

# 基于均一化资料的南海沿海海表温度变化特征分析 ——以遮浪海洋监测站为例

肖润东<sup>1</sup>, 钟煜<sup>1</sup>, 连泽鹏<sup>1</sup>, 游大伟<sup>2,3</sup>, 李琰<sup>1\*</sup>

(1. 深圳大学生命与海洋科学学院, 广东 深圳 518060; 2. 自然资源部南海海域海岛中心, 广东 广州 510301; 3. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510301)

**摘要:** 采用加拿大环境部下属的气候研究中心所研发的惩罚最大T检验法并结合海洋监测站点的元数据信息, 对南海沿岸的遮浪海洋监测站1961—2018年的海表温度(SST)序列进行均一化检验和订正, 对该区域基于均一化订正之后的SST序列的气候年际和年代际变化特征进行了分析。结果表明: 经均一化订正后的SST增温速率上升了0.05 °C/10 a, 由原来的0.12 °C/10 a变为0.17 °C/10 a, 呈现显著的增暖趋势, 表明非自然因素对月平均SST的影响导致了对该区域海水增温速率的低估。从年代际尺度上看, 该地区1998年出现气候跃变, 1998年之前遮浪海域的SST处于偏冷阶段, 而1998年后出现短暂的停滞阶段, 随后SST呈加速上升趋势, 至今仍处于上升增暖阶段。

**关键词:** 海表温度; 气候变化; 南海; 均一化

**中图分类号:** P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0063-08

## 0 前言

近年来, 随着科学技术的发展, 我国环境与资源的科学研究焦点逐渐扩展到海洋, 尤其是南海。南海作为西北太平洋最大的边缘海, 从地理、经济、生态、人文来看, 其重要性都不容小觑<sup>[1]</sup>, 越来越多科学研究在南海及其邻近海域开展。

作为海洋中的关键热力要素, 海表温度(Sea Surface Temperature, SST)不仅是海洋环境中最基础的参数, 也是其他海洋物理和化学要素研究的基础, 更是维持局地海洋生物、生态系统的关键海洋环境因子, SST对海洋生物的生存和海洋生态系统的稳定性有着重要的影响<sup>[2]</sup>。在全球变暖背景下, 海水暖化、酸化、海平面上升等原因引起了珊瑚白化、海草床退化等海洋生态系统失衡现象, 使得SST的监测、分析与预测等相关研究在海洋科学领域被推到了重要位置。而对于特定海域来说, SST对于

海温的垂直分布有着决定性的意义, 同时它也最容易受海气相互作用、海流和人类活动等因素影响<sup>[3]</sup>。本文将以南海沿海的遮浪海洋监测站(简称遮浪站)为例, 分析南海沿岸SST的变化特征。

由于非气候因素(比如早期人为观测数据时的不良习惯、观测环境的变化、观测测量仪器的更换与调整以及观测站址的迁移等)引起的SST或地表气温(Surface Air Temperature, SAT)数据序列的非均一性, 使得观测数据序列在某段时期中偏高、偏低或者不连续<sup>[4-5]</sup>。这种数据序列的非均一性会给海洋要素的时空演变特征分析带来极大的不确定性。王国松等<sup>[6]</sup>在2016年对南海海洋观测站点的SST数据的均一化订正研究中, 发现原始数据中的非均一性问题导致了对年平均SST变化速率的低估; 司鹏等<sup>[7]</sup>对北京1841年至今的日最高与最低气温的长期均一化序列构建中, 也得出经过均一化检验与订正的气温序列变化更加合理的研究结论。

收稿日期: 2022-10-25。

基金项目: 深圳市基础研究重点项目(JCYJ20200109110220482); 广东省“质量工程”立项建设项目(839-000002740626)。

作者简介: 肖润东(2000-), 男, 硕士在读, 主要从事海洋生物污损方向以及物理海洋方向的相关研究。E-mail: 273306310@qq.com

\*通信作者: 李琰(1982-), 女, 助理教授, 博士, 主要从事海洋防灾减灾和区域气候变化研究工作。E-mail: liyan\_ocean@szu.edu.cn

研究 SST 演变特征和规律,对于沿海的生态保护、海洋渔业、气象预测等都具有一定的指导意义。但目前多数气候变化研究主要集中于对 SAT 或者其他气象数据的均一化研究,而对 SST 的均一化检验和订正的工作还相对较少,更没有详细的分析。

