

## 泉州沿海海水表层温度分析

杨凡, 郑崇荣, 陈竞武, 刘保清, 姚睿, 李光毅

(国家海洋局崇武海洋环境监测站, 福建 泉州 362000)

**摘 要:** 根据泉州沿海的崇武验潮站和晋江验潮站的海水表层温度资料, 统计分析泉州沿海的 SST。结果表明: 泉州沿海 SST 月平均的年变化都呈单峰型。两月 SST 之间的变化, 与本月 SST 和上月气温之差有很大关系。泉州沿海 2—9 月为增温期, 其中 4—5 月的增温速率最快, 在 9 月达到高峰; 9 月—翌年 2 月为降温期, 其中 11—12 月的降温速率最快。经过最大熵谱分析分析得出, 泉州沿海 SST 同时存在多种形式的周期振荡, 而且南北两站的周期振荡也存在着一一定的差异。两站的年平均 SST 变化趋势基本一致, 极值 SST 出现时间基本相同。

**关键词:** 泉州验潮站; 海水表层温度; 最大熵谱分析; 变化趋势

**中图分类号:** P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)04-0075-07

### 1 引言

随着时代的发展变化, 人们对海洋资源的开发利用越来越多, 因全球气候变暖而导致的海平面上升、赤潮爆发和厄尔尼诺等现象的出现, 给人类的生存环境带来的危害也越来越明显。科学家们通过对这些现象的深入了解研究, 发现海水表层温度 (Sea Surface Temperature, SST) 与这些现象有着密切的联系, 因此, 研究 SST 的变化规律是很有必要的。泉州沿岸海域分布着海水养殖、滨海旅游等产业, 同时也是赤潮高发区, 赤潮爆发这些产业影响很大。SST 是赤潮发生的重要环境因子<sup>[1]</sup>, 通过找出泉州沿海 SST 的变化规律, 为 SST 预报提供数据支撑, 提高预报精度, 对泉州的海洋防灾减灾能力建设以及海洋经济发展有着重要的现实意义。

本文收集了国家海洋局在泉州沿海布设的两个海洋观测站常年观测到的 SST 资料, 并对这些资料进行统计分析和研究, 探索近 10 年来泉州沿海 SST 的变化特征及变化趋势。

### 2 资料收集与处理

本文由北向南选取了分别位于崇武、晋江的两个固定验潮站的 SST 观测资料作为研究对象。SST 资料选用日、月、年平均值, 崇武站资料序列长度为 10 a (2007—2016 年), 由于晋江验潮站建站较晚, 因此 SST 观测资料序列长度为 7 a (2010—2016 年)。本文所有观测资料的采集和处理过程都严格按照《海滨观测规范》来进行, 所用的资料规范、准确并且具有代表性。

### 3 泉州沿海 SST 的时空分布

#### 3.1 泉州沿海 SST 测量站位分布

泉州沿海的两个固定验潮站分布如图 1。

#### 3.2 泉州沿海 SST 季节变化特点

根据东海区海洋的特点, 季节按照如下来划分<sup>[2]</sup>, 冬季为 1—3 月, 春季为 4—6 月, 夏季为 7—9 月, 秋

收稿日期: 2017-09-01; 修回日期: 2017-11-06。

基金项目: 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室基金 (MATHAB201802)。

作者简介: 杨凡 (1991-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋预报工作。E-mail: 18965672991@163.com

通讯作者: 郑崇荣 (1979-), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事海洋生态环境监测与评估、生态修复工作。E-mail: youcare123@126.com

季为10—12月。图2为崇武站2007—2016年冬季、春季、夏季、秋季4个季节的SST距平变化曲线。由图中可知,各个季节的SST呈现准周期性波动,夏季SST自2011年以后周期性明显,正负距平以1 a为周期交替出现,晋江站SST和崇武站SST的季度变化规律基本相似。崇武站春、夏、秋、冬的多年平均SST分别为21.3℃、26.5℃、20.3℃、13.2℃,晋江站春、夏、秋、冬的多年平均SST分别为21.4℃、26.6℃、20.6℃、13.4℃。综合分析两站的SST数据,得出泉州沿海的SST季节变化规律如下:

