

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.04.28

引用格式: 王平,毛克彪,孟飞,等. 中国东海海表温度时空演化分析[J]. 国土资源遥感,2020,32(4):227-235. (Wang P, Mao K B, Meng F, et al. Spatiotemporal evolution of sea surface temperature in the East China Sea [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020,32(4):227-235.)

中国东海海表温度时空演化分析

王平¹, 毛克彪², 孟飞¹, 袁紫晋²

(1. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 济南 250101; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为掌握中国东海 2003—2018 年间海表温度 (sea surface temperature, SST) 变化规律, 分析 SST 变化与气候异常现象之间的联系, 利用遥感数据监测东海 16 a 来 SST 时空演化特征。以 2003—2018 年 MODIS SST 产品为数据源, 先通过最邻近点值替代法对数据进行修复, 并用实测数据进行精度验证, 利用最小二乘法、皮尔逊相关系数分析 SST 变化趋势, 通过互相关分析研究海表温度异常 (sea surface temperature anomaly, SSTA) 与南方涛动指数 (southern oscillation index, SOI) 的相关性。结果表明: ①2003—2018 年东海 SST 总体呈上升趋势, 夏季升温趋势更加明显, 长江口海域升温速度可达 0.042 °C/a 以上; ②东海 SST 呈 SE—NW 分布, 同纬度地区的大陆附近 SST 通常比其东部海域低, 但 4—9 月杭州湾海域 SST 比其东部要高; ③SOI 与滞后其 15 个月内的东海 SSTA 基本不相关, 但与滞后其 21~39 个月的东海 SSTA 呈较强负相关, 相关系数超过 -0.2。研究结果可为掌握气候变化规律、预测极端天气提供参考依据。

关键词: 海表温度 (SST); 时空变化; 东海

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)04-0227-09

0 引言

随着全球变暖, 海表温度 (sea surface temperature, SST) 在不断升高, 其中, 全球各大洋西部地区 SST 变化最明显。东海是太平洋西北地区非常重要的边缘海域, 北临黄海, 东至琉球群岛, 海域广阔, 海表面积为 77 万 km² 左右, 对中国的气候变化影响很大^[1]。作为中国海洋生产力最高的海域, 东海具有较高的水温和较大的盐度, 是鱼虾养殖的理想场所。因此东海温度变化研究对气候变化分析及水产养殖具有重要的指导意义。

SST 变化与气候变化具有一定的响应, 为此许多学者做了大量研究^[2-5]。Robles-Tamayo 等^[6]分析了海表温度异常 (sea surface temperature anomaly, SSTA) 与南方涛动指数 (southern oscillation index, SOI) 的关系; 谭红建等^[7]研究了中国近海 SST 对全球变暖的影响, 结果显示在全球显著变暖的时候, 中

国近海 SST 表现出更加迅速的增温特征; 董雷娟等^[8]对全球 SST 变化进行分析, 结果表明, 全球 SST 的变化趋势是下降-上升-下降-上升。一些学者分析了中国近海 SST 长时间序列变化^[9-10]以及特定年份的 SST 特征^[11]。近年来许多学者对东海 SST 变化进行了研究, 分析其时空变化^[12]及季节变化^[13]。东海作为我国非常重要的海域, 其矿产资源和鱼类资源十分丰富, 渔场分布与 SST 具有密切的联系, 研究 SST 空间分布, 可以为渔业捕捞、海水养殖等提供重要依据^[14-15]。目前对于东海 SST 变化的研究主要是长时间序列以及特定年份, 本文侧重于分析近十多 a 的 SST 变化。

本研究以 MODIS SST 三级产品为数据源, 利用邻近像元对月平均 SST 数据进行修复, 分析东海地区 (N23°00' ~ 33°00', E117°00' ~ 131°00') 2003—2018 年 SST 的时空变化, 及白天和夜间的 SST 变化。通过分析东海 SSTA 和 Niño3.4 区 SSTA 以及 SOI 的互相关性, 分析 SST 和气候变化的关系, 以期

收稿日期: 2020-01-15; 修订日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划重点项目“全国和典型区域低温、高温灾害风险评估与图谱编制”(编号: 2019YFC1510203)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目“高时空分辨率干旱监测关键参数土壤水分反演算法及应用研究”(编号: 1610132020014)共同资助。

第一作者: 王平(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事农业遥感方面的研究。Email: wangping_1997@163.com。

通信作者: 毛克彪(1977-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业遥感、农业大数据方面的研究。Email: maokbiao@caas.cn。

为掌握近 16 a 来东海 SST 变化特点、指导东部地区农业生产提供依据。

1 数据源

遥感数据为 MODIS SST 三级产品,来自美国国家航空航天局的水色卫星网站 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>),空间分辨率为 4 km,研究中使用了 2003—2018 年间白天和夜晚的月平均 SST 数据。MODIS SST 产品采用劈窗算法反演 SST,该算法的反演精度被很多人所认可^[16-17]。李雪丁^[18]用实测浮标 SST 数据检验 MODIS SST 产品在台湾海峡的精度,结果表明,MODIS 遥感与实测 SST 数据的均方根误差为 0.51 ℃,平均偏差为 -0.02 ℃。

SOI 从“气候指南”网站 (<https://climatedataguide.ucar.edu/>) 下载,其可以反映太平洋东、西两侧大气压力变化,与一系列气候异常现象有明确的对应关系。海温实测数据为亚洲东北部地区海洋观测系统 (North - East Asian Regional Global Ocean Observing System, NEAR - GOOS) 区域延时数据库 (Regional Delayed Mode Data Base, RDMDDB) 中的全球 SST 解码数据,用于检验插值后 MODIS SST 产品在东海的适用性。