综上,本文将采用惩罚最大 T 检验方法(由加拿大环境部下属的气候研究中心研发)对位于南海沿海的遮浪站的 SST 序列进行均一化检验和订正,对订正后的 SST 气候变化特征进行分析,希望能对南海沿岸的海洋气候研究工作、海洋渔业发展以及海洋生态环境保护提供一定的科技支撑和服务保障。

## 1 研究区域概况

南海,也被称为南中国海,因位于中国大陆南方而得名。南海是中国近海中面积最大(大约为 350 万平方公里)、水深最深(平均水深 1 212 m)的海区,其南北纵长约为 2 000 km,东西横跨约 1 000 km。南海通过各个海峡或者水道分别在东面、西面与太平洋以及印度洋相连通,其中包括南沙群岛、西沙群岛等多座岛屿和沙洲,这些岛屿的外围划定着我国在南海的海疆国界线<sup>[8]</sup>。南海处于热带与亚热带区域,海洋性气候显著,常年温和湿润。年平均 SST 为 26~29 °C,最低温出现在 1 月或 2 月,而最高温常出现在 6 月。年平均 SAT 为 23~28 °C,最低温常出现在 1 月,最高温出现在 6 月<sup>[9]</sup>。

遮浪岛,又称南澳半岛,位于广东省汕尾市的红海湾开发区,在汕尾市区东南约 29 km 处。遮浪岛三面环海且濒临南海,由红海湾与碣石湾交界处突伸入南海,形似麒麟角,有着“粤东麒麟角”的美称。遮浪岛海岸线长 1 454 m,面积约为  $1.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,其上一道山脊自高到低突入海面,为半岛遮挡住了红海湾的海浪,故得名“遮浪”。遮浪站位于遮浪岛的南澳山上,距离汕尾市区较远。遮浪站观测的 SST 数据可以在一定程度上避免由于“城市热岛效应”产生的影响,是一个十分理想的海洋监测站。此外,本次研究还选择了邻近的 3 个气象站点(站点 ID 分别为 59493, 59317, 59501)的均一化 SAT 序列作为参考,并选取了闸坡和南澳两个站点的均一化 SST 序列进行对比分析。站点分布见图 1。

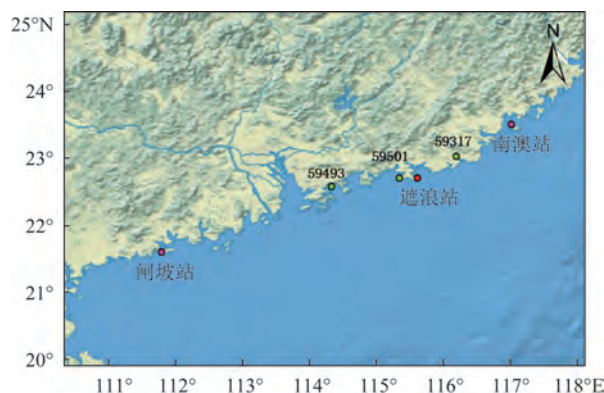


图 1 研究站点分布图

Fig.1 Distribution of research stations

## 2 数据来源和研究方法

本文的 SST 观测数据资料来自于遮浪站和国家海洋科学数据中心(网址: <http://mds.nmdis.org.cn/>),时间跨度为 1961 年 1 月—2018 年 12 月。研究所用的数据按照《海滨观测规范》(GB/T14916)进行了严格的质量控制,对时间一致性、空间一致性、气候学极值、极端数值等指标进行了检查与处理,剔除了不合理数据,并对缺测数据进行了插补。采用加拿大环境部气候研究中心开放的 RHtestV4 软件包中的惩罚最大 T 检验(Penalized Maximal T test, PMT)方法<sup>[10]</sup>,对 SST 序列进行均一性检验和订正。

