

中国沿海海表温度均一性检验和订正*

李琰¹, 王国松¹, 范文静¹, Birger Tinz², Hans von Storch³

1 国家海洋信息中心, 天津 300171

2 German Meteorological Service, Hamburg, Germany

3 Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Centre for Materials and Coastal Research, Hamburg, Germany

摘要: 利用加拿大环境部气候研究中心研发的惩罚最大 t 检验 (Penalized Maximal t test, PMT) 方法, 选取均一的邻近气象站为参考站, 使用月平均地面气温 (SAT) 资料构建参考序列, 同时结合元数据信息, 对 1960-2011 年中国沿海 27 个海洋观测站月平均海表温度 (SST) 进行了均一性检验与订正, 并分析了造成海表温度序列非均一的主要原因。结果表明, 中国沿海海洋台站海表温度资料存在较为严重的非均一性问题, 几乎所有的台站都存在断点, 人工观测转自动观测和仪器变更 (占总断点数的 52.4%), 迁站 (占总断点数的 33.3%) 是造成序列非均一的主要原因。整套资料负订正量所占比例较高, 这种负订正量与人工转自动观测后海表温度观测值偏低有密切关系。这也使得订正后中国沿海平均海表温度趋势与订正前存在明显差异, 订正后中国沿海海表温度呈明显的加速上升趋势。

关键词: 海表温度; 均一性; PMT 方法

The homogeneity study of the sea surface temperature data along the coast of the China Seas

Li Yan, Wang Guosong, Fan Wenjing, Birger Tinz², Hans von Storch³

1. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China

2 German Meteorological Service, Hamburg, Germany

3 Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Centre for Materials and Coastal Research, Hamburg, Germany

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41206013、41376014); 德国汉堡大学 CliSAP 基金; 国家海洋局公益性行业科研专项经费项目 (201005019); 国家科技支撑计划项目 (2014BAB12B00); 天津市科技计划项目 (14ZCZDSF00012)。

作者简介: 李琰 (1982-), 女, 安徽宿州市人, 博士/副研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: ly_nmdis@163.com

The monthly sea surface temperature (SST) data of 27 marine observation stations have been detected and adjusted by the Penalized Maximal t test (PMT) 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. Results show that all of the stations along coast of the China Seas, the inhomogenities or change points can be detected and are almost consistent with the time records in metadata. Combined with the detailed metadata of each station, the main reasons causing the inhomogenization problems are instrument change (including the change from artificial observation to automations) and relocation, accounting for about 52.4% and 33.3% of the total change points. It is also found that the annual mean SST trend has changed obviously and homogeneity is improved well after adjustment. The warming rate of SST series along the coast of the China Seas after adjustment is much larger than that before adjustment. This phenomenon links tightly to the SST decreasing after automation which leads to the large proportion of negative correction values.

Key words: sea surface temperature (SST); homogeneity; penalized maximal T test (PMT)

引言

在全球变暖背景下研究边缘海海表温度 (SST) 的变化一直是区域海洋学和气候学的一个重要课题。作为太平洋的西边界以及与人类生活的陆地紧密相连的典型边缘海, 中国海陆架 (渤海、黄海、东海和南海, 简称中国海) SST 与我国近海气候和海洋环境密切相关^[1-3]。长时间序列的海洋观测资料是研究我国海洋气候变化的重要基础。其中海水温度要素既是海洋生态环境系统重要因子, 又是气候变化研究中的关键要素, 一直受到海洋和大气科学家的普遍关注。20 世纪中叶以来, 随着国家海洋局观测体系的现代化发展, 中国沿海海表温度观测系统也在日趋完善, 主要表现在观测地点的迁移、观测仪器变更、人工观测向自动化观测的转变等 (图 1)。但已有的研究表明上述变化恰恰是造成气候序列非均一性的主要因子^[4-6]。而这一问题在前人的研究中没有得到充分考虑和妥善处理^[7-9],

这就使得我国 SST 气候变化的结论仍然存在着相当不确定性。目前我国沿海可用的海洋观测站点有 100 余个，而拥有 50 年以上长期历史观测的海洋台站仅 30 个左右，这些长时间序列的观测资料对于研究海岸带气候变化、近海海洋环境变化等都是十分珍贵的。因此，需要对中国沿海海洋观测站的 SST 资料进行定量分析，对不均一序列给予合理订正。



图 1 石浦海洋观测站不同时期站点位置示意图，同时实现了海洋观测从人工到自动观测系统的升级)

Figure.1 The observation locations of Shipu marine observation station in different periods. Meanwhile, the automation also took place in 2003)

目前，我国在气温、降水和相对湿度等要素的均一性检验和订正已经取得了突破性进展，建立了均一化的中国历史气温和降水数据集^[10-14]。但是中国沿海海洋观测台站 SST 序列的均一性检验和订正却仍是空白。直至今日，我国还没有建立科学合理的沿海 SST 数据序列。如何建立具有均一性、准确性和适用性的 SST 观测数据序列，是目前区域海洋气候变化研究中亟待解决的一个重要问题。而解决这一问题的难度主要在于沿海海洋台站分布相当稀疏，SST 的测量历史并不长，资料的完整性较差，元数据记录不详或元数据信息缺失等。