2 研究方法

2.1 数据修复

目前,SST 主要是利用热红外波段进行反演,由于云层的影响,在反演 SST 时需要去除云覆盖像元,因此,反演出来的 SST 图像存在缺值现象^[19]。这种数据缺值的情况会影响数据分析精度,为了解决这一问题,许多学者进行了大量研究。马寨璞等^[20]利用缺值像元周围各观测站的观测值与背景值之间的差异加权求得修订值;谈建国等^[21]利用相近时间 AVHRR 资料的相对变化率来反演替代云区;毛志华等^[22]综合利用资料插值、平滑、匹配修正,数值内插、曲面拟合和动力方程的数模替补,历史同期标准温度图进行时间域的替补等方法,对云覆盖区域的数据进行修复。东海某些区域存在缺值情况,部分数据缺值严重,为了更好地分析 SST 变化,首先对 2003—2018 年间所有的 SST 数据进行修复。本研究首先对数据进行预处理,包括数据格式、数据类型转换、裁剪等过程,然后利用最邻近点值替代法修复缺值的 SST 数据,最后利用 NEAR - GOOS SST 实测数据对插值后的数据进行精度验证。总体的技术路线如图 1 所示。

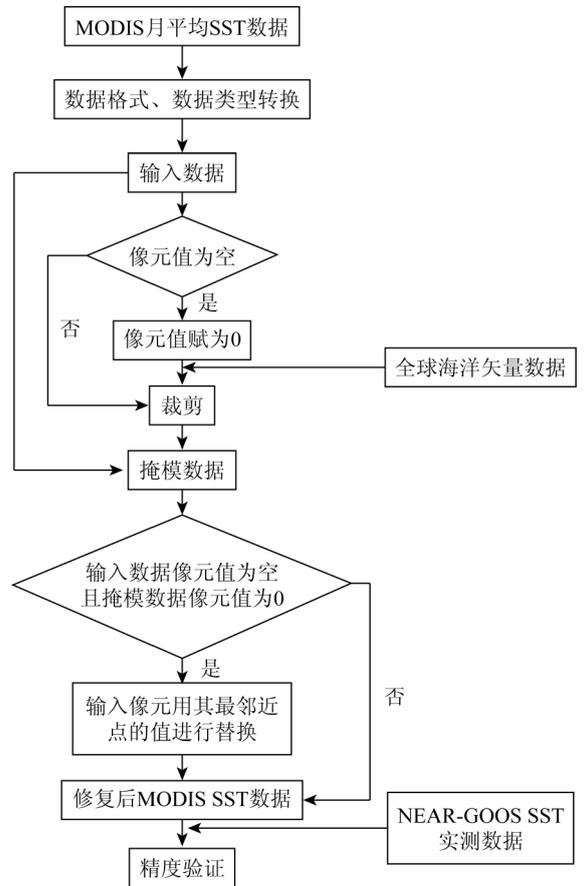


图 1 技术路线

Fig. 1 Technology flow chart

最邻近点值替代法依据地理学第一定律:空间相关性,即距离越近越相似。利用同一时间尺度下邻近区域的像元对数据进行修复,把最邻近点的像元值赋给空值。首先建立一个掩模数据,输入图像中的无效像元在建立的掩模图像中同一位置处有固定的像元值,从而可以识别图像中的无效像元,然后计算邻近像元到该无效像元的欧氏距离,把距离最近的有效像元的像元值赋给无效像元。

2.2 时空变化分析方法

为了更好地分析东海地区 SST 的时空变化情况,描述 SST 在像元尺度上的变化,利用最小二乘法逐像元计算 2003—2018 年间 SST 年际变化率 Slope,即

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (iSST_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n SST_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}, \quad (1)$$

式中: Slope 为 SST 年际变化率; n 为 SST 时间序列的总长度,这里 n 取 16; SST_i 为第 i 年的年平均 SST。当 Slope > 0 时,表明随时间 i 的增加, SST 呈上升趋势;当 Slope < 0 时,表明随时间 i 的增加, SST 呈下降趋势。

皮尔逊相关系数常用来准确度量 2 个变量之间的相关程度,其大小可以反映 2 个变量的相关性强

弱^[23]。本文中,SST 与时间的皮尔逊相关系数 R 表示为:

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n (iSST_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n SST_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n SST_i^2 - (\sum_{i=1}^n SST_i)^2}} \quad (2)$$

相关系数 R 的取值范围为 $[-1,1]$,当 $R > 0$ 时,表示 SST 与时间序列呈正相关;当 $R < 0$ 时,表示 SST 与时间序列呈负相关。且 $|R|$ 越大,SST 与时间序列的相关性越强。

2.3 互相关分析

为了更好地分析东海 SST 与 SOI 及 Niño3.4 区 SST 的关系,利用互相关分析法分析东海 SSTA 与 SOI 及 Niño3.4 区 SSTA 的相关性,从而分析东海

SST 对厄尔尼诺和拉尼娜现象的响应情况。互相关分析可估计 2 个时间序列的相关程度,2 个系列的数据具有一定的延迟,通过变换 2 列数据的延迟数,找出 2 个数据之间的最大相关系数。设 2 个时间序列 $x(i)$ 和 $y(i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$, 它们的滞后数为 $m = 0, 1, 2, \dots, N$, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为 x 和 y 的均值,则两者的互相关系数 r 定义为:

$$r(m) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} [x(i) - \bar{x}][y(i+m) - \bar{y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-m} [x(i) - \bar{x}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N-m} [y(i+m) - \bar{y}]^2}} \quad (3)$$