气候序列的均一性检验方法有很多,包括距平累积法、连续 t 检验法、真阳性率(True Positive Rate, TPR)方法、贝叶斯方法和标准正态法(Standard Normal Homogeneity Test, SNHT)等,其中 SNHT 方法在国内较为常用,因其不依赖元数据信息,且对幅度较小的不连续点的检测较为敏感。但实际上,学者们也发现 SNHT 方法存在检验时其置信度受断点位置影响的显著缺点。因此,加拿大环境部气候中心的 WANG 等<sup>[11]</sup>在 TPR 方法的基础上,引入了惩罚因子,开发了惩罚最大 F 检验(Penalized Maximal F test, PMF)与 PMT 方法,并研制了 RHtestV4 软件包,该数据包以运行方式简洁方便而深受好评。重要的是,PMF 与 PMT 方法经验性地考虑了时间序列上的滞后一阶自相关,并且嵌入多元线性回归算法,能够用于检验和校正包括一阶自回归误差在内的多个数据序列的间断点,很好地改善了原来

SNHT方法存在的序列首、尾二端报错率大和检验能力差的问题<sup>[12]</sup>。在PMT方法的实际应用中,可以利用检测参照序列与待检测序列间的差值,对待检测序列的均一性进行检测,可靠性较好。

PMT方法具体原理为<sup>[13-14]</sup>,在惩罚最大T检验的基础上运作,首先假设序列 $\{X_t\}(t=1, \dots, N)$ 服从正态分布,即原假设满足 $\{X_t\} \sim IID\lambda(\mu, \sigma^2)$ ,假设:

$$H_a: \begin{cases} \{X_t\} \sim IID\lambda(\mu_1, \sigma^2), t=1, \dots, k \\ \{X_t\} \sim IID\lambda(\mu_2, \sigma^2), t=k+1, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中:当 $\mu_1 \neq \mu_2$ ,如果假设成立, $t=k$ 就被称为一个间断点,此时 $\{X_t\} \sim IID\lambda(\mu, \sigma^2)$ 代表 $\{X_t\}$ 服从高斯分布,且平均值为 $\mu$ ,方差为 $\sigma^2$ 。这种方法被称为最大似然估计。最大似然估计的评判依据的对数形式可以被转化为式(2)的最大值:

$$T(k) = \frac{1}{\sigma_k'} \left[ \frac{k(N-k)}{N} \right]^{1/2} |\bar{X}_1 - \bar{X}_2|, \quad (2)$$

$$\sigma_k'^2 = \bar{\sigma}_k^2 = \frac{1}{N-2} \left[ \sum_{1 \leq t \leq k} (X_t - \bar{X}_1)^2 + \sum_{k+1 \leq t \leq N} (X_t - \bar{X}_2)^2 \right]$$

因此, $T_{\max} = \max T(k) (1 \leq k \leq N-1)$ 的值可以被计算出来。在这个基础上,构造一个统计函数PT作为显著性判据:

$$PT(k) = P(k)T(k); \quad (3)$$

$$PT_{\max} = \max [P(k)T(k)] (1 \leq k \leq N-1)$$

式中: $P(k)$ 是由一系列测试所得到的经验函数。研究发现,该方法的检测效果好于SNHT方法,且均一化参考序列的使用也能有效地提高非自然因素造成的间断点的判断。综上,结合RHtestV4软件包的易操作性和准确度,本文选择了PMT方法对SST数据序列进行均一性检验与订正。由于PMT算法需要利用优质的参考序列,从而减少数据序列中的线性趋势以及周期分量的干扰,因此,我们选用了来自邻近(100 km内)气象观测站点的均一化SAT序列,用于构造一个待检SST序列的参考序列。检验过程中,首先对照参考序列找到可疑的间断点(又称不连续点),然后,通过对照遮浪站的历史元数据信息确认间断点,即如果在这些可疑间断点的对应时间点有仪器更换、站点迁址等非气候因素的相应记录(检测出的间断点与元数据记录的时间完全对应或相差在12 M内,认为客观分析检测出的断点获得元数据的支持),则将这些可疑间断点记为“有记

录间断点”(documented change point)。本次研究中,我们的均一化步骤主要专注于“有记录间断点”的检验和订正,其余的可疑间断点(undocumented change point,即元数据不支持的断点)原则上不做处理。在所有的“有记录间断点”被找到后,使用RHtestV4软件包中的分位数匹配(QM)方法进行订正。

需要补充说明的是,在选择邻近的气象参考站点时,需要参照以下两个标准:①参考气象观测站点与遮浪站之间的距离应在100 km以内;②参考站点均一化的SAT序列与遮浪站的待测SST序列之间的相关系数应 $\geq 0.7$ 。利用相关系数加权平均法,将满足条件的均一化SAT序列用来构建参考序列:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_j^2 \times x_{ji}}{\sum_{j=1}^n \rho_j^2} \quad (4)$$

