

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

邹曙光, 刘李钊, 邹 琰

(国家海洋局烟台海洋环境监测中心站, 山东 荣成 264321)

摘 要:文中利用加拿大环境部气候研究中心研发的惩罚最大 t 检验方法, 选取均一的邻近气象站为参考站, 结合元数据信息, 对 1960–2017 年成山头海洋站海表温度序列进行了均一性检验与订正。利用订正后的海表温度序列对成山头海温气候变化特征进行分析。结果表明, 订正前后年平均海表温度趋势发生了明显改变, 表现出海温上升趋势较订正前加强的特征, 增暖趋势由订正前的 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 上升到 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 其中最暖的 5 个年份多发生在 1980 年以后, 分别为 1973 年、1989 年、2002 年、2007 年和 2017 年。海表温度总体呈显著上升趋势和明显的年代际波动, 20 世纪 60 年代至 80 年代末为偏冷阶段, 之后开始增暖, 20 世纪 90 年代至今为偏暖阶段。1960–2017 年, 成山头的海温突变点在 1987 年, 是一次增暖性突变, 与中国大陆的气温突变特征和气温变化阶段性特征非常一致。

关键词:海水温度; 气候变化; 变化趋势; 气候倾向率

中图分类号: P714

文献标志码: A

文章编号: 1003-2029(2019)06-0051-05

海水温度是反映海水热力状况的一个重要物理量, 热通量(包括太阳辐射通量、长波辐射通量、感热通量和潜热通量)是影响海水温度的主要因素之一^[1-2], 海流(如沿岸上升流, 台湾暖流, 黄海暖流等)对局部海区海水温度也有一定的影响。在开阔海洋中, 表层海水等温线的分布大致与纬圈平行, 在近岸地区, 由于受海流等的影响, 等温线向南北方向移动。海水温度的垂直分布一般是随深度之增加而降低, 并呈现出季节性变化^[3]。海水温度常常作为研究水团性质, 描述水团运动的基本指标。研究、掌握海水温度的时空分布及变化规律, 是海洋学的重要内容, 对于海上捕捞、水产养殖, 及海上作战等方面均具有十分重要意义, 对气象、航海和水声等学科也特别重要。中国近海靠近陆地和其独特的区域因素, 近海海水温度比开阔大洋的变暖速率更快。同时, 进一步研究表明海水温度的升高不仅会引起中国近海海洋环境和海洋生态系统的变化, 如

海洋生产力的变化、赤潮等灾害的频发、生物物种的北移。但当前, 针对局地小尺度范围的海水温度气候变化特征的分析研究还比较少。为此, 本文主要对成山头海洋环境监测站监测的海水温度变化特征进行深入分析探讨, 揭示局地气候变化的科学事实, 以为该地区海洋气候研究以及水产养殖等工作提供重要的指导依据, 满足科学应对海洋气候变化服务需求。

1 研究区域概况

成山头位于山东省威海市荣成市成山镇, 因地处成山山脉最东端而得名。成山头三面环海, 一面接陆, 距南北国际主航道仅 5 nmile, 与韩国隔海相望, 仅距 94 nmile。成山头海拔高度为 200 m, 东西宽 1.5 km, 南北长 2 km, 占地面积 2.5 km²。成山头

收稿日期: 2018-09-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0504900)

作者简介: 邹曙光(1963-), 男, 工程师, 主要研究方向为海洋水文气象观测、海洋污染监测。E-mail: sdcstzsg@163.com

直插入海,临海山体壁如削,崖下海涛翻腾,水流湍急。该区域属温带海洋性季风气候,常年经受大风、大浪和风暴潮的冲击,海域最大浪高达 7 m 以上,且受人类活动影响较小,是我国研究海洋气象、物理海洋以及海洋能源等的宝贵科研基地。

2 资料来源与研究方法

本文资料主要来源于自然资源部成山头海洋环境监测站 1960 年 1 月-2017 年 12 月逐月海水温度资料。数据按照《海滨观测规范》(GB/T 14916)的要求进行了严格的质量控制处理。同时,利用加拿大环境部气候研究中心研发的 RHtestV4 软件包中的 PMFT 方法^[4-5],结合台站沿革信息,月平均 SST 进行了非均匀性检验,分析了造成其非均一的原因,对检测出的非均一序列进行了订正,排除了非气候因素(如仪器变更、环境改变和迁站等)的影响^[6]。