本研究中, N 为 SST 时间序列的总月数,即 192。

3 结果与分析

3.1 精度验证

插值后 SST 精度验证结果如图 2 所示。

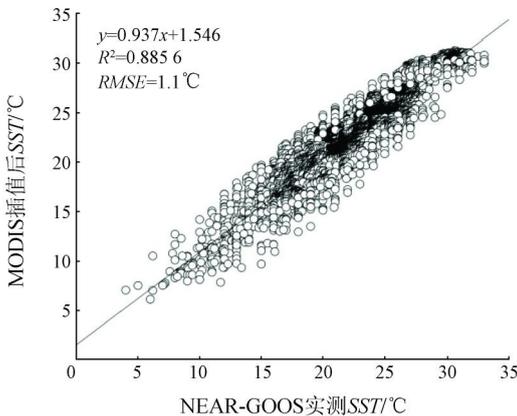


图2 MODIS 插值后 SST 精度验证

Fig. 2 Accuracy of MODIS SST after interpolation

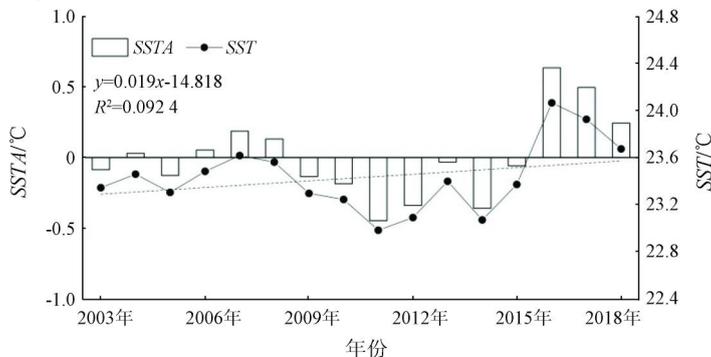


图3 东海 SST 年际变化

Fig. 3 Interannual variation of SST of the East China Sea

利用邻近像元对 MODIS SST 产品进行修复后,通过 NEAR-GOOS 的 SST 实测数据对重构数据进行精度验证。首先,需要对实测数据进行筛选,剔除海温、时间、日期、经纬度范围、数据标号不合法或者重复的数据^[24]。从 SST 精度验证结果可以看到,修复后的 SST 数据与 SST 实测数据的均方根误差为 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, R^2 达 0.88 以上,满足了 SST 时空变化分析的精度要求。

3.2 东海 SST 年际变化

图 3 为东海 SST 年际变化。从图 3 中可以看到,2003—2018 年间东海 SST 总体呈上升趋势,2016 年 SST 最高,为 $24.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,2011 年 SST 最低,为 $23.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图中还可以看到东海 SST 年际变化十分明显,有显著高的年份,也有显著低的年份。2007—2011 年间 SST 一直处于下降的状态,之后在 2014—2016 年间 SST 又迅速升高,2016 年之后 SST 又有所下降。从总体上看,SST 是不断波动变化的,有些年份变化比较平缓,有些年份变化比较剧烈。从 SSTA 变化中可以看到,2009—2015 年间东海 SSTA 一直处于负值的状态。

为了更直观地体现东海 SST 逐年变化,绘制了 SST 变化趋势空间分布图(图4)。从图中可以看到,2003—2018年间,东海大部分海域年均 SST 呈上升趋势,长江口海域的增温率最高,可达 0.042 °C/a 以上。部分区域平均 SST 呈下降趋势,主要包括东海北部以及东北部地区,但降温幅度和范围远小于

增温幅度和范围。SST 随时间变化的相关系数空间分布与 SST 变化趋势空间分布大致相同,SST 升温(降温)幅度越大,SST 变化与时间变化的正(负)相关性越强。东海大部分海域 SST 与时间呈正相关,长江口海域 SST 变化与时间的相关性最强,可达 0.653 以上。

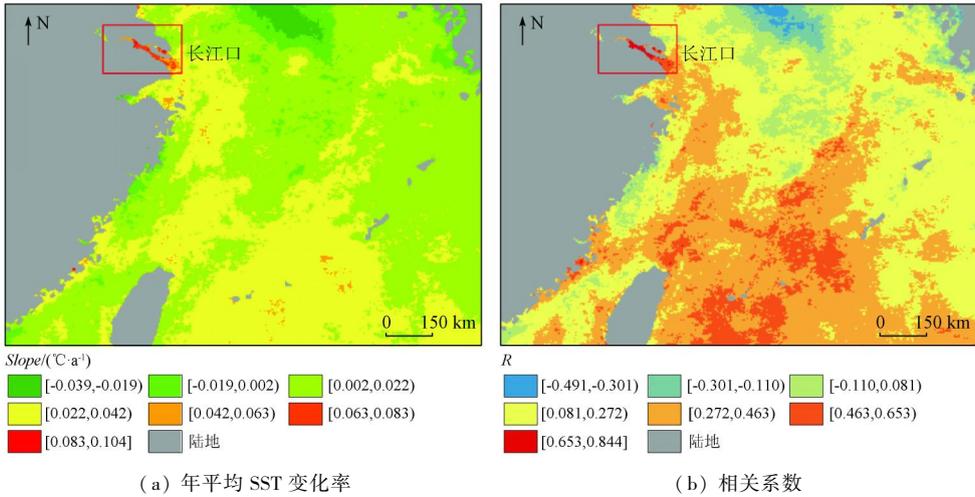


图4 2003—2018年东海年平均SST变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual average SST change trends in the East China Sea from 2003 to 2018