式中: $j$ 代表参考气象观测的站点数量; $\rho$ 是SST序列和每个选定的邻近气象站SAT序列之间的相关系数; $x$ 代表月平均SAT序列; $\bar{y}$ 是待测SST序列的参考SAT序列。遮浪站SST序列和邻近气象站(站点的ID分别为59493、59317、59501)SAT序列之间的相关系数分别是0.69、0.75、0.76,相关系数的显著性水平均已超过99%的置信水平。

基于均一化订正后的遮浪SST数据序列,本文将采用线性回归方法对其年际尺度的变化趋势进行研究,用最小二乘法以及t检验对遮浪站的SST变化趋势及其显著度进行评估;完成年际变化分析后,利用滑动平均法处理年平均SST序列,以分析遮浪站SST序列的年代际变化特征;最后,通过累积距平序列所描绘的曲线对遮浪气候突变点(气候变化趋势由上升转为下降或者下降转为上升的转折点)进行判断,同时利用曼-肯德尔(Mann-Kendall)方法对突变点进行再次确认。

### 3 遮浪SST气候变化趋势分析

利用PMT方法得到的均一性检验结果表明,遮浪站的SST序列存在一个非气候因素的间断点,为2002年1月。通过查阅元数据信息和历史资料确认,2002年1月该站进行了由人工观测系统到自动



化观测系统的转变,观测仪器、观测方法和观测频次都发生明显变化,其中观测频次由原来的一天3次(08时、14时和20时,北京时,下同)变为一天24次,即每小时整点观测。在这种情形下,人工观测得到的SST值较自动化观测得到的SST值偏高,因此我们需要对早期由于人工观测造成的偏高SST值进行订正。我们将对均一性订正后的遮浪站SST序列进行年际和年代际尺度的气候变化分析,包括SST序列的增温速率在订正前后的对比,1961—2018年遮浪站年平均SST的各项统计参数以及SST气候突变年份(气候突变点出现的年份)及其与大陆气温变化特征的对比分析等,这是之前SST均一化检验和订正变化趋势的研究中关注较少的参数指标。

### 3.1 年平均海表温度变化特征分析

图2展示了遮浪站均一化订正前后的年平均SST序列,黑色虚线是订正之前的原始SST序列,红色实线则是经过订正后的均一化SST序列。从图中可以看出,2009年之前,原始数据始终高于均一化数据,且在1961—2002年两者差值始终保持在 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,2003—2008年其差值则保持在 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,此后两者几乎相吻合。均一化订正前的遮浪站SST增温速率为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,而订正后的增温速率为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。经过均一化检验与订正的SST序

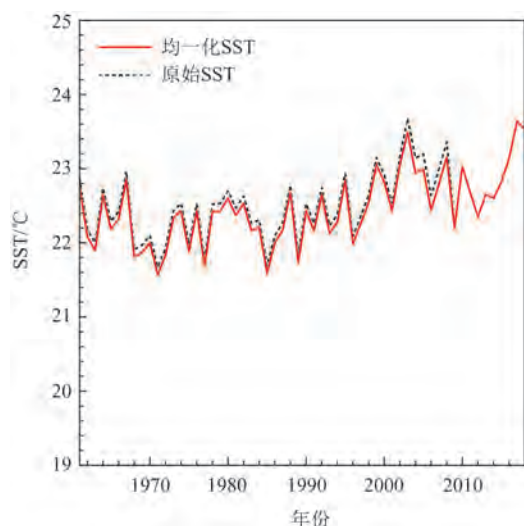


图2 遮浪站原始与均一化订正后的年平均SST序列  
Fig.2 The original mean SST sequence and the homogenized annual mean SST sequence at Zhelang Station

列明显地滤除了来自非气候因素的影响,使得SST增温速率上升了 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,订正后的序列呈现出显著的上升趋势。

