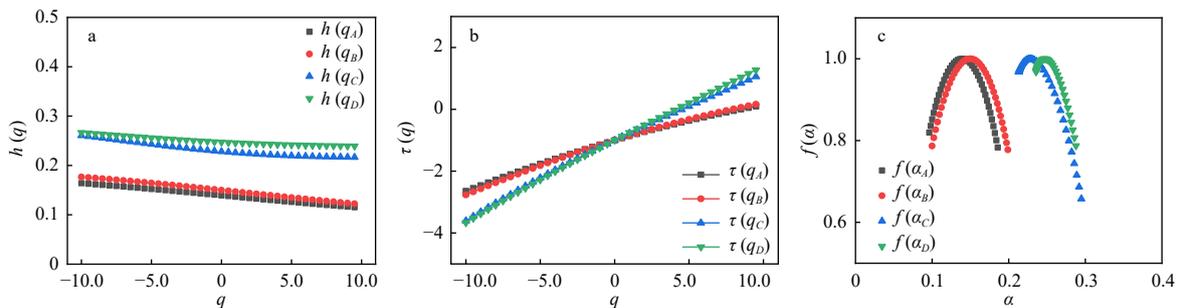


图5 南海不同海域 SST 序列 MFDFA 分析结果

Fig. 5 MFDFA analysis results of SST sequences in different areas of the SCS

对取对数的波动函数 $F_q(s)$ 与时间尺度 s 进行线性回归,得到的系数即为广义 Hurst 指数 $h(q)$ 。 $h(q)$ 不是一个常数,而是随 q 的变化而变化,且尺度函数 $\tau(q)$ 是 q 的凸函数,这表明了四个区域海表温度的时间演变都具有多重分形特征,由于对序列的趋势项进行了分离,可以更好地看出数据的波动情况。当 $h(q) < 0.5$ 时,表明四个区域的海表温度变化的小波动与大波动具有反持续性,即存在均值回复的过程。

对于多重分形谱 $f(\alpha)$ - α ,其参数的值($\alpha_0, \Delta\alpha, \alpha_s$)可以作为气象过程动态变化的定量和定性指标。多重分形谱中 $f(\alpha)$ 达到极值对应的 α 值为 α_0 , α_0 越大,表明其相关性较低且具有精细的结构。多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 与信号结构的“丰富度”有关,如果 $\Delta\alpha$ 越大,时间序列的波动性越大(越复杂),多重分形也越强^[39]。多重分形谱曲线的对称、左偏或右偏特性用不对称性系数 α_s 表示,其值的正负表明高(低)波动占主导地位^[40]。

α_0 从 A 到 D 逐渐增大,说明从台湾岛到越南岛沿岸海表温度变化的长程相关性逐渐降低。由 $\Delta\alpha_B(0.0990) > \Delta\alpha_A(0.0893) > \Delta\alpha_C(0.0813) > \Delta\alpha_D(0.0520)$ 可以得到北部湾、台湾海峡和南海中部盆地的海表温度时间演变具有更多的层次结构和复杂性。但由于四个区域 $\Delta\alpha$ 均较小,说明南海海表温度的时间变化表现出较弱的多重分形特征,总体上比较均匀。图 5(c) 中四个区域的不对称系数 α_s 均 < 0 , 其中 C、D 区域的左偏更明显,表明了南海中部盆地和越南沿海区域在较小的尺度上存在更多的长程相关性,其海表温度演变在局部时间范围内有更加结构化和复杂的模式,而台湾和北部湾附近海域的海表温度分形结构相对来说更均匀地分布在不同的尺度内。

3 结论

(1) 近百年来,南海海表呈持续变暖趋势,与全球变暖趋势一致。

(2) 全球变暖在南海不同区域的响应存在不均匀性。三种主要模态是外海向沿岸扩散的全海盆升温模态,西南-东北反向变化的冬春模态以及东南-西北反向变化的夏秋模态,说明南海上层环流在很大程度上受冬、夏交替的南海季风及其他季节性大气环流支配。

(3) 南海海表温度存在 2 年和 3~4 年的周期,自 20 世纪 80 年代以来,周期变得越来越零散,这可能导致海表温度预测的困难,此外,3 种模态的时间周期也分别体现了趋势特性和季节特性。

(4) 南海各区域海表温度变化序列的演化过程具有较弱的多重分形特征和长期持续性特征,即演化过程具有一定的相关性和记忆性,此外各区域海表温度变化均表现出在较小尺度上的重复规律。

(5) 本研究通过线性趋势分析、主成分分析、小波功率谱分析以及多重分形分析,为南海海表温度监测和预测提供了多层面的时空特征解读,有助于全面理解其长期趋势、变化模式及复杂波动性,但分析仍受一些限制,数据仅使用了单一的南海地区 SST 数据,未来还需要结合周边陆地与海洋的多源数据协同分析研究,加深解

析和认识海洋变化特征。

参考文献:

- [1] 李娟,左军成,李艳芳,等.南海海表温度的低频变化及影响因素[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(5):575-582.
- [2] 鲍献文,万修全,高郭平,等.渤海、黄海、东海 AVHRR 海表温度场的季节变化特征[J].海洋学报,2002,24(5):125-133.
- [3] 张秀芝,裘越芳,吴迅英.近百年中国近海海温变化[J].气候与环境研究,2005,10(4):799-807.
- [4] MEEHL G A, ARBLASTER J M, BRANSTATOR G, et al. A coupled air-sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(12): 2883-2897.
- [5] HU P, CHEN W, CHEN S F, et al. The weakening relationship between ENSO and the South China Sea summer monsoon onset in recent decades[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(3): 443-455.
- [6] 崔凤娟,匡晓迪,王玉.南海中尺度涡年际变化特征及动力机制分析[J].海洋与湖沼,2015,46(3):508-516.
- [7] WU M, QI L. Distinct evolution of sea surface temperature over the cold tongue region in South China Sea during various El Niño events[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(12): 1689.
- [8] 欧立健,余锦华,钟校尧,等.海表温度的增暖趋势和自然变率对长江中下游夏季极端降水强度的影响[J].大气科学,2022,46(6):1595-1606.
- [9] YULIHASTIN E, HADI T W, SYAHPUTRA M R. Mode of Wind and sea surface temperature over the South China Sea during rainy season in Indonesia[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 789: 012003.
- [10] 李彦,郭新宇,王云涛.中国近海海表叶绿素及环境要素的空间分布和季节变化特征[J].厦门大学学报(自然科学版),2023,62(3):397-405.
- [11] JÖNSSON B F, SALISBURY J, ATWOOD E C, et al. Dominant timescales of variability in global satellite chlorophyll and SST revealed with a MOVing Standard deviation Saturation (MOSS) approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 286: 113404.
- [12] 王洁,王杰,许佳峰,等.长江口邻近海域海表温度变化特征分析[J].海洋科学进展,2020,38(4):624-634.
- [13] CHEN M H, LI Q Y, ZHENG F, et al. Variations of the last glacial warm pool: sea surface temperature contrasts between the open western Pacific and South China Sea[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(2): PA2005.
- [14] 谭军,周发琇,胡敦欣,等.南海海温异常与 ENSO 的相关性[J].海洋与湖沼,1995,26(4):377-382.
- [15] QU T D. Role of ocean dynamics in determining the mean seasonal cycle of the South China Sea surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C4): 6943-6955.

- [16] RAYNER N A, PARKER D E, HORTON E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the Late Nineteenth Century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4407.
- [17] LAGERLOEF G S E, BERNSTEIN R L. Empirical orthogonal function analysis of advanced very high resolution radiometer surface temperature patterns in Santa Barbara Channel[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988, 93(C6): 6863-6873.
- [18] DE OLIVEIRA-JÚNIOR J F, CORREIA FILHO W L F, MONTEIRO L D S, et al. Urban rainfall in the Capitals of Brazil: variability, trend, and wavelet analysis[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 267: 105984.
- [19] KRZYSZCZAK J, BARANOWSKI P, ZUBIK M, et al. Multi-fractal characterization and comparison of meteorological time series from two climatic zones[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(3/4): 1811-1824.
- [20] 谭红建, 蔡榕硕, 黄荣辉. 中国近海海表温度对气候变暖及暂缓的显著响应[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(6): 500-507.
- [21] PORTNER H O, ROBERTS D C, MASSON-DELMOTTE V, et al. IPCC Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. New York: IPCC, 2019.
- [22] DAI X G, WANG P. Identifying the early 2000s hiatus associated with internal climate variability[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 13602.
- [23] 骆明钧, 李骏旻, 丁扬, 等. 基于FVCOM的夏季珠江冲淡水年际变化特征[J]. *海洋科学进展*, 2023: 1-17.
- [24] 于杰, 陈国宝, 唐振朝, 等. 南海北部主要海表温度锋面的时空变化特征[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(3): 367-373.
- [25] 孙豪为. 黑潮入侵台湾海峡的季节和年际变化及其物理机制研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016.
- [26] 高淑敏, 韩树宗, 倪煜淮, 等. 西北太平洋黑潮水入侵南海的路径、成因及影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2023, 45(5): 163-172.
- [27] 武杰, 张林林, 闫晓梅. 吕宋和台湾岛以东黑潮季节与年际变化规律的对比分析[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 839-850.
- [28] 刘雪, 林霄沛. ENSO背景下南海海表温度异常的跷跷板模态[J]. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(12): 1-6.
- [29] LIU Y J, LI S. North-South Discrepancy of interannual sea surface temperature anomalies over the South China Sea associated with eastern Pacific El Niño events in the spring[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(10): 1135.
- [30] 刘伟, 刘巧珍. 1980—2018年南海海表温度时空分布研究浅析[J]. *环境生态学*, 2020, 2(11): 51-56.
- [31] 凌征. 热带气旋对南海上层海洋影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 70-71.
- [32] 王卫强, 王东晓, 齐义泉. 南海表层水温年际变化的大尺度特征[J]. *海洋学报*, 2000, 22(4): 8-16.
- [33] MA H D, WANG R L, LAI A W, et al. Solar activity modulates the El Niño-southern Oscillation-induced precipitation anomalies over southern China in early spring[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(15): 6589-6601.
- [34] 周群, 陈文. 太阳活动11年周期变化对南海夏季风爆发的可能影响[J]. *热带气象学报*, 2020, 36(1): 25-31.
- [35] LI H, WANG C, HE S P, et al. Plausible modulation of solar wind energy flux input on global tropical cyclone activity[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, 192: 104775.
- [36] 陈文, 胡鹏, 皇甫静亮. 南海夏季风爆发和撤退的多时间尺度变化及其机制研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(6): 992-1009.
- [37] VAROTSOS C A, EFSTATHIOU M N, CRACKNELL A P. On the scaling effect in global surface air temperature anomalies[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(10): 5243-5253.
- [38] 杜必强, 唐贵基, 贾子文. 振动信号扩展广义多重分形维数算法[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(6): 1076-1080, 1100.
- [39] 刘付程, 刘吉堂, 郭衍游. 连云港海域表层海水温度、盐度变化的多重分形分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2011(3): 157-162.
- [40] ZHAN C, LIANG C, ZHAO L, et al. Multifractal characteristics of multiscale drought in the Yellow River Basin, China[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2023, 609: 128305.

(本文编辑: 曲丽梅)