为了分析 SST 的季节变化,将所有数据进行季节划分:3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为

秋季,12—2月为冬季,同时绘制各季节 SST 变化折线图(图5),并统计各季节 SST 变化趋势(表1)。

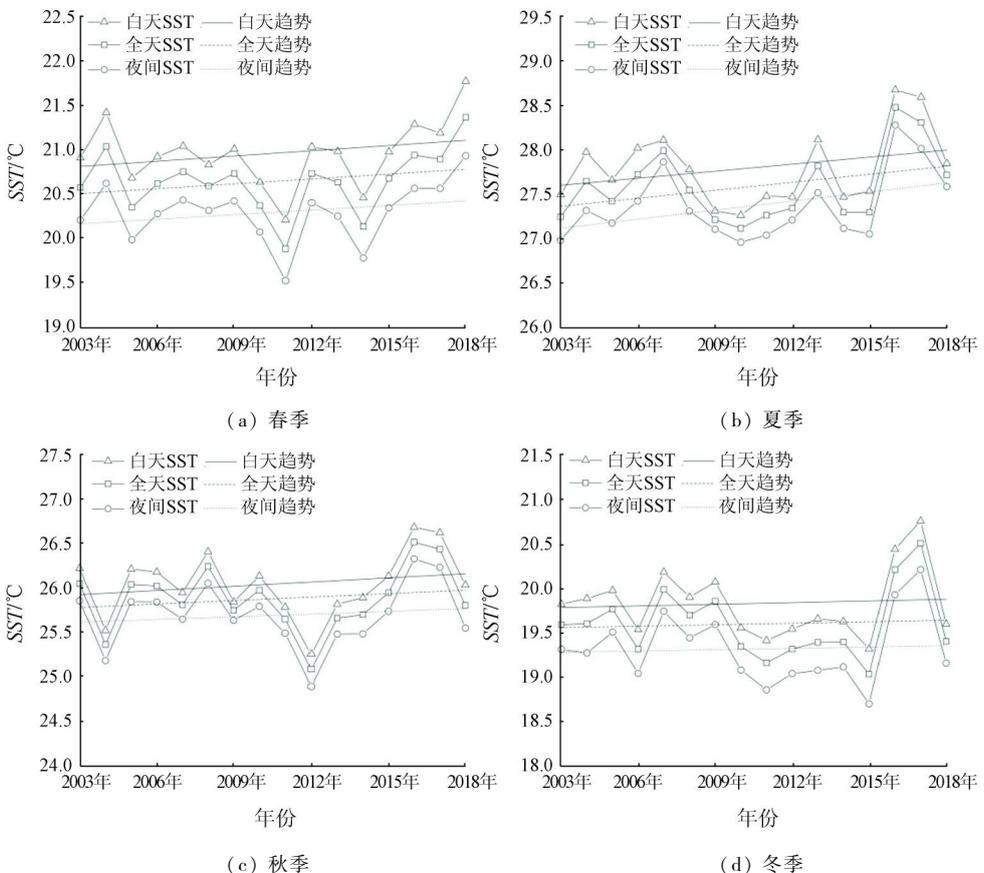


图5 各季节东海SST年际变化

Fig. 5 Interannual variation of SST of the East China Sea in each season

表1 各季节东海 SST 年际变化趋势

Tab.1 Interannual variation trend of SST in the East China Sea in each season

| | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|----|---|---|--|--|
| 全天 | $y = 0.018x - 16.193,$ $R^2 = 0.061$ | $y = 0.030x - 33.037,$ $R^2 = 0.128$ | $y = 0.013x - 0.283,$ $R^2 = 0.029$ | $y = 0.006x + 8.289,$ $R^2 = 0.005$ |
| 白天 | $y = 0.020x - 18.699,$ $R^2 = 0.064$ | $y = 0.026x - 25.304,$ $R^2 = 0.088$ | $y = 0.016x - 5.694,$ $R^2 = 0.041$ | $y = 0.006x + 7.230,$ $R^2 = 0.006$ |
| 夜间 | $y = 0.017x - 14.163,$ $R^2 = 0.058$ | $y = 0.034x - 41.049,$ $R^2 = 0.172$ | $y = 0.010x - 5.233,$ $R^2 = 0.018$ | $y = 0.005x + 9.262,$ $R^2 = 0.004$ |

结果表明:夏季和秋季 SST 最大值均出现在 2016 年,春季 SST 最小值出现在 2011 年,冬季 SST 最小值出现在 2015 年。各季节 SST 总体呈上升趋势,但升温速度不同:夏季升温速度最快,春、秋次之,冬季最慢。夏季,夜间 SST 升温速率高于白天,而春季、秋季以及冬季白天 SST 升温速率高于夜间。