本文对均一化订正前后的遮浪站年平均SST序列的变化趋势进行了显著性检验,即通过计算时间与年平均SST的相关系数 $r$ ,判断其显著性水平并对变化趋势进行判断。在显著性检验中,常常使用特定的显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、 $\alpha = 0.01$ 所对应的的相关系数值作为参考,其对应的的相关系数值可以通过相关系数临界表进行查找,可得 $r_{0.05} = 0.273$ 、 $r_{0.01} = 0.354$ 。当时间与年平均SST的相关系数大于 $r_{0.05}$ ,说明两个变量之间的相关性有着95%以上的可信度,同理,当两者的相关系数大于 $r_{0.01}$ ,则可认为其相关关系有99%以上的可信度。结果表明,均一化订正前时间与年平均SST的相关系数为0.565,而订正后上升到0.618,订正前后的相关性都通过了显著性检验,有着99%以上的可信度,但订正后的相关系数更为显著。这也进一步说明,1961—2018年遮浪站的年平均SST呈现显著的上升趋势。

图3为经过均一化订正之后的年平均SST序列的气候统计特征。由图可见,最近58年来遮浪站年平均SST的平均值为 $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,标准差为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1961—2018年中遮浪站的年平均SST最高达到了 $23.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,出现在2017年,而年平均SST的最低值为1971年的 $21.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均SST的极差(即最高值与

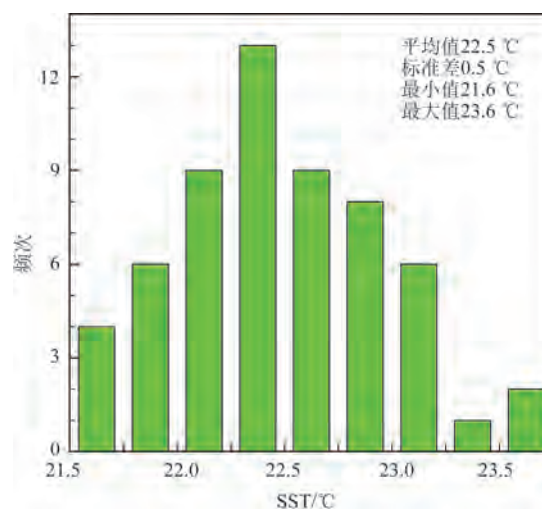


图3 均一化订正后的遮浪站年平均SST序列气候统计特征  
Fig.3 The statistical characteristics of homogenized annual mean SST series at Zhelang Station

最低值的差值)为 $2.0^{\circ}\text{C}$ 。根据频率分布来看,遮浪站的年平均SST多集中在 $22\sim 23^{\circ}\text{C}$ 之间,其频率为39次,占58年中的67.2%。1961—2018年遮浪站年平均SST最低(即最冷)的5 a都出现在20世纪90年代之前,分别是1971年、1985年、1977年、1989年以及1968年(见图2);而最热的5 a则都出现在21世纪之后,分别是2017年、2018年、2003年、2008年和2016年。

### 3.2 年平均海表温度突变特征分析

滤除遮浪站SST序列在10 a以下时间尺度的变化波动,可以展示该站的年代际(以10 a为尺度)变化趋势(见图4)。从图中可以看出,这58年来遮浪站的年平均SST呈现明显的年代际波动变化特征,整体呈变暖趋势。在1961—2018年间,从20世纪60年代—该世纪末(约1998年前后)的近37年是SST相对偏冷的阶段;从1998年开始到21世纪,遮浪站的年平均SST呈现出上升趋势,是58年中偏暖的阶段。20世纪70年代是58年中最冷的年代,而21世纪的第一个年代是最暖的年代,2010年末遮浪站的年平均SST的增温速率以及最高温不断刷新此前的记录,所以未来很有可能出现更暖的年代。此前的研究证明了2017年中国近海区域的平均

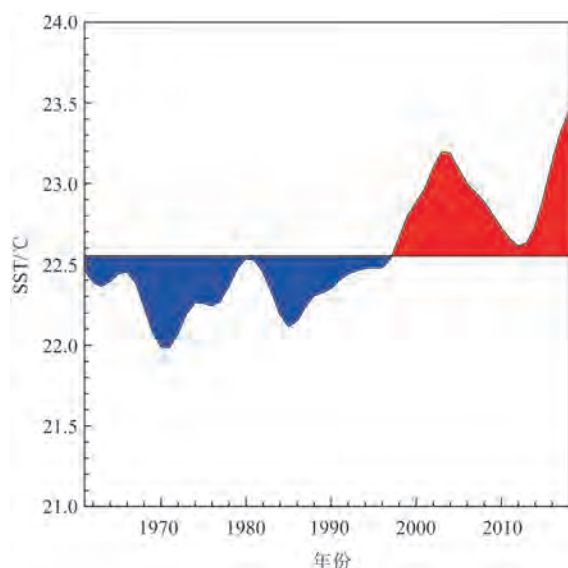


图4 1961—2018年遮浪站均一化订正后的年平均SST低频率滤波值曲线

Fig.4 Low frequency filtering curve of homogenized annual mean SST series at Zhelang Station from 1961 to 2018