国家海洋信息中心自 2014 年以来加大了对沿海海洋观测台站元数据信息的收集和整理力度，极大地弥补了没有元数据或元数据不详的部分海洋观测台站的不足。本文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^[15-16]，结合国家海洋信息中心最新搜集整理的“中国沿海海洋观测台站元数

据数据集”中的台站沿革信息，在前期工作的基础上^[17]，对中国沿海 27 个具有长时间（50 年以上）的海洋台站的月平均 SST 进行了非均一性检验，分析了造成中国沿海 SST 非均一的原因，对检测出的非均一序列进行了订正。在此基础上给出了订正前后中国沿海海表温度的变化趋势。

1、资料和方法

1.1 海表温度资料及预处理

本文数据源为国家海洋局国家海洋信息中心提供的 27 个海洋台站（图 2）SST 资料及其元数据信息。这些数据源都经过了严格质量控制，进行了气候界限值检查、时间一致性检查和空间一致性检查等，同时进行了气候合理性检验。剔除了超过气候界限值的数据，并对不符合内部一致性的数据进行了更正，对个别不符合局地气候条件的值进行了气候合理性订正。对某个站存在的个别缺测数据利用了多元线性回归方法进行了插补。本文还采用了国家气象信息中心气象资料室制作的中国 1960-2011 年逐月地面气温（SAT）资料^[8]，该资料通过了质量控制和均一化订正。由于沿海同一地区 SAT 和 SST 反映同一个物理属性，且相关密切，因此均一化 SAT 资料在本文中尝试作为待检海洋台站的参考序列。

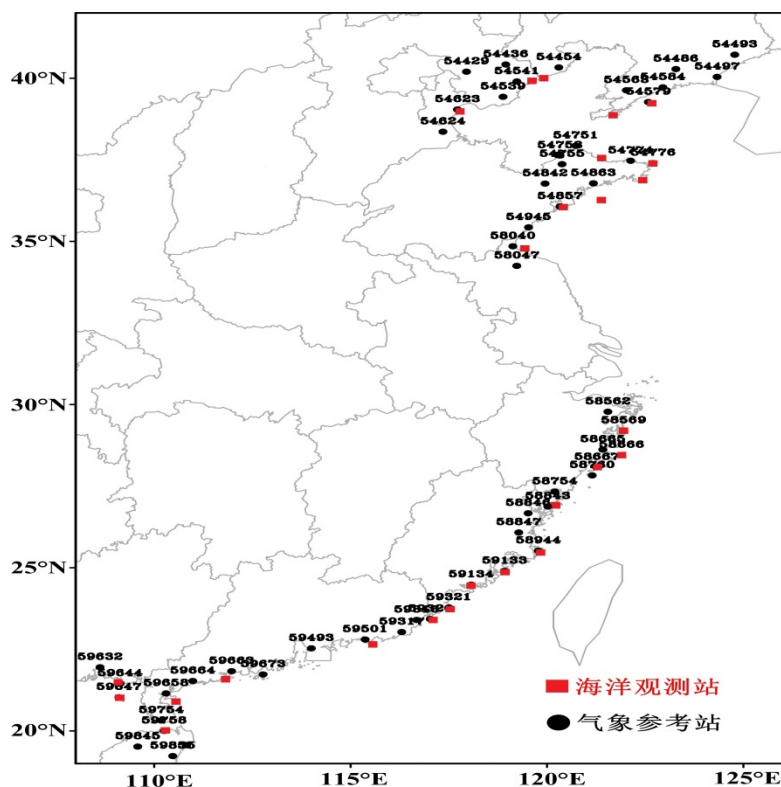


图 2 中国沿海 27 个海洋观测站的空间分布(红色正方形)和各海洋观测站对应的气象参考站

(黑色圆形)

Figure 2. The distribution of the 27 marine stations along coast of the China Seas (red square) and the reference meteorology stations (black circle)

1.2 元数据

本文所使用的元数据信息来源于中国沿海海洋观测台站元数据数据集, 该数据集由国家海洋信息中心预报减灾室收集的各沿海海洋中心站上报的海洋观测台站历史沿革信息整理完成。支持序列均一性检验订正的元数据包括台站迁移, 仪器变更, 观测方法改变, 计算方法变化和台站周围环境变化等信息。

1.3 非均一检验与订正方法

国际主要的断点检测和订正的方法有 Craddock 检验、滑动 t 检验、Potter 方法和标准正态检验 (SNHT), 基于惩罚最大 F 检验 (PMFT) 和惩罚最大 T 检验 (PMT) 等方法^[15-16,18]。国内常用的方法主要是 SNHT 方法、回归法和 PMFT 法等。研究表明不同参考序列时, TPR 和贝叶斯方法是气候序列均一化的最佳选择^[19]。而使用参考序列能成功地去掉周期性和趋势, 并有效提高对真实的非气候断点的判断, 其中 SNHT 方法最好。但 SNHT 方法仍具有一定的缺陷: 检验时的置信度受断点位置的影响, 当断点处于中间以及两端时错误警报率偏低, 而处于其他位置时错误警报率偏高等。加拿大环境部 Wang et al. 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。同时 Wang 将 PMT 和 PMF 两种检测方法开发了相应的均一化软件供用户使用 (RHtest v4), 该软件包是建立在一个非常强大并可以自由获取的、在 windows 下和 Unix/Linux 系统下都能运行的统计包“R”的基础上, 因而使用和操作起来十分方便^[20]。

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 方法介绍如下^[15,16,21]:

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:

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

式中 $\mu_1 \neq \mu_2$ ，若假设为真，则称 $t=k$ 为一个间断点。式中， $\{X_t\} \sim IID\lambda(\mu, \sigma^2)$ 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：

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

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

即可求 $T_{max} = \max T(k) (1 \leq k \leq N-1)$ 的值。在此基础上 2006 年王小兰构造了一个统计函数 PT 作为显著性判据：

$$PT(k) = P(k)T(k);$$

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

其中， $P(k)$ 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。因此，本文利用 PMT 方法对中国沿海海洋台站逐月 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，我们采用 RHtest V4 提供的分位数匹配法（quantile-matching (QM)）进行订正，其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。

1.4 参考序列构建

中国沿海海洋台站分布稀疏，难以选出均一的 SST 序列来构建参考序列。但由于同一地区 SAT 和 SST 二者本身的物理特点密切相关，且中国沿海浅水区的 SST 主要受陆地气候的影响，SST 变化与 SAT 变化幅度是较为接近的^[22]。在上述情况下，本文尝试选择 3 个临近气象台站的均一化 SAT 资料来构建待检海洋台站 SST 序列的参考序列（个别站点只能选出 2 个临近的气象台站）。Stephenson 等人在对加勒比海气温订正时也用了类似方法^[23]。参考前人的研究

结果^[24]，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 0.65。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：

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

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^[14]。

表 1 海洋观测站站名，气象参考站站码及 SST 和参考站 SAT 序列的相关系数
Table 1. The name of the marine observational stations, the station index of the reference meteorological stations and the correlation coefficients between SST series and the SAT series

No	海区	站名	气象参考站点代码	相关系数
1	渤海	秦皇岛	54436; 54539; 54541	0.81; 0.81; 0.82
2		芷锚湾	54454; 54541	0.75; 0.69
3		塘沽	54623; 54624; 54429	0.78; 0.74; 0.68
4		小长山	54584; 54563; 54579	0.77; 0.74; 0.789
5		老虎滩	54486; 54493; 54497	0.79; 0.74; 0.79
6		龙口	54753; 54755; 54751	0.68; 0.76; 0.82
7	黄海	烟台	54751; 54774	0.70; 0.68
8		石岛	54774; 54776; 54863	0.62; 0.74; 0.68
9		千里岩	54863; 54842; 54857	0.66; 0.65
10		小麦岛	54863; 54857; 54945	0.65; 0.68; 0.65
11		连云港	58040; 54945; 58047	0.83; 0.83; 0.82
12	东海	石浦	58569; 58562; 58665	0.79; 0.74; 0.75
13		大陈	58665; 58666; 58667	0.70; 0.80; 0.76
14		坎门	58666; 58667; 58760	0.86; 0.86; 0.87
15		平潭	58847; 58944; 59133	0.66; 0.66
16		崇武	58944; 59133; 59134	0.81; 0.85; 0.76
17		厦门	59133; 59134; 59321	0.84; 0.80; 0.84
18		三沙	58754; 58843; 58846	0.74; 0.76; 0.75
19		北海	59644; 59647; 59632	0.91; 0.93; 0.86
20		海口	59758; 59754; 59855	0.77; 0.78; 0.77
21	南海	硇洲	59658; 59754; 59664	0.84; 0.810; 0.83
22		清澜	59855; 59845; 59758	0.86; 0.84; 0.78
23		涠洲	59647; 59644; 59754	0.82; 0.76; 0.77
24		云沃	59324; 59321; 59316	0.77; 0.81; 0.72
25		遮浪	59493; 59317; 59501	0.67; 0.75; 0.76

26	闸坡	59663; 59664; 59673	0.88; 0.89; 0.90
27	东山	59324; 59134; 59321	0.79; 0.75; 0.83

2 结果分析

本研究首次利用中国国家海洋局海洋观测台站详实的元数据信息，并结合 PMT 方法，以临近的，具有均一性且与 SST 序列相关系数高的 SAT 序列来构建参考序列（表 1），对 1960-2011 年中国沿海 28 个海洋站的月平均海表温度资料进行了非均一性检验与订正。主要结果如下：

2.1 中国沿海海表温度非均一的主要原因

中国沿海海洋台站的 27 个 SST 月平均序列一共检出 70 个断点，每个台站都存在一个或多个断点（表 2）。元数据在气候序列的均一性检验中占据极其重要的地位，因此为了保证检验的准确性和合理性，本研究采用 PMT 方法和元数据相结合的方式对所选站点的月海表温度进行均一性检验。所以研究结果中就有两类断点：1) 检测出的间断点与元数据记录的时间完全对应或相差不超过 1 年，认为客观分析检测出的断点获得元数据的支持^[13]，称之为“元数据支持的断点（documented change point）”^[4,13]，即为真正的断点。2) PMT 方法检测出了断点，但没有元数据支持，称之为“元数据不支持的断点（undocumented change point）”，被认为不是真正的断点，不予订正。

从断点与元数据信息匹配情况来看，有元数据支持的断点比例为 63 个，占总断点数的 90%（表 2）；其中观测仪器变更（包含人工观测转自动观测）造成的断点有 33 个，比例为 52.4%；迁站变化导致的断点有 21 个，比例为 33.3%；其他原因（人为错误，观测故障和原因不明）断点有 10 个，比例为 15.8%（图 2）。这里还需要指出的是石浦站在 2004 年 1 月进行了站址迁移，同时观测系统也发生了由人工观测到自动化观测的升级改造，所以该间断点同时记入了观测仪器变更和站址迁移。本研究中我们对上述有元数据支持的 63 个真正间断点进行了订正。