3.3 东海 SST 月际变化

为了描述 SST 的月际变化情况,绘制了 SST 月际变化折线图(图 6)。

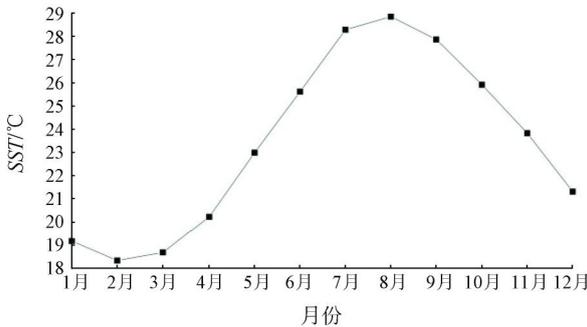


图 6 东海 SST 月际变化曲线

Fig.6 Monthly variation curve of SST of the East China Sea

从图 6 中可以看出,东海 6—10 月的月平均

SST 高于 25 °C, SST 在春季和冬季比较低,而在夏季和秋季比较高,其中,夏季平均 SST 可达 27.6 °C,而冬季平均 SST 只有 19.6 °C。东海 SST 月际变化明显,从最低温度 18.3 °C(2 月)迅速上升到最高温度 28.9 °C(8 月)。

为了分析 SST 空间分布特征,通过图像运算,给出东海各月 SST 空间分布(图 7)。通过比较各月份,可以看出,东海 SST 基本呈现 SE—NW 的分布特征,SST 向西北部逐渐递减。同纬度地区,靠近陆地的 SST 较低,越往东,离陆地越远,SST 越高。冬季 SST 处于较低水平(图 7(a)—(c)),冬季东海南、北温差最大可达 20 °C。东海西北部 SST 低于 11 °C,台湾东部海温为 23 ~ 26 °C。春季(图 7(d)—(f))是冬季向夏季过渡的季节,SST 开始上升,东海东部海域 SST 为 20 ~ 29 °C,浙江、福建沿岸 SST 为 11 ~ 23 °C。5 月,杭州湾 SST 为 20 ~ 23 °C,比其东部海域要高。夏季(图 7(g)—(i)),陆地气温升高,强烈的海气热交换使得 SST 上升。此时,东海 SST 高于 20 °C。秋季 SST 开始下降,东海东部 SST 高于西部(图 7(j)—(l)),以 10 月为例,东海西部 SST 约 20 ~ 26 °C,东部约 23 ~ 29 °C。