SST以及SAT都达到了自1960年来非厄尔尼诺年份的新峰值,其中南海年平均SST与SAT也成为自1960年来达到的最高温度值之一<sup>[12]</sup>,这与本文遮浪站年平均SST最高值出现的年份相吻合。另外,遮浪站的年平均SST最暖的10个年份均出现在21世纪(除1999年),而且目前仍处于上升变暖的阶段,这与中国总体气温、气候变化趋势相一致<sup>[15]</sup>。

图5为1961—2018年遮浪站均一化订正后的年平均SST的累积距平曲线。由图中可以看出,从20世纪60年代一直到1998年,遮浪站的年平均SST都呈现明显的下降趋势,结合图4的分析来看,该阶段也是58年中偏冷的阶段。1998年之后,遮浪站年平均SST转为上升增温趋势且一直保持至今,并有在未来变得更加显著和剧烈的倾向。因此,我们可以把1998年定为遮浪站年平均SST气候变化的突变点年份。

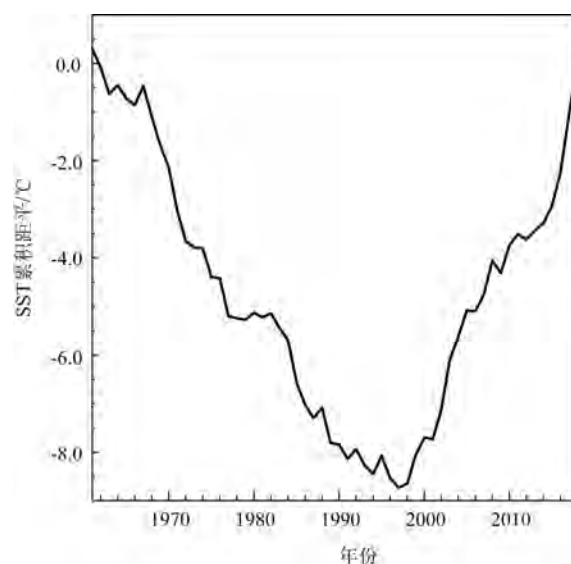


图5 1961—2018年遮浪站均一化订正后的年平均SST累积距平曲线

Fig.5 Cumulative anomaly curve of homogenized annual mean SST at Zhelang Station from 1961 to 2018

此外,利用曼-肯德尔(Mann-Kendall)方法对遮浪站点的突变特征进行检验与补充分析。本次分析中给定的显著性水平为 $\alpha=0.05$ ,则临界值相应的设置为 $\mu_{0.05} = \pm 1.96$ ,由此得到的曼-肯德尔统计量曲线见图6。图中UF与UB曲线在临界区间内相交,交点对应的年份是1998年。这一结果与上述累积

距平分析结果相互验证,指向了遮浪站 SST 气候变化的突变点年份为 1998 年这一结论。

此前的研究已经证明,中国大陆的气温突变点年份为 1987 年<sup>[16]</sup>,遮浪站的年平均 SST 突变点年份与中国大陆气温的突变点年份不同,进一步说明了南海气候的特殊性与相对独立性。在目前对南海气候分析的文章中,基于均一化数据的长期变化分析还比较少见。然而,1998 年这一时间节点在很多分析南海海温的文章中都有被提到,该年的南海年平均 SST 是近年来观测到的最高值之一<sup>[14,17-18]</sup>。值得一提的是,1997 年 4 月—1998 年 4 月发生了一次罕见的超强厄尔尼诺现象,其开始时间早,持续时间长,使得南海海域出现了前所未有的高温现象<sup>[19]</sup>。我们选取距离遮浪站最近的闸坡和南澳两个海洋监测站均一化订正后的 SST 序列进行对比分析,结果表明,1961—2018 年南澳站和闸坡站年平均 SST 序列也呈现出同样的增温趋势,增温速率分别为  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  和  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,且两个站在 1998 年前后也出现了一次明显的转折(图略)。所以,1997—1998 年的异常厄尔尼诺现象很可能是引起遮浪站及其周边海区 SST 变化趋势发生剧烈转折的一个重要的直接原因。