表 2 断点信息和造成非均一性的原因

Table 2 The number of shifts and the different causes leading to inhomogenization

No	站名	元数据支持的间断点	中国沿海 SST 非均一的主要原因		
			迁站	人工转自动和仪器变更	人为错误, 观测故障和原因不明
1	秦皇岛	1969/02; 1987/11; 2006/07; 2008/12	2006/07	2008/12	1969/02; 1987/11
2	芷锚湾	1967/11; 1995/12; 2008/01; 2010/07	2008/01	2010/07	1967/11; 1995/12
3	塘沽	1969/02; 1969/12; 1972/02; 1977/03; 1986/09; 1994/07; 2002/05	1969/02; 1969/12; 1972/02; 1977/03; 1986/09; 1994/07	2002/05	/
4	小长山	1965/01; 2002/01; 2004/07	/	2002/01; 2004/07	1965/01
5	老虎滩	2002/02	/	2002/02	/
6	龙口	1972/01; 1991/10; 2002/02	1991/10	2002/02	1972/01
7	烟台	1966/01; 1974/02; 1980/09; 2002/05	1966/01; 1974/02; 1980/09	2002/05	/
8	石岛	2002/05; 2004/02	/	2002/05; 2004/02	/
9	千里岩	1989/01	1989/01	/	
10	小麦岛	2002/01; 2004/04	/	2002/01; 2004/04	/
11	连云港	1983/06; 2004/05	1983/06	2004/05	/
12	石浦	2004/01	2004/01	2004/01	
13	大陈	2007/02		2007/02	
14	坎门	2001/10; 2002/07; 2006/12		2001/10; 2002/07; 2006/12	
15	平潭	1993/04; 2006/08	/	1993/04; 2006/08	/
16	崇武	2001/07; 2002/06	2001/07	2002/06	/
17	厦门	2002/08; 2004/06; 2006/08	/	2002/08; 2004/06; 2006/08	/
18	三沙	1983/12; 2002/06	/	1983/12; 2002/06	/
19	北海	2005/05	/	2005/05	/
20	海口	1966/01	1966/01	/	/
21	碓洲	1990/01; 1996/06; 2002/06	1990/01; 1996/06	2002/06	/
22	清澜	1983/07	/	/	1983/07
23	润洲	2003/01	2003/01	2003/01	/

24	云沃	2007/04	/	/	2007/04
25	遮浪	2002/01	/	2002/01	/
26	闸坡	1979/12; 1988/03	/	/	1979/12; 1988/03
27	东山	1969/01; 2002/07; 2006/04; 2007/01	1969/01	2002/07; 2006/04; 2007/01	/