TPR 和贝叶斯方法是气候序列均一化的最佳选择,加拿大环境部 Wang 等将 TPR 等应用效果较好的统计方法引入惩罚因子研发了 PMF 和 PMT 两种方法,这两种方法经验性地考虑了时间序列的滞后一阶自相关,并嵌入多元线性回归算法,能够用于检验、订正包含一阶自回归误差的数据序列的多个间断点,使得误报率和检验能力在序列两端差的问题得到改善。PMT 方法检验过程中需要建立参考序列,待检序列与参考序列的差值是被检验的对象。PMT 方法^[7]介绍如下:

PMT 方法基于惩罚最大 T 检验,首先假设 $\{X_t\}$ ($t=1, \dots, N$) 为正态分布序列,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: $\mu_1 \neq \mu_2$, 若假设为真,则称 $t=k$ 为一个间断点。 $\{X_t\} \sim IID\lambda(\mu, \sigma^2)$ 代表 $\{X_t\}$ 服从高斯分布,其平均值为 μ , 方差为 σ^2 。这种方法称为最大似然估计。其对数形式的最大似然估计的判据可以转化为求下式的最大值:

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

$$= \frac{1}{N-2} \left[\sum_{1 \leq t \leq k} (X_t - \bar{X}_1)^2 + \sum_{k+1 \leq t \leq N} (X_t - \bar{X}_2)^2 \right]$$

即可求 $T_{\max} = \max T(k) (1 \leq k \leq N-1)$ 的值。在此基础

上,有学者构造了一个统计函数 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: $P(k)$ 为通过一系列试验得到的经验函数。实践证明,这种方法较 SNHT 检验方法有较大的改进和提高,均一参考序列的使用能有效提高对真实的非气候断点的判断。

由于 PMT 方法在统计上的合理性, RHtests 软件包的完整性和易操作性,同时该软件系统得到了世界各国相关专家的借鉴和应用^[6,8]。因此,本文利用 PMT 方法对成山头海洋站逐月 SST 序列进行均一性检验,以找到可疑的间断点(或不连续点),然后查看历史沿革元数据信息,如果元数据反映出在那些可疑点时段发生了台站迁移、仪器换型等影响均一性的变化,则认为这个可疑点是真正的非均一点。对于保留的断点,采用 RHtest V4 提供的分位数匹配法(Quantile-Matching)进行订正,订正目的是使去除线性趋势后的待检序列中,所有片断具有相互匹配的经验分布。

本文参考台站的选择标准要求距离较近且该站 SAT 年均序列和待检台站的 SST 年均序列的相关系数接近或超过 0.7。对于选定的 SAT 序列,采用相关系数权重平均的方法来构造参考序列,表达式为:

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

式中: j 为选取的参考台站个数; x 为参考台站的地面气温月平均序列; ρ 为参考站 SAT 序列与待检验的 SST 序列的相关系数; y 为构造的参考序列。该方法构造出的参考序列回避了个别台站的影响,其均一性更好。本站的参考气象台站 ID 分别为 54 751, 54 774 和 54 776, 相关系数分别为 0.70, 0.74 和 0.72。

其中季节的划分采取常规的划分标准: 3-5 月为春季, 6-8 月为夏季, 9-11 月为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季^[9]。利用线性回归法^[10], 研究成山头海水温度的年际、月际以及季节变化规律。本文采用最小二乘法对海表温度距平序列的变化趋势进行估计,并用 t 检验方法判断线性趋势的显著性水平。气候突变常用气候状态特征量(平均值或方差)随不同时间段的变化来衡量。本文采用累积距平统计量序列进行趋势突变的判别,即在某年份的累积距平变化曲线中,当曲线出现极大值(或极小值)时,所对应的年份前后两个时段累积距平持续性变化发

生转折,从持续的正(或负)距平趋势变化为负(或正)距平趋势,该时刻可能是趋势突变年份^[11]。

3 成山头海表温度变化特征分析

3.1 年平均海表温度年际变化特征

对气候观测资料序列进行均一化检验和订正的目的是为了将序列中人为造成的非均一断点剔除,得到均一和可靠的气候序列。这项工作的气候变化研究中最基础也是最关键的一项工作。图1给出了成山头海洋观测站均一化订正前和订正后年平均海表温度序列。可见,订正前的年平均海表温度在1980年以前显著偏高(图1黑色虚线),使得整体SST增暖速率偏低,为0.04℃/10a。订正后的海表温度序列修正了早期人工观测和仪器变更造成的SST偏高,订正后的年平均海表温度增暖速率明显加大,为0.15℃/10a。对于变化趋势,我们计算了时间与变量之间的相关系数对于变化趋势,并进行了趋势显著性判断,即计算出时间 t 与变量 x_i 之间的相关系数 r :