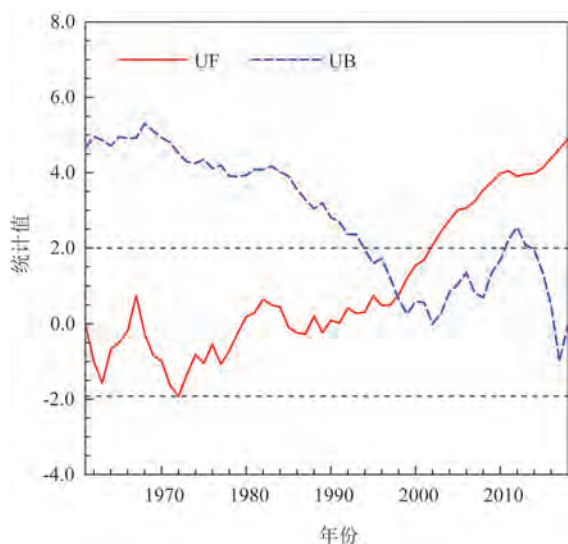


图6 1961—2018年遮浪海洋监测站均一化订正后的年平均 SST 曼-肯德尔统计量曲线

Fig.6 Mann-Kendall statistical curve of homogenized annual mean SST at Zhelang Station from 1961 to 2018

## 4 结论

①本研究使用 PMT 方法对遮浪海洋监测站 1961—2018 年的 SST 序列进行了均一化检验与订正,检验出遮浪站的 SST 存在一定的非均一性,间断点出现在 2002 年 1 月,造成断点的原因主要是在人工观测转为自动观测过程中观测仪器、观测方法和观测频次的变更。经过均一化订正后,排除了非气候因素对该 SST 数据序列的干扰,订正后的遮浪站年平均 SST 增温速率从  $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  上升到了  $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

②在对遮浪站 SST 变化特征的分析中,得到 1961—2018 年遮浪站年平均 SST 多集中在  $22\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均值为  $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,突变点年份为 1998 年。1961—1998 年是遮浪站 SST 偏冷阶段,1998 年至今处于偏暖的增温阶段。

## 参考文献:

- [1] 张君珏,苏奋振,王雯玥.南海资源环境地理研究综述[J].地理科学进展,2018,37(11): 1443-1453.  
ZHANG J J, SU F Z, WANG W Y. A review of geographical information research on resources and environment of the South China Sea region[J]. Progress in Geography, 2018, 37(11): 1443-1453.
- [2] 蔡泽浩,谢强华.海水温度测量的技术及发展[J].科技风,2015(18): 19.  
CAI Z H, XIE Q H. Technology and development of seawater temperature measurement[J]. Technology Wind, 2015(18): 19.
- [3] 李冰.海水表面温度红外测量方法的研究[D].天津:天津理工大学,2010.  
LI B. Research on infrared measure method of sea surface temperature[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2010.
- [4] RIBEIRO S, CAINETA J, COSTA A C. Review and discussion of homogenisation methods for climate data[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2016, 94: 167-179.
- [5] PETERSON T C, EASTERLING D R, KARL T R, et al. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review[J]. International Journal of Climatology, 1998, 18(13): 1493-1517.
- [6] 王国松,李琰,侯敏,等.南海海洋观测台站海表温度资料的均一性检验与订正[J].热带气象学报,2017,33(5): 637-643.  
WANG G S, LI Y, HOU M, et al. Homogeneity study of the sea surface temperature data over the South China seas using PMT method[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(5): 637-643.
- [7] 司鹏,郭军,赵煜飞,等.北京 1841 年以来均一化最高和最低气温