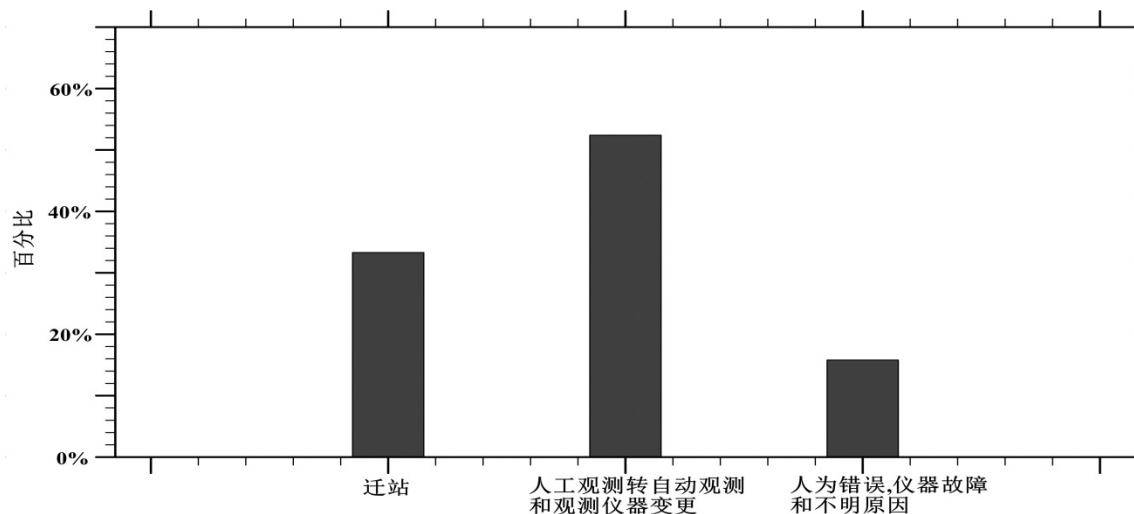


图 2 不同类型间断点百分比分布

Figure 2. Percentage distribution of different types of the discontinuities

2.2 断点订正值分析

本研究中，月值序列的均一性订正采用分位数匹配法（QM）进行订正，其给出的订正值指为该断点所在月份订正后与订正前平均 SST 的差值，该订正值将叠加在断点所在月份及以后下一个断点前所有月份上。本文将订正值 <0 的订正称为负订正，订正值 >0 的订正称为正订正。图 3 给出了中国沿海 SST 月均序列中存在 63 个有元数据支撑的断点的订正值的个数分布，负订正的比例（62%）明显高于正订正的比例（38%），其中 -0.3°C 的订正值出现次数最多，达 10 个。查阅台站元数据可知，很大一部分负订正是由 SST 人工观测向自动观测的转变造成的。人工观测时日平均 SST 由北京时 08、14 和 20 时统计得到，即 $T_{daily} = (2T_8 + T_{14} + T_{20})/4$ 。自动观测后，日平均 SST 由每小时整点记录的数据进行算术平均得到，即 $T_{daily} = (T_{01} + T_{02} + \dots + T_{24})/24$ 。两种情形下，人工观测得到的 SST 值较自动化观测得到的 SST 值偏高。因此需要进行均一化订正，以修复早期人工观测造成的 SST 偏高。

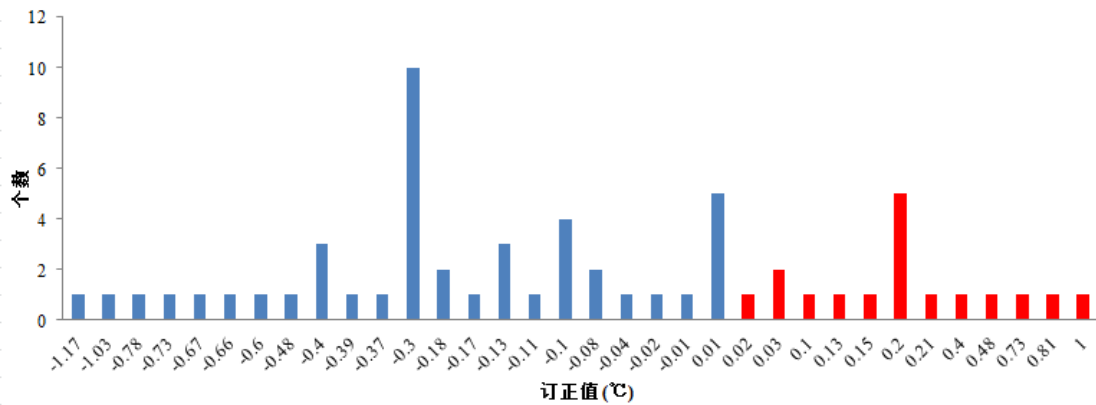


图3 月平均 SST 序列断点对应订正值的个数分布 (红色为正订正值, 蓝色为负订正值)
 Figure 3 numbers of the monthly mean adjustments applied to each breakpoint in all of the SST series (red bar: positive adjustment; blue bar: negative adjustment)

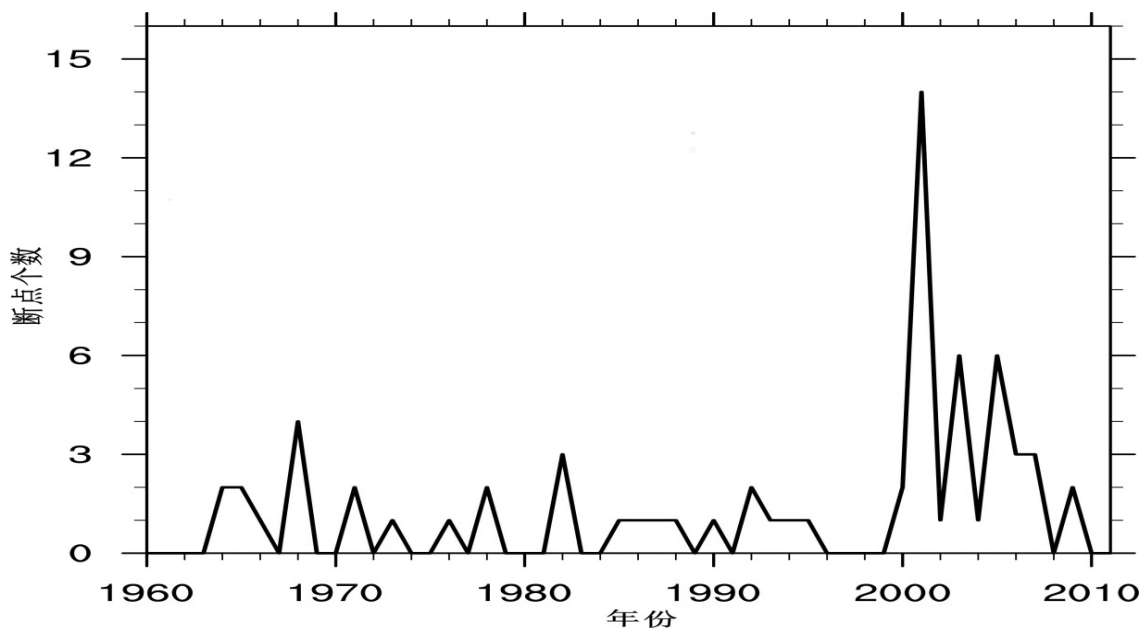


图4 1960-2011年不同年份的断点个数
 Figure 4. The number of change points in 1960-2012

另外, 2002-2007年, 我国沿海观测台站进行了全国范围的仪器换型, 即从人工观测系统到自动观测系统的转变。从图4给出的元数据支持的断点个数随时间变化曲线上看, PMT方法检测出的间断点也多集中在2002-2007年这一范围, 在一定程度上说明了PMT这种数学统计方法可以检测出真实的间断点。