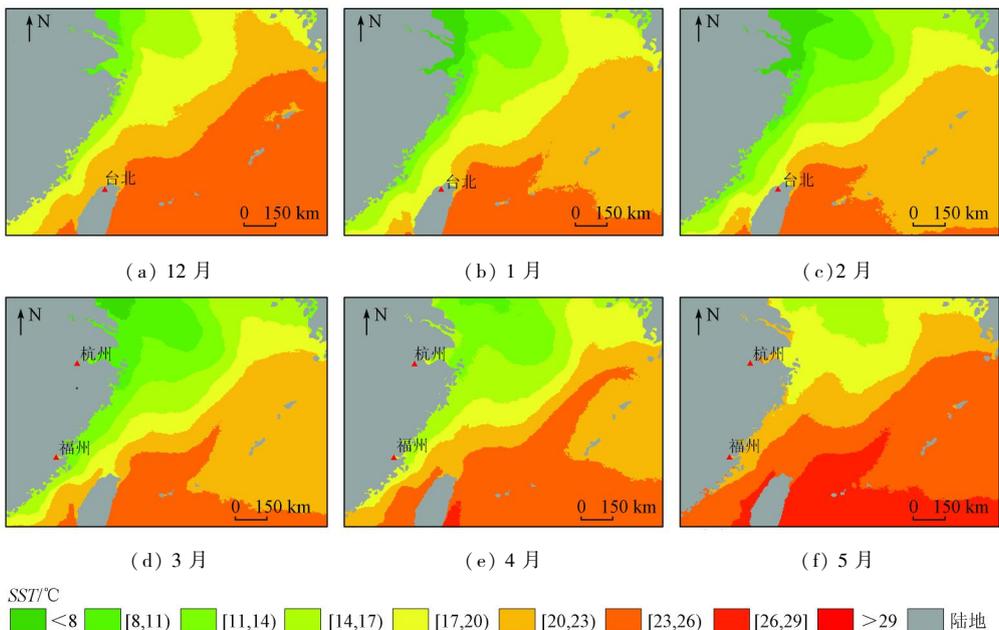


图 7-1 东海 SST 空间分布

Fig.7-1 Spatial distribution of SST of the East China Sea

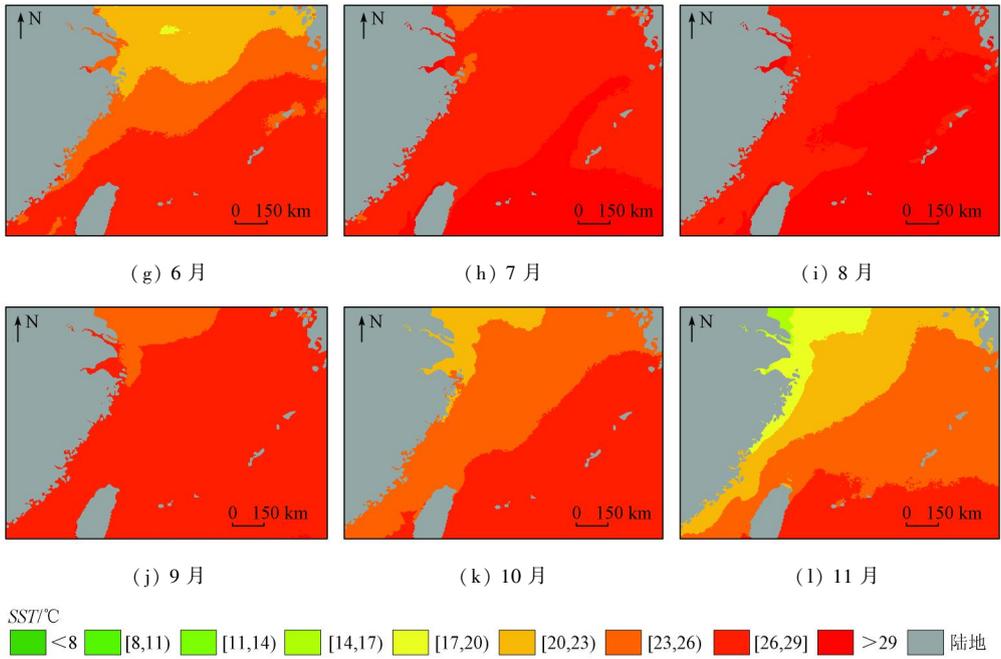


图 7-2 东海 SST 空间分布

Fig. 7-2 Spatial distribution of SST of the East China Sea

4 讨论

南方涛动(southern oscillation,SO)可以反映热带环流的年际变化。是一种印尼地区、东南太平洋以及印度洋之间反相气压振动的现象。表现为:当印度洋及印尼地区的气压偏低时,南太平洋气压就会偏高,反之亦然。SOI 用于衡量 SO 现象的强度,同时,Niño3.4 区 SSTA 可以用来表征厄尔尼诺和拉尼娜事件^[25]。

为了分析温度异常与气候异常的关系,绘制了东海 SSTA,Niño3.4 区 SSTA 与 SOI 折线图(图 8)。其中,2004 年、2009 年、2015 年为厄尔尼诺年,2008

年、2010 年、2011 年、2016 年为拉尼娜年^[26]。从图中可以看到,SOI 变化范围在 -3.4 ~ 2.7 之间,东海 SSTA 在 -1 ~ 1.2 °C 之间变化,Niño3.4 区 SSTA 在 -1.8 ~ 2.9 °C 之间变化。厄尔尼诺发生期间,SOI 为负值,Niño3.4 区 SSTA 为正值;拉尼娜发生期间,SOI 大部分为正值,Niño3.4 区 SSTA 为负值。表明正异常与厄尔尼诺事件有关,负异常与拉尼娜事件有关。2007—2008 年 SOI 急剧上升,到 2008 年,SOI 达到近年来的最大值。刘少锋等^[27]研究了拉尼娜事件与 2008 年 1 月中国南方极端气候异常的关系,认为赤道中东太平洋海温负异常是导致我国南方出现冰冻灾害等极端天气的重要原因,进一步说明研究 SST 特征对我国南方的天气预测有着重要的意义。

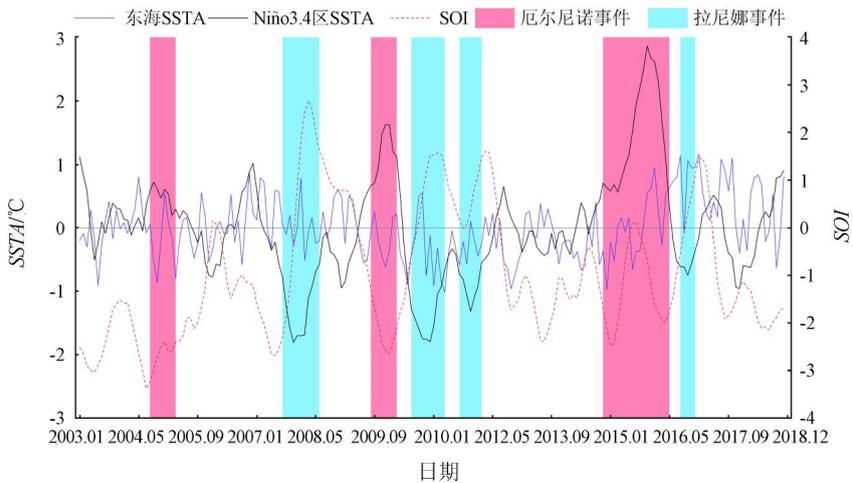


图 8 东海 SSTA 时间序列

Fig. 8 Time series of the SST anomalies of the East China Sea

从图8中可以看到,东海 SSTA 与厄尔尼诺和拉尼娜事件存在一定的关系,为此,统计了2003—2018年间厄尔尼诺和拉尼娜事件发生前后东海的 SSTA(表2)。从表2中可以看到,厄尔尼诺发生当

年,SSTA 处于较低水平,发生次年 SSTA 明显升高,结束后一年又有所下降;拉尼娜发生当年,SSTA 处于较高水平,发生次年 SSTA 明显降低,到结束后一年又有所上升。

表2 东海 SSTA 与厄尔尼诺年及拉尼娜年的关系

Tab. 2 Relationship between SSTA in the East China Sea and El Niño and La Niña

| 类型 | 年份 | 开始时间 | 结束时间 | 东海 SSTA/℃ | | |
|-------|-------|---------|---------|-----------|-------|-------|
| | | | | 当年 | 次年 | 结束后一年 |
| 厄尔尼诺年 | 2004年 | 2004.08 | 2005.03 | 0.03 | -0.13 | -0.07 |
| | 2009年 | 2009.08 | 2010.03 | -0.14 | -0.19 | -0.36 |
| | 2015年 | 2014.11 | 2016.05 | -0.06 | 0.63 | 0.67 |
| | 平均值 | | | -0.06 | 0.10 | 0.08 |
| 拉尼娜年 | 2008年 | 2007.08 | 2008.06 | 0.13 | -0.14 | 0.14 |
| | 2010年 | 2010.07 | 2011.04 | -0.19 | -0.19 | -0.32 |
| | 2011年 | 2011.08 | 2012.02 | -0.45 | -0.34 | -0.29 |
| | 2016年 | 2016.08 | 2016.12 | 0.63 | 0.50 | 0.50 |
| | 平均值 | | | 0.03 | -0.04 | 0.01 |