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}} \quad (5)$$

对确定的显著性水平 $\alpha=0.05, \alpha=0.01$,得到相关系数临界值由相关系数临界值表查找 $r_{0.05}=0.273$, $r_{0.01}=0.354$ 。订正前 $r=0.10$,该趋势没有通过显著性水平检验,而订正后的 $r=0.43$,显著性水平大幅提高,超过了0.01的显著性水平,表明近58a,该地区海表温度呈显著的增暖趋势。

均一化订正后年平均海表温度气候统计特征显示,成山头近58a年平均气温为11.5℃,标准偏差为0.6℃。年平均海表温度值多集中在11.0~12.0℃之间,占总数的62.1%。年平均海表温度最高值为12.8℃,出现在1973年;年平均海表温度最低值为9.6℃,出现在1969年,年平均海水温度最高值和最低值之间相差达3.2℃(图2)。成山头最冷的5个年份均发生在1980年以前,分别为1977年、1963年、1968年、1976年和1969年。最暖的5个年份多发生在1980年以后,分别为1973年、1989年、2002年、2007年和2017年(图1)。

3.2 年平均海表温度突变特征分析

图3为1960–2017年成山头年平均海表温度

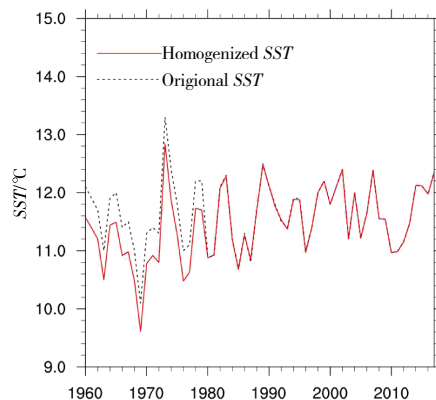


图1 成山头海洋观测站均一化订正前/后年平均海表温度

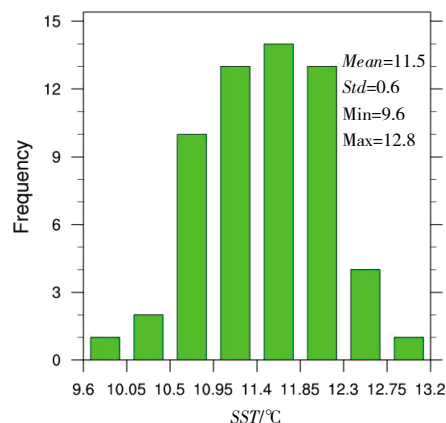


图2 成山头海洋观测站均一化订正后年平均海表温度气候统计特征

年代际变化,即去除10a以下时间尺度变化的年代际波动。由图中可知,成山头海表温度总体呈显著上升趋势和明显的年代际波动。20世纪60年代至80年代末为偏冷阶段,之后开始增暖,20世纪90年代至今为偏暖阶段。在过去的58a中,最冷的十年出现在20世纪60年代,最暖的10a出现在21世纪的第一个十年。成山头海表温度变化阶段性特征与中国气温的阶段性特征非常一致^[12]。本文计算了1960–2017年成山头海洋观测站均一化订正后年平均海表温度的累积距平值,图4为其累积距平曲线图。尽管海表温度的累积距平均为负值,但曲线的变化形态却十分直观、清晰地展示出近58a来成山头海表温度经历了一次显著的波动。20世纪60年代至80年代末,海表温度呈下降趋势,20世纪90年代开始增长,上升趋势至今未减,其突变点出现在1987年。研究表明中国气温增暖的突变点在中国大陆的突变点有着十分一致的配合。