春季是从冬天向夏天的过渡季节,随着太阳辐射的不断增强,泉州沿岸的SST普遍升高;两站月平均SST总体上呈南高北低的分布特征,但南北相差不大。

夏季随着太阳辐射的进一步增强,泉州沿海SST进入一年中高温阶段,9月为全年各月中SST最高的月份。崇武和晋江两站月平均SST总体上同样呈南高北低的分布特征。

秋季随着太阳辐射强度逐渐减弱,南下冷空气的影响逐渐加强,泉州沿海SST也逐渐降低,秋季多年平均SST与夏季相比崇武降温5.4℃,而晋江

降温幅度为5.2℃,崇武降温幅度最大。

冬季为泉州沿海SST最低的季节,多年月平均SST最低值出现在2月,崇武站为12.7℃,晋江站为12.8℃。

通过上述分析得出,泉州沿海SST完全呈现随纬度降低而升高的分布规律。

### 3.3 多年月平均SST变化趋势

#### 3.3.1 多年月平均SST的统计分析

本文采用 $\chi^2$ 检验对月平均SST的正态分布假设进行了检验,通过了置信度为0.05假设性检验。因此,可认为泉州沿海月平均SST符合正态分布:

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left[-\frac{(T-\bar{T})^2}{2\delta^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\bar{T}$ 为多年月平均SST, $\delta^2$ 为方差,可通过式(2)、(3)求得:

$$\bar{T} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2)$$

$$\delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2 \quad (3)$$

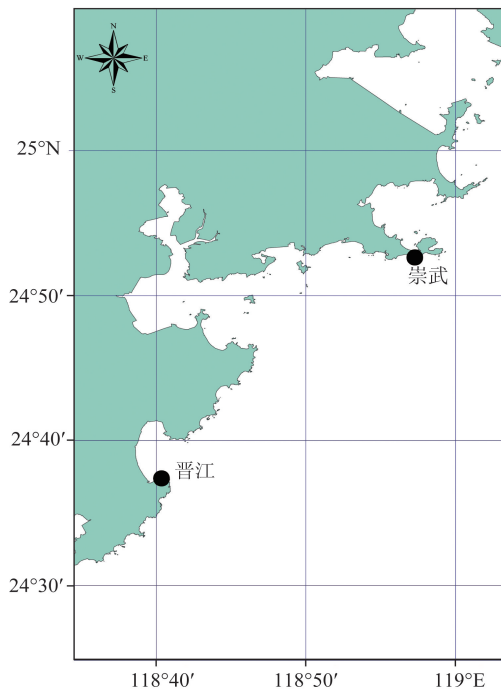


图1 泉州沿岸站点分布图

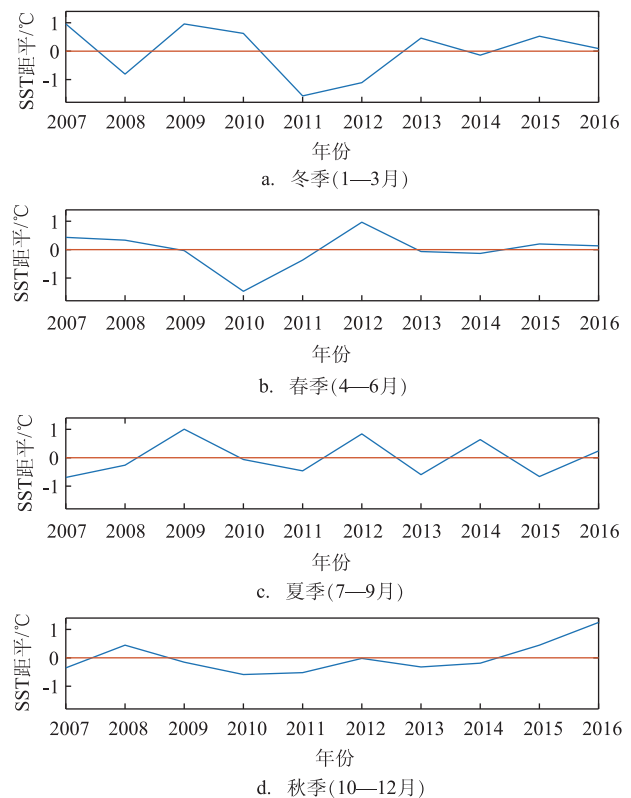


图2 崇武站季度平均SST距平逐年变化趋势

崇武和晋江多年各月月平均 SST 及均方差如下表 1。统计表明:崇武站 6、7、12 月及晋江站 9 月的月平均 SST 的差异较小,这为站点所在海区的 SST 预报工作提供了方便。

由图 3 可知,崇武站和晋江站 2—9 月为增温期,其中 4—5 月的增温速率最快,在 9 月达到高峰;9 月—翌年 2 月为降温期,其中 11—12 月的降温速率最快,在翌年 2 月达到低谷。泉州沿岸月平均 SST 呈现一峰一谷的年变化特征,与月平均气温的年变化规律一致(见图 4)。夏华勇等<sup>[3]</sup>在研究广西沿海 SST 时,发现广西两旬间的 SST 变化主要取决于本旬气温与上旬 SST 之差,因此本文探讨泉州沿海两月间 SST 变化是否也有类似的规律。

水温控制方程<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = A_T \nabla^2 T + \frac{Q}{C_w \rho_w h} \quad (4)$$

式中:  $Q$  为海面热通量,  $C_w$  为海水比热,  $\rho_w$  为海水密度,  $h$  为水深。由于海面热通量计算较为复杂,所以利用王宗山<sup>[5]</sup>提出的简易表达公式,可以假

设出表层月平均 SST 与月平均气温之间的关系为:

$$T_w - T_w^* = c_1 + c_2(T_a - T_w^*) \quad (5)$$

式中:  $T_w$  为本月 SST,  $T_w^*$  为上月 SST,  $T_a$  为本月气温,  $c_1$  和  $c_2$  为待定系数。

以 1—2 月、4—5 月、7—8 月和 10—11 月分别作为冬季、春季、夏季和秋季的代表月份,分析两月之间的 SST 差( $T_w - T_w^*$ )与本月气温与上月 SST 之差( $T_a - T_w^*$ )的相关系数。以崇武站为例,该站 4 个季节的( $T_w - T_w^*$ )与( $T_a - T_w^*$ )相关系数分别为:0.83、0.74、0.60、0.62,相关性较好。

通过分析可以看出,崇武站在冬季相关系数最大,春季和秋季次之,在夏季相关系数略小。由于冬季的太阳辐射较弱,气温日变化幅度较小,SST 的日变化幅度也较小,而两月之间的 SST 之差与本月气温与上月 SST 之差的相关性大小取决于本月 SST 和本月气温,所以在冬季的相关性最好;而夏季强烈的太阳辐射导致气温的日变化幅度大,但 SST 的日变化幅度较小,故在夏季相关性略差。