通过前文分析可知,东海 SST 与厄尔尼诺和拉尼娜事件具有良好的响应。为了进一步分析东海 SST 与厄尔尼诺和拉尼娜事件的关系,利用东海 SSTA 与 Niño3.4 区 SSTA 以及 SOI 作相关分析,分析它们之间的相关性。从图9中可以看到,SOI 与滞后其 15~39 个月的东海 SSTA 呈负相关,与滞后其 21~39 个月的东海 SSTA 的相关性超过了 -0.2; SOI 及 Niño3.4 区 SSTA 与滞后其 2 a 左右的东海 SSTA 的相关性比较显著,此外,Niño3.4 区 SSTA 与滞后 9~27 个月的东海 SSTA 的相关性超过了 0.2,这说明东海 SST 变化与厄尔尼诺及拉尼娜的发生具有一定的关联。

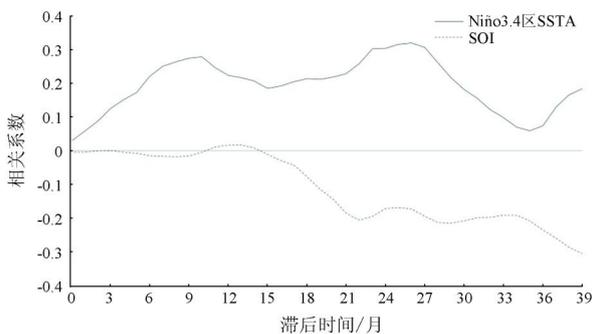


图9 东海与赤道太平洋海温以及 SOI 互相关分析(2003—2018年)

Fig. 9 Correlation analysis between East China Sea and equatorial Pacific ocean temperature and SOI (from 2003 to 2018)

5 结论

通过对2003—2018年间东海月平均 SST 数据进行分析,研究了东海 SST 年际、月际变化,以及

SST 异常与气候变化的关系。主要研究结论如下:

1)2003—2018年间东海 SST 总体呈上升趋势,2016年 SST 最高,2011年最低;东海大部分海域 SST 呈上升趋势,SST 与时间呈正相关,其中,长江口海域的增温率最高;各季节 SST 呈上升趋势,夏季升温最快,且夜间升温速度比白天快,春、秋和冬季则是白天升温速度高于夜间。

2)东海在2月 SST 最低(约 18.3℃),8月的 SST 最高(约 28.9℃);东海 SST 的空间分布具有按纬度分布的特征,东海 SST 从东南部向西北部逐渐递减。

3)SSTA 与 SOI 负相关,SOI > 0 时,SSTA 为负,出现拉尼娜现象;SOI < 0 时,SSTA 为正,出现厄尔尼诺现象;厄尔尼诺发生当年 SSTA 处于较低水平,发生次年 SSTA 明显升高,结束后一年又有所下降;拉尼娜发生当年 SSTA 处于较高水平,发生次年 SSTA 明显降低,结束后一年又有所上升。

本文通过分析东海 SST 时空变化,对海温变化与气候变化之间的关系有了更深的理解,为我国农业生产防灾减灾提供了先验知识。由于本文仅研究了2003—2018年间东海地区 SST 变化趋势,并不能代表其长期变化,若要对未来 SST 变化进行预测等研究,还需采用长时间序列的 SST 数据集。

参考文献(References):

- [1] 邱欢. 140年来东海及毗邻的西北太平洋海水温度变化的特征分析[D]. 上海:上海师范大学,2017.
Qiu H. Characteristics of sea temperature changes in the East China Sea and the adjacent Northwest Pacific over the past 140 years [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2017.
- [2] 孙楠楠. 东海黑潮海表温度变化及其与厄尔尼诺和全球变暖的关系[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.