2.3 订正前后趋势对比分析

对气候序列均一化订正的目的是为了将 SST 序列中人为造成的非均一性剔除, 得到均一和可靠的气候序列。为了分析均一化前后 27 个海洋站 1960-2011 年的趋势变化, 我们利用基于最小二乘法的线性拟合来计算气候资料的线性趋势。表 3 给出了订正前后的各站年平均 SST 序列的变化趋势。并对订正前后 SST 趋势变化的区域特征进行了分析 (图 5)。

分析可知, 订正前后 27 个站的年平均 SST 趋势发生了明显变化, 主要表现为订正后的海温上升速率显著加强的特征。对于变化趋势, 本文还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 :

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

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 $r_{0.05} = 0.273$, $r_{0.01} = 0.354$ 。从表 3 可以看出订正前后线性趋势的显著性水平也大幅提高, 几乎都超过了 0.01 的显著性水平。其中秦皇岛站、小长山站、石浦站和三沙站的 SST 上升速率增加最为显著, 增幅达 $0.09^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。这与同一气候区的气温和海温呈显著性变化的结论是一致的^[25-29]。

表 3 中国沿海海洋观测站年平均 SST 序列订正前后的气候变化趋势特征

Table 3 the characters of warming trend of Raw (dashed line) and adjusted (solid line) mean annual SST curves for the all SST series along coast of the China Seas

站名	线性趋势比较 ($^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$)		趋势显著性比较	
	订正前	订正后	订正前时间与变量间的相关系数*	订正后前时间与变量间的相关系数*
秦皇岛	0.17	0.26	0.50	0.71
芷锚湾	0.16	0.23	0.46	0.68
小长山	0.16	0.25	0.38	0.55
塘沽	0.08	0.13	0.28	0.49
老虎滩	0.20	0.22	0.47	0.53
龙口	0.15	0.24	0.40	0.69
烟台	0.09	0.15	0.28	0.40

石岛	0.142	0.14	0.37	0.35
千里岩	0.14	0.17	0.34	0.38
小麦岛	0.20	0.22	0.50	0.53
连云港	0.15	0.21	0.45	0.56
石浦	0.15	0.26	0.43	0.63
大陈	0.14	0.19	0.40	0.51
坎门	0.14	0.19	0.41	0.50
平潭	0.13	0.19	0.30	0.42
崇武	0.13	0.17	0.38	0.49
厦门	0.17	0.18	0.54	0.55
三沙	0.09	0.21	0.26	0.51
北海	0.09	0.15	0.45	0.67
海口	0.09	0.14	0.44	0.77
碓洲	0.17	0.16	0.38	0.59
清澜	0.08	0.16	0.41	0.64
涠洲	0.08	0.10	0.48	0.78
云沃	0.08	0.11	0.51	0.65
遮浪	0.14	0.15	0.32	0.72
闸坡	0.13	0.16	0.52	0.69
东山	0.08	0.15	0.45	0.67

*相关系数 $r_{0.05}=0.273$, $r_{0.01}=0.354$

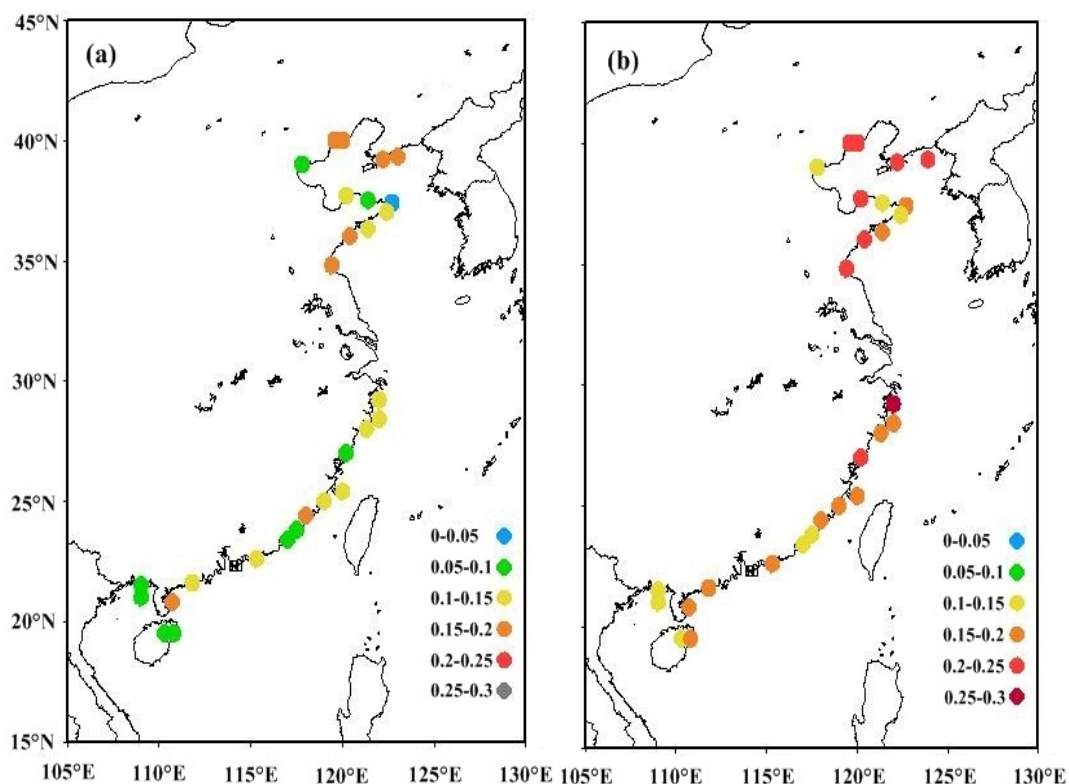


图 5 1960-2011 年中国沿海海洋观测站订正前(a)、后(b)年平均 SST 变化趋势

Figure 5 Trend in annual mean SST series during 1960-2011 of 28 oceanic observational stations along coast of the China Seas