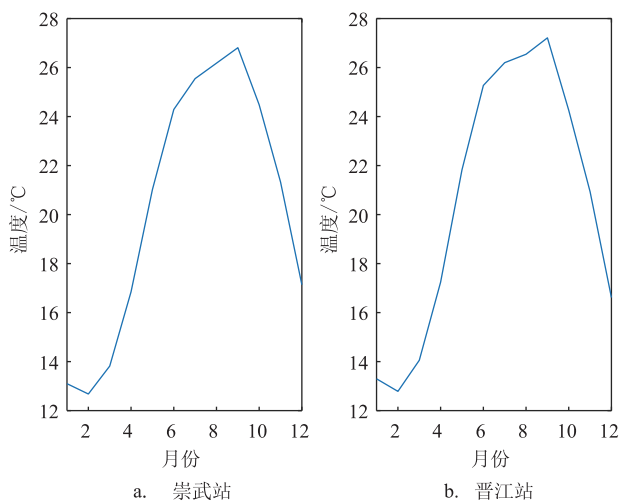


图3 两站多年各月月平均 SST

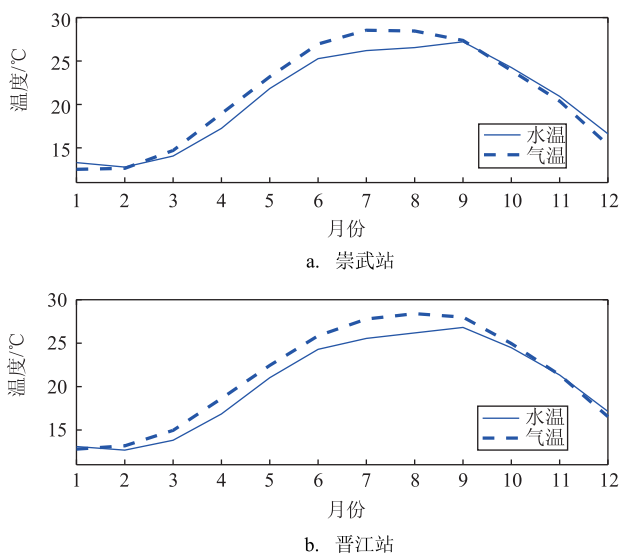


图4 两站多年月平均 SST 与气温

表1 多年各月月平均 SST 及均方差(单位:℃)

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
崇武	T	13.1	12.7	13.8	16.9	21.0	24.3	25.6	26.2	26.8	24.5	21.3	17.1
	δ	0.7	1.6	0.9	0.7	0.9	0.6	0.6	0.8	0.7	0.7	1.0	0.6
晋江	T	13.3	12.8	14.1	17.2	21.8	25.3	26.2	26.5	27.2	24.3	20.9	16.6
	δ	0.9	1.1	0.9	0.8	1.1	0.7	0.8	0.9	0.4	0.8	1.2	0.8

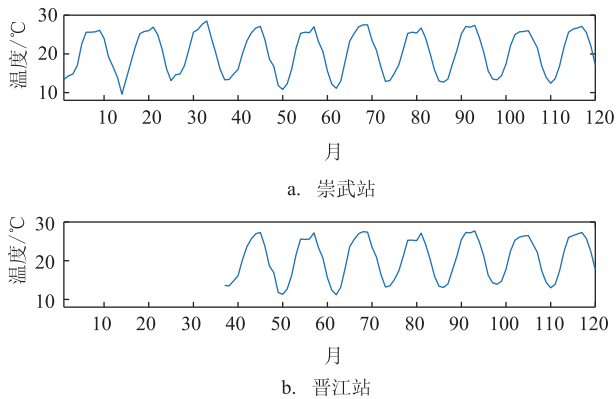


图5 两站月平均 SST 时间序列

由于晋江站的 SST 时间序列较短,为了便于和崇武站比较,我们将两站的数据画在相同时间长度的坐标轴上。由图 5 可知,从 2010 年至今,晋江和崇武两站的月平均 SST 年变化趋势类似于正弦曲线。崇武站和晋江站多年月平均 SST 的均方差分别为 5.34、5.48,晋江站各月月平均 SST 之间的差距比较大。这是因为晋江站地处深沪湾内,陆源入海水系对其影响较大,而崇武站位于崇武半岛的岬角,受外海水影响较大,但外海 SST 变化较小,因此,其月平均 SST 变化幅度较晋江站要小一些。

### 3.3.2 月平均 SST 的显著周期分析

SST 时间序列通常有着复杂的周期性变化。使用频谱分析技术来研究周期性现象最为常用,其主要方法是通过对一复合的波系进行数据变换,将其分解成若干振幅和相位不同的简谐波,并找出其中振幅最大的波,即该复合波中的主要频率<sup>[6]</sup>。为了客观的分析泉州海域 SST 场的变化周期,我们使用 Burg 等<sup>[7-8]</sup>在 1967 年提出的按照最大熵外推相关函数的谱分析法——最大熵谱估计方法(MEM)来对崇武和晋江两个站点的月平均 SST 进行分析,找出其 SST 场振动的主要周期。理论分析和实验结果都已表明<sup>[9]</sup>,用最大熵谱分析方法可得到分辨率很高的、平滑的功率谱估计值,对于崇武和晋江两站观测数据长度较短的情况,这种方法比常规的谱分析方法更具有明显的优越性。