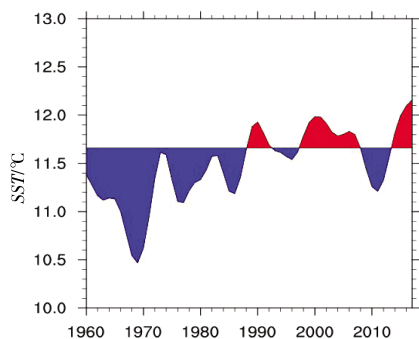


图 3 1960–2017 年成山头海洋观测站均一化订正后年平均海表温度低频率滤波值曲线

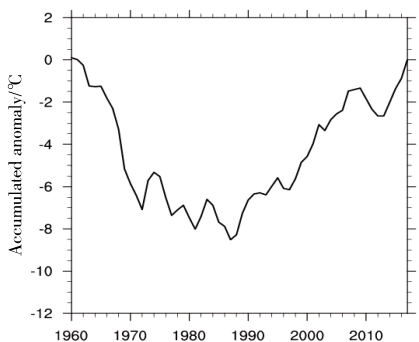


图 4 1960–2017 年成山头海洋观测站均一化订正后年平均海表温度的累积距平曲线

4 结 论

(1) 对 1960–2011 年成山头海海洋站年平均海表温度进行了均一性检验与订正。结果表明,该台站海表温度资料存在非均一性问题,早期人工观测和仪器变更使得海表温度观测值存在一定程度的偏高。

(2) 订正前后成山头海海洋站年平均海表温度趋势发生了明显改变,表现出海温上升趋势较订正前加强的特征。增暖趋势由订正前的 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 上升到 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。其中最暖的 5 个年份多发生在 1980 年以后,分别 1973 年、1989 年、2002 年、2007 年和 2017 年。

(3) 成山头海表温度总体呈显著上升趋势和明显的年代际波动。20 世纪 60 年代至 80 年代末为偏冷阶段,之后开始增暖,20 世纪 90 年代至今为偏暖阶段。1960–2017 年,成山头的海温突变点在 1987 年,是一次增暖性突变,与中国大陆的气温突变特征和气温变化阶段性特征非常一致。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 蔡泽浩,谢华强.海水温度测量的技术及发展[J].科技风,2015(18):19.
- [3] 金义亭,刘敬彪,章雪挺.高精度海水温度检测系统设计[J].电子器件,2011(05):542–545.
- [4] Wang X L, Wen Q H, Wu Y. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series [J]. Journal of Apple Meteorological Climatology, 2007, 46(6): 916–931.
- [5] Wang X L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change [J]. Journal of Atmospheric Oceanic Technology, 2008, 25(3): 368–384.
- [6] 李琰,王国松,范文静,等. 2018.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.
- [7] 张高杰,何金海,周自江,等. RHtest 方法对我国降水资料的均一性检验试验[J].气象科技, 2012, 40 (6): 915–921.
- [8] 李琰,牟林,等. 2016. 环渤海沿岸海表温度资料的均一性检验与订正[J].海洋学报, 2016, 38(3): 27–39.
- [9] 程增辉,陆宝宏,王慧凤,等.山东地区气候要素变化特征分析及预测[J].水电能源科学,2017,35(05):10–14.
- [10] 郭磊,陈立春,范庆东.莱阳市近 40 年气温变化特征分析[J].科技创新导报,2013,3:160.
- [11] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [12] 中国气象局. 中国气候变化蓝皮书(2017)[R]. 2018:72.
- [13] 尤卫红,段旭,等.全球、中国及云南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):173–180.

Climate Change Analysis of Sea Surface Temperature in Chengshantou Based on Homogenized Observatory Array

ZOU Shu-guang, LIU li-zhao, ZOU Yan

Yantai Oceanic Environmental Monitoring Central Station, State Oceanic Administration, Rongcheng 264321, Shandong Province, China

Abstract: The observational sea surface temperature (*SST*) data obtained from 1960 to 2017 of the Chengshantou marine station have been detected and adjusted by the Penalized Maximal *t* test (PMT) developed by the Climate Research Center of the Environment Ministry of Canada, and the detailed metadata archive. In this study, the homogenous surface air temperature (*SAT*) data from neighboring meteorological observation stations are used to construct the reference series by correlation coefficient weighted averaged method. The climate change characteristics of Chengshantou *SST* were analyzed using the homogenized data. Results show that the annual average *SST* trend has changed significantly before and after the homogenization. The warming trend increased from 0.04 °C/10 a before revision to 0.15 °C/10 a. The warmest five years occurred mostly after 1980, that is, 1973, 1989, 2002, 2007 and 2017. *SST* generally showed a significant upward trend and significant inter-decadal fluctuations. From the 1960s to the end of the 1980s, it was a colder stage, and then began to warm up. It was a warmer period from the 1990s to the present. From 1960 to 2017, the jump point occurred in 1987, which is very consistent with the temperature characteristics of the continent of China.

Key words: seawater temperature; climatic variability; changing trend; climatic tendency