- 日值序列的构建[J]. 气象学报, 2022, 80(1): 136-152.
- SI P, GUO J, ZHAO Y F, et al. New series of daily maximum and minimum temperature observations for Beijing, China since 1841 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2022, 80(1): 136-152.
- [8] 孙珍. 南海的形成与演变[J]. 自然杂志, 2022, 44(1): 31-38.
- SUN Z. Evolution of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2022, 44(1): 31-38.
- [9] 邢彩盈, 朱晶晶, 吴胜安. 南海区域热状况的气候变化特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(6): 13-23.
- XING C Y, ZHU J J, WU S A. Climatic change characteristics of thermal condition in the South China Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(6): 13-23.
- [10] WANG X L. Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(3): 368-384.
- [11] WANG G S, HOU M, LI Y, et al. Homogenization methods for the Sea Surface Temperature Data over the South China Seas[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 52(1): 012046.
- [12] 李琰, 王国松, 范文静, 等. 中国沿海海表温度均一性检验和订正[J]. 海洋学报, 2018, 40(1): 17-28.
- LI Y, WANG G S, FAN W J, et al. The homogeneity study of the sea surface temperature data along the coast of the China Seas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(1): 17-28.
- [13] 邹曙光, 刘李钊, 邹琰. 基于均一化观测序列的成山头海表温度气候变化特征分析[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(6): 51-55.
- ZOU S G, LIU L Z, ZOU Y. Climate change analysis of sea surface temperature in Chengshantou based on homogenized observatory array[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2019, 38(6): 51-55.
- [14] 李琰, 范文静, 骆敬新, 等. 2017年中国近海海温和气温气候特征分析[J]. 海洋通报, 2018, 37(3): 296-302.
- LI Y, FAN W J, LUO J X, et al. Climatic characteristics of sea surface temperature and air temperature over the China Seas in 2017 [J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(3): 296-302.
- [15] 冯刚. 《中国气候变化蓝皮书(2021)》发布[J]. 环境, 2021(11): 75-77.
- FENG G. China's Blue Book on climate change 2021 published [J]. *Environment*, 2021(11): 75-77.
- [16] 尤卫红, 段旭, 邓自旺, 等. 全球、中国及云南近百年气温变化的层次结构和突变特征[J]. 热带气象学报, 1998, 14(2): 78-85.
- YOU W H, DUAN X, DENG Z W, et al. The multihierarchical structure and the jump features of climate changes for the globe, China and Yunnan during the last one hundred years[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1998, 14(2): 78-85.
- [17] LI Y, REN G Y, WANG Q Y, et al. More extreme marine heatwaves in the China Seas during the global warming hiatus[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(10): 104010.
- [18] 张雷, 任国玉, 宝乐尔其木格, 等. 基于卫星观测的南海表层温度气候学特征及长期变化[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(3): 189-197.
- ZHANG L, REN G Y, BAOLEERQIMUGE, et al. Climatology and change of the South China Sea surface temperature based on satellite observations[J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(3): 189-197.
- [19] 张祥玉, 梁荣金. 1997~1998年南海的天气与气候异常特征浅析[J]. 海洋预报, 2009, 26(1): 7-13.
- ZHANG X Y, LIANG R J. Analysis on the weather-climate anomaly characteristics of the South China Sea in 1997~1998[J]. *Marine Forecasts*, 2009, 26(1): 7-13.

## Analysis of sea surface temperature change in the South China Sea based on homogenized observations: a case study at Zhelang station

XIAO Rundong<sup>1</sup>, ZHONG Yu<sup>1</sup>, LIAN Zepeng<sup>1</sup>, YOU Dawei<sup>2,3</sup>, LI Yan<sup>1\*</sup>

(1. College of Life Sciences and Oceanography of Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. South China Sea Area and Island Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510301, China; 3. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** The Penalized Maximal T test method, developed by Climate Research Center of Environment Ministry of Canada, is used in this study to detect and adjust the observational sea surface temperature (SST) metadata obtained from 1961 to 2018 at the Zhelang marine station. We examine the climatic characteristics of the SST at the Zhelang station using the homogenized sea surface temperature dataset. The results show that the warming rate of SST increased from 0.12 °C/10 a to 0.17 °C/10 a by homogenization with an increment of



0.05 °C/10 a, indicating that non-natural factors lead to the underestimation of monthly mean sea surface temperature warming trend in this region. Besides, on decadal time scale there was a climate jump in this region around 1998. The SST at the Zhelang station was in a cold stage before 1998, thereafter the SST has undergone an increase after experiencing a short period of stagnation.

**Key words:** sea surface temperature; climate change; South China Sea; homogenization