- Sun N N. Variations of sea surface temperature over Kuroshio in the East Sea and its relationship with El - Niño and global warming [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [3] 王智祖, 左军成, 陈美香, 等. 黄、东海沿岸海表温度变化与厄尔尼诺的关系 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (4): 461 - 468.
- Wang Z Z, Zuo J C, Chen M X, et al. Relationship between El Niño and sea surface temperature variation in coastal region of Yellow Sea and East China Sea [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40 (4): 461 - 468.
- [4] 张琪. 中国近海海表温度的年代际变化及其对全球变暖的响应 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Zhang Q. The interdecadal variation of SST in the coastal China Seas and its response to global warming [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [5] Li G, Li C Y, Tan Y K, et al. The interdecadal changes of South Pacific Sea surface temperature in the mid - 1990s and their connections with ENSO [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31 (1): 66 - 84.
- [6] Robles - Tamayo C M, Valdez - Holguín J E, García - Morales R, et al. Sea surface temperature (SST) variability of the eastern coastal zone of the gulf of California [J]. Remote Sensing, 2018, 10 (9): 1434 - 1456.
- [7] 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 H J, Cai R S, Huang R H. Enhanced responses of sea surface temperature over offshore China to global warming and hiatus [J]. Climate Change Research, 2016, 12 (6): 500 - 507.
- [8] 董雷娟, 李洪平. 全球海表温度变化特征分析 [J]. 地理空间信息, 2013, 11 (5): 29 - 33.
- Dong L J, Li H P. Analysis of global sea surface temperature variation [J]. Geospatial Information, 2013, 11 (5): 29 - 33.
- [9] Liu Q Y, Zhang Q. Analysis on long - term change of sea surface temperature in the China seas [J]. Oceanic and Coastal Sea Research, 2013, 12 (2): 295 - 300.
- [10] Park Y G, Choi A. Long - term changes of South China Sea surface temperatures in winter and summer [J]. Continental Shelf Research, 2017, 143: 185 - 193.
- [11] 宋春阳, 姜华, 张守文, 等. 2017年中国近海海表温度特征 [J]. 海洋预报, 2019, 36 (1): 1 - 9.
- Song C Y, Jiang H, Zhang S W, et al. Sea surface temperature characteristics of the China seas in 2017 [J]. Marine Forecasts, 2019, 36 (1): 1 - 9.
- [12] 伍玉梅, 徐兆礼, 樊伟, 等. 1985—2005年东海海表温度时空变化特征分析 [J]. 海洋学报, 2011, 33 (6): 9 - 18.
- Wu Y M, Xu Z L, Fan W, et al. Change of sea surface temperature in East China Sea during 1985—2005 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33 (6): 9 - 18.
- [13] 化成君, 伍玉梅, 张衡, 等. 2014年东黄海海表温度季节变化分析 [J]. 渔业信息与战略, 2016, 31 (3): 193 - 205.
- Hua C J, Wu Y M, Zhang H, et al. Analysis on the seasonal variability of sea surface temperature in the East the Yellow Sea in 2014 [J]. Fishery Information and Strategy, 2016, 31 (3): 193 - 205.
- [14] 张春桂. 福建省近海区域海面表层温度的卫星遥感应用研究 [J]. 国土资源遥感, 1999, 11 (1): 25 - 28. doi: 10. 6046/gtzyyg. 1999. 01. 06.
- Zhang C G. Study on the utilization of satellite remote sensing for sea surface temperature of coastal area in Fujian Province [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1999, 11 (1): 25 - 28. doi: 10. 6046/gtzyyg. 1999. 01. 06.
- [15] 陈雪冬, 崔雪森. 卫星遥感在中东太平洋大眼金枪鱼渔场与环境关系的应用研究 [J]. 遥感信息, 2006 (1): 25 - 28.
- Chen X D, Cui X S. Application study on relationship between big-eye tuna fishing grounds and environment in the eastern and central Pacific Ocean by satellite remote sensing [J]. Remote Sensing Information, 2006 (1): 25 - 28.
- [16] Haines S L, Jedlovec G J, Lazarus S M. A MODIS sea surface temperature composite for regional applications [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (9): 2919 - 2927.
- [17] 孙凤琴, 张彩云, 商少平, 等. 西北太平洋部分海域 AVHRR、TMI 与 MODIS 遥感海表层温度的初步验证 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2007, 46 (1): 1 - 5.
- Sun F Q, Zhang C Y, Shang S P, et al. Primary validation of AVHRR/MODIS/TMI SST for part of the northwest Pacific [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2007, 46 (1): 1 - 5.
- [18] 李雪丁. 台湾海峡 MODIS 遥感的初步验证 [J]. 台湾海峡, 2011, 30 (3): 336 - 340.
- Li X D. Primary validation of moderate resolution imaging spectro-radiometer (MODIS) sea surface temperature in the Taiwan Strait [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30 (3): 336 - 340.
- [19] 丁又专. 卫星遥感海表温度与悬浮泥沙浓度的资料重构及数据同化试验 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- Ding Y Z. Data reconstruction and assimilation experiment of satellite sea surface temperature and suspended sediment concentration [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [20] 马寨璞, 井爱芹. 动态最优插值方法及其同化应用研究 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2004, 24 (6): 574 - 580.
- Ma Z P, Jing A Q. Dynamic interpolation and its application in data assimilation [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2004, 24 (6): 574 - 580.
- [21] 谈建国, 周红妹, 陆贤, 等. NOAA 卫星云检测和云修复业务应用系统的研制和建立 [J]. 遥感技术与应用, 2000, 15 (4): 228 - 231.
- Tan J G, Zhou H M, Lu X, et al. Research and establishment in operation system of cloud detection and rehabilitation applied to NOAA satellite [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 15 (4): 228 - 231.
- [22] 毛志华, 朱乾坤, 潘德炉, 等. 卫星遥感速报北太平洋渔场海温方法研究 [J]. 中国水产科学, 2003, 10 (6): 502 - 506.
- Mao Z H, Zhu Q K, Pan D L, et al. Method of satellite - measured sea surface temperature charts for north Pacific fishery grounds [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10 (6): 502 - 506.
- [23] 赵海龙, 张丹丹, 黄松, 等. 基于皮尔逊相关系数的海南省地闪密度与雷击故障关系分析 [J]. 高压电器, 2019, 55 (8): 186 - 192.

- Zhao H L, Zhang D D, Huang S, et al. Analysis on the relation between cloud-to-ground lightning density and lightning trip rate in Hainan Province based on Pearson correlation coefficient [J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(8): 186–192.
- [24] 范海燕, 滕军, 管