信号  $x$  的概率密度函数为  $p(x)$ , 其熵为:

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx \quad (6)$$

式中:  $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ ,  $\delta^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx$ 。

根据信息论中有关熵的原理,我们可以推导出最大熵谱估计的表达式为<sup>[10]</sup>:

$$P_x(\omega) = P_{ME}(\omega) = \frac{\delta^2}{\left| 1 + \sum_{m=1}^M a_m e^{-j\omega m} \right|^2} \quad (7)$$

式中:  $m$  为自回归阶数,  $a_m$  为自回归系数,  $\omega$  为频率,  $j = \sqrt{-1}$ , 是虚数单位。只要求得这些系数,就能计算出最大熵谱密度,谱密度存在峰值点的地方所对应的周期,即为信号中所隐含的周期。

本文采取最大熵谱分析方法,对崇武站 10 a、晋江站 7 a 的月平均 SST 距平序列 (SSTA 序列) 进行周期分析,其中崇武站资料序列长度为 120 个,晋江站资料序列长度为 84 个。分析结果如图 6 所示,通过红噪声标准谱检验后,得出的主要显著周期见表 2。

最大熵谱分析方法的结果表明:崇武站和晋江站的 SST 变化都以年周期为主。此外,崇武站还有 1.9 a、2.7 a、3.6 a 和 8.5 a, 晋江站还有 2 a 和 10.7 a 的周期振荡。

崇武站存在着明显的 3.6 a 周期振荡,可将其视为准 3.5 a 的周期振荡,该周期振荡与厄尔尼诺现象有关,与北太平洋副高、沃克环流和赤道海温共有的振荡周期基本一致。季劲钧<sup>[11]</sup>的研究表明,这种年际振荡是由低纬度海气环流相互作用所产生的。

晋江站存在明显的 10.7 a 周期振荡,可将其视为准 11 a 的周期振荡。该周期振荡的产生原因,很多学者都有研究。汤明义等<sup>[12]</sup>研究指出,我国东海黑潮途经的海域 SST 存在 10~11 a 的准周期变化。杜碧兰等<sup>[13]</sup>在分析西太平洋副高面积指数主要周期时也发现准 11a 的周期,也称黑子周期,该周期振荡被认为与太阳活动有关。

崇武和晋江均存在准 2 a 振荡周期 (Quasi Biennial Oscillation, QBO)。“QBO”是一种赤道附近地区平流层低层风场的准周期变化现象。杜碧兰等<sup>[13]</sup>的研究指出,东海区月平均 SST 存在 2.2 a 的周期振荡。

而 1 a 以下的高频振荡在崇武站和晋江站都存在。1997 年,阎俊岳等<sup>[14]</sup>研究东海及邻近海区百年来的 SST 变化时得出结论:东海及邻近海区的月均资料有 1 a 以下的周期,这与热带地区普遍存在的 30~60 a 的振荡有关联。郭伟其等<sup>[15]</sup>研究人员指