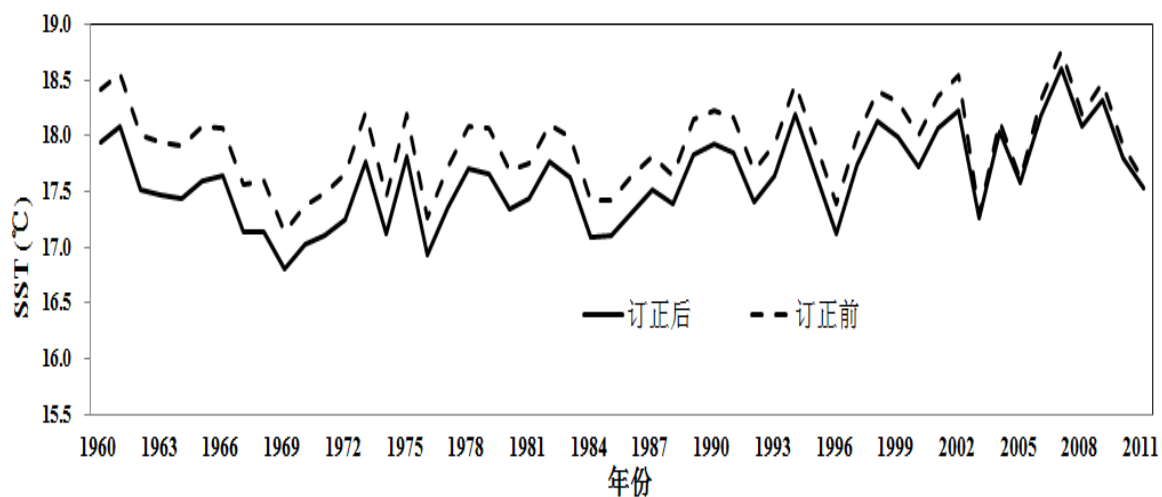


图 6 中国沿海地区海洋观测台站订正前后年平均海表温度序列

Figure 6 annual mean SST curves for the average of the all coastal observation stations along the China Seas before and after adjustment

就中国沿海平均而言，订正前中国沿海年平均 SST 在 2002 年以前显著偏高，整体 SST 增暖速率偏低；订正后，2002 年以前的 SST 显著提高，表明订正后的

SST 序列修正了早期人工观测造成的 SST 偏高，中国沿海年平均 SST 增暖速率明显加大，从订正前的 $0.06^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 上升到 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

3 结论和讨论

通过分析月平均 SST 非均一性检验的结果，发现中国沿海 SST 资料存在非气候因素造成的资料不连续问题，主要结论如下：

- (1) 中国沿海长时间序列的海洋台站都存在非均一性问题，非均一的台站中存在 1~2 个间断点的台站最为普遍，所占的比例最大。
- (2) 人工观测转自动观测，仪器变更，迁站和环境变化是造成中国沿海 SST 非均一的主要原因。沿海台站的均一化订正很大程度上避免了因海温测量仪器和方法变更以及站址迁移和环境变化所引起的非均一性。月平均 SST 序列负订正值的比例远高于正订正值的比例，其中 SST 均一化订正过程很大程度上纠正了由于人工观测造成的 SST 偏高^[19]。
- (3) 订正前后中国沿海海洋站年平均 SST 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。全海域平均年平均 SST 变化趋势由订正前的 $0.06^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 上升到 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

本研究是应用 PMT 检验方法对月平均 SST 资料进行均一性检验的初步试验，虽然取得了较为满意的结果，但是由于海洋观测站本身的特殊性，其数量稀疏且通常沿海岸线分布，难以找到可用的临近台站来制作参考序列。这一情况不仅存在于中国，在其他沿海国家也存在类似的情况。在这种情况下我们采用均一化的地面气温资料作为替代资料来构建参考序列，这是一种“妥协的办法”，再加上元数据信息、检验方法、统计分析以及主观分析判断等多种因素的影响，因此均一化结果必然存在一定的不确定性。未来需要对该检验方法进行多个实验的测试和改进，同时仍需提高元数据信息的质量和可信度，以期待均一化的结果更加接近事实。

对于因序列较短或资料缺测较多的海洋台站 SST 序列（主要分布在黄海南部和东海北部沿岸，未来将选取新的均一性检验与订正方法进行检验，以期得到完整的中国沿海均一化 SST 资料。虽然本文对中国沿海 SST 序列进行了均一化检验并给出了订正结果和非均一性成因分析，但海洋领域资料均一化的