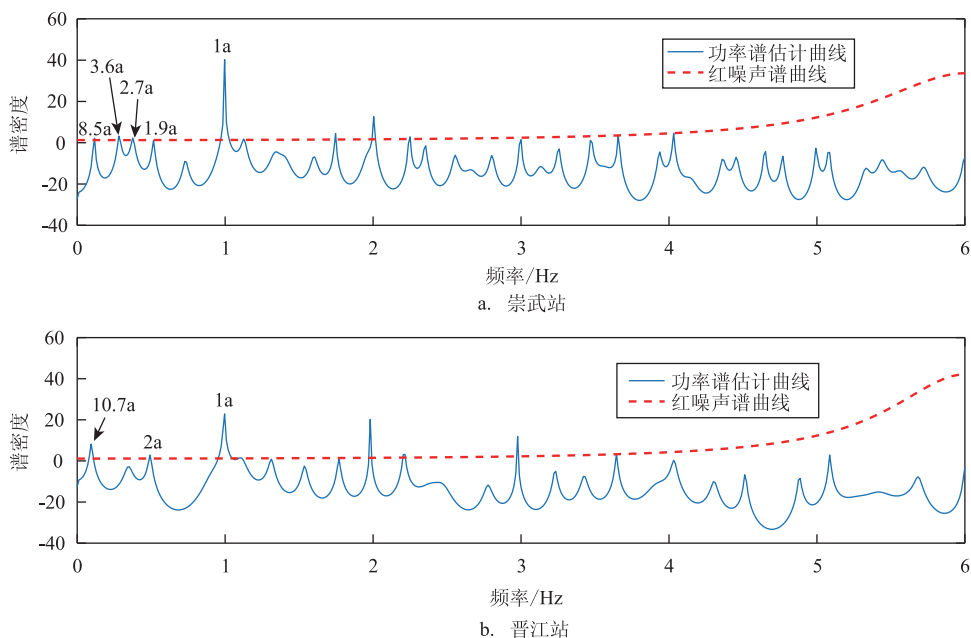


图6 两站月平均SST序列的功率谱

表2 各站SST变化的主要显著周期

站点	周期/a
崇武	8.5, 3.6, 2.7, 1.9, 1
晋江	10.7, 2, 1

出,东海海区普遍存在的1 a以下高频振荡,主要与大气中的能量交换、海气相互作用、海陆相互作用有关。

### 3.4 年平均SST的变化趋势

泉州沿海的年平均SST总体上随着纬度的增大而减小(见图7)。崇武和晋江两个站点SST年平均变化规律基本相似。

由图7中可以看到,2011年是近10年来泉州沿海SST最低的一年,这与2011年发生的强拉尼娜现象有关系。2013—2016年两站的年平均SST呈现

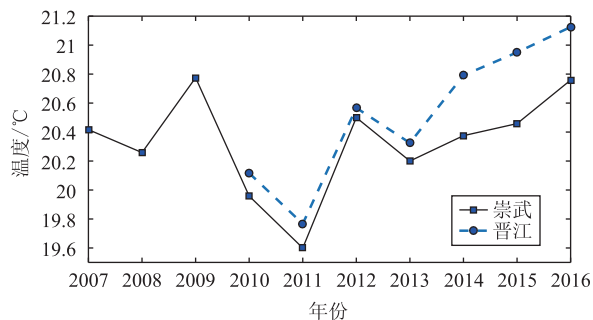


图7 崇武站和晋江站年平均SST

出逐年升高的趋势。

### 3.5 极值SST的统计

崇武站(2007—2016年)和晋江站(2010—2016年)的极值SST如表3,由统计数据可知两站极值SST出现的时间如下:

崇武站:10 a(2007—2016年)最高SST出现在

表3 崇武站、晋江站极值SST(单位:℃)

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
崇武	最高	17.4	16.5	18.0	22.0	27.0	28.1	28.9	30	30.4	28.4	25.1	20.5
	最低	9.2	7.9	10.3	12.6	17.2	21.0	23.9	23.7	24.7	19.7	16.5	12.3
晋江	最高	16.6	16.7	17.2	22.7	25.7	28.4	29.6	29.7	30.0	28.6	24.5	21.2
	最低	9.8	9.6	10.8	13.0	17.5	21.3	23.7	23.2	25.1	19.5	17.6	12.7



2012年9月10日,为30.4℃;年最低SST出现在2008年2月11日,为7.9℃,其次为2011年1月31日,为9.2℃。

晋江站:7年(2010—2016年)最高SST出现在2012年9月12日,为30.0℃;年最低SST出现在2011年2月1日,为9.6℃。

由统计资料可知,崇武和晋江两站的极值SST出现时间基本一致。

## 4 结论

(1)崇武和晋江两站的月平均SST符合正态分布,泉州沿海SST符合南高北低的分布特点,但南北相差不大;

(2)泉州沿海SST与气温的变化趋势一致,两月间的SST变化与本月气温和上月SST间的温度差相关性较为显著,相关系数在0.60~0.83之间,在冬季相关系数最大,夏季相关系数最小;

(3)两站的SSTA序列最大熵谱分析结果显示,泉州沿海SST主要存在11a左右的太阳黑子周期振荡,与厄尔尼诺现象有关的3.5a周期振荡,准2a的“QBO”周期振荡以及1a以下的高频周期振荡。由于地理位置差异等原因,两站之间的振荡周期还是存在差异的;

(4)由数据统计分析可知,两站的年平均SST变化趋势基本一致,极值SST出现时间基本相同。

## 参考文献:

- [1] 高波,邵爱杰.我国近海赤潮灾害发生特征、机理及防治对策研究[J].海洋预报,2011,28(2):68-77.
- [2] 陈上及,何维焕,姚湜予,等.中国近海海洋水文气候季节的划分[J].海洋学报,1992,14(6):1-11.
- [3] 夏华永,古万才.广西沿海海洋站观测海水温度的统计分析[J].海洋通报,2000,19(4):15-21.
- [4] 黄子眉,李小维.广西沿海海水表层温度分析[J].广西科学,2008,15(4):456-460.
- [5] 王宗山.海面热量平衡计算的简易方法[J].海洋通报,1983,2(4):22-25.
- [6] 吴顺君.近代谱估计方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,1994.
- [7] Burg J P. Maximum entropy spectral analysis[D]. Stanford: Stanford University, 1975: 5-42.
- [8] 全黎熙,张旭臣,王燕.水文时间序列的最大熵谱分析与优化方法[J].广东水利水电,2012,(8):8-12.
- [9] 李甦.有限长观测数据的最大熵谱分析与算法[J].云南大学学报(自然科学版),1995,17(1):93-99.
- [10] 唐洁.功率谱分析方法在周期分析中的应用[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2013,29(5):71-74,78.
- [11] 季劲钧.海洋大气耦合系统中多年振荡的理论[J].中国科学,1981,(10):1248-1259.
- [12] 汤明义,尹杰,曲如美,等.东海黑潮途经海域岛屿测站表面海温年变化及年际变化特征[J].海洋学报,1994,16(3):12-20.
- [13] 杜碧兰,张建华,袁小军.东海及其外缘海域表层海水温度的谱分析[J].海洋预报服务,1984,(1):1-8.
- [14] 阎俊岳,李江龙.东海及邻近地区百年来的温度变化[J].海洋学报,1997,19(6):121-126.
- [15] 郭伟其,沙伟,沈红梅,等.东海沿岸海水表层温度的变化特征及变化趋势[J].海洋学报,2005,27(5):1-8.

## Analysis of sea surface temperature at Quanzhou coastal area

YANG Fan, ZHENG Chong-rong, CHEN Jing-wu, LIU Bao-qing, YAO Rui, LI Guang-yi

*(State Oceanic Administration Chongwu Marine Environmental Monitoring Station, Quanzhou 362000 China)*

**Abstract:** Sea surface temperature (SST) at Quanzhou coastal waters was statistically analyzed based on the relevant data collected by Chongwu tide station and Jinjiang tide station. The results showed that monthly averaged SST in Quanzhou coastal waters presented a single-peak pattern. The variations between the two conjoint months were closely related to the difference between the SST at this month and the air temperature at the last month. The SST increases from February to September, with a fastest increasing rate at April and May and the highest value at September. The SST decreases October to the following February, with a fastest cooling rate at November and December. The maximum entropy spectrum analysis showed that there exists simultaneously various forms of periodic oscillations of SST and there were some differences in the periodic oscillations between the two stations. The variation trends of annual average SST at the two station were basically the same with their extreme SST almost appearing at the same time.

**Key words:** Quanzhou tide station; seawater surface temperature; maximum entropy spectrum analysis; trend