检验和订正工作还是一个相对初步的工作。我们将在本研究工作的基础上深入开展其他海洋水文要素如海水盐度和海平面高度的均一性研究

参考文献

- [1] Bao B, and Ren G Y. Climatological characteristics and long-term change of SST over the marginal seas of China [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 77: 96-106.
- [2] Liu Qinyu and Zhang Qi. 2013. Analysis on long-term change of sea surface temperature in the China Seas [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 12(2): 295-300.
- [3] Yeh S W and Kim C H. Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation [J]. *Continental Shelf Research*, 2010,30: 1428-1434.
- [4] Ribeiro S, Caineta J, Costa A C. Review and discussion of homogenization methods for climate data [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 1-13.
- [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, 18:1493-1517.
- [6] 李庆祥. 气候资料均一性研究导论[M]. 北京, 气象出版社, 2011: 47-57.
Li Qingxiang. Homogenization of climate data [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 47-57.
- [7] Lin C L, Su J L, Xu B R, et al. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai sea and influence on its ecosystem[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49: 106-113.
- [8] 方国洪, 王凯, 郭丰义等.近 30 年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33 (5): 515-525.
Fang Guohong, Wang Kai, Guo Fengyi, et al. Long-term changes and interrelations of annual variations of the hydrographical and meteorological parameters of the Bohai Sea during recent 30 years [J]. *Oceanologica et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 515-525.

- [9] 吴德星, 李强, 林霄沛. 1990-1999 渤海 SSTa 年际变化的特征[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35 (2): 173-176.
- Wu Dexing, Li Qiang, Lin Xiaopei. The characteristics of the Bohai Sea SST anomaly interannual variability during 1990-1999[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(2): 173-176.
- [10] 李庆祥, 李伟. 近半个世纪中国区域历史气温网格数据集的建立[J]. 气象学报, 2007, 65 (2): 293-300.
- Li Qingxiang, Li Wei. Construction of the gridded historic temperature dataset over China during the recent half century[J]. Acta Meteorologica Sinia, 2007, 65(2): 293-300.
- [11] Li Q X, Peng J D and Shen Yan. Development of China homogenized monthly precipitation dataset during 1900-2009[J]. Journal of Geographic Science, 2012, 22(4): 579-593.
- [12] Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118 (15): 8197-8207.
- [13] Xu W H, Li Q X, Wang X L., et al. Homogenization of Chinese daily surface air temperature and analysis of trends in the extreme temperature indices[J]. J. Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(17): 9708-9720.
- [14] 朱亚妮, 曹丽娟, 唐国利, 等. 中国地面相对湿度非均一性检验及订正[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11 (6): 379-386.
- Zhu Yani, Cao Lijuan, Tang Guoli, et al. Homogenization of surface relative humidity over China [J]. Advances in Climate Change, 2015, 11(6): 379-386.
- [15] 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.
- [16] Wang X L, Wen Q H, Wu Y. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. Journal of Applied Meteorological Climatology, 2007, 46(6): 916-931.

- [17]李琰,牟林,王国松,等.环渤海沿岸海表温度资料的均一性检验与订正.海洋学报,2016,38(3):27-39.
- Li Yan, Mu Lin, Wang Guosong, et al. The detecting and adjusting of the sea surface temperature data homogeneity over coastal zone of circum Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(3): 27-39.
- [18]Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data. J. Climatology, 1986, 6, 661-675.
- [19]Reeves J, Chen J, Wang X L, et al. A review and comparison of change point detection techniques for climate data [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46: 900-915.
- [20]Wang X L, Feng Y. RHtest V4 user manual [EB/OL]. 2013. <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>.
- [21]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.
- Zhang Gaojie, He Jinhai, Zhou Zijiang, et al. Homogeneity study of precipitation data over China using RHtest method [J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(6): 915-921.
- [22]孙湘平.中国近海区域海洋[M].北京,海洋出版社,2006:201-228.
- Sun Xiangping. China Offshore Area[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 201-228.
- [23]Stephenson T S, Goodess C M, Haylock M R, et al. Detecting inhomogeneities in Caribbean and adjacent Caribbean temperature data using sea-surface temperatures[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113, D21116,1-17.
- [24]任国玉,张爱英,初子莹等.我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法[J].气象科技,2010,38(1):78-85.
- Ren Guoyu, Zhang Aiying, Chu Ziying, et al. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(1): 78-85.
- [25]崔宜少,李建华,丛美环,等.威海气象站年平均气温等气候要素资料的非

- 均一性检验[J]. 应用气象学报, 2006, 17 (4): 511-512.
- [26] 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.
- Tan Hongjian, Cai Rongshuo, Huang Ronghui. Enhanced responses of sea surface temperature over offshore China to global warming and hiatus[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(6): 500-507.
- [27] 司鹏, 郝立生, 罗传军, 等. 河北保定气象站长序列气温资料缺测记录插补和非均一性订正[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13 (1): 41-51.
- Si Peng, Hao Lisheng, Luo Chuanjun, et al. The Interpolation and homogenization of long-term temperature time series at Baoding observation station in Hebei Province [J]. *Climate Change Research*, 2016, 13(1): 41-51.
- [28] Baoleerqimuge Bao and Guoyu Ren. Climatological characteristics and long-term change of SST over the marginal seas of China [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 77: 96-106.
- [29] Guoyu Ren, Yihui Ding, and Guoli Tang. An overview of Mainland China temperature change research[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31: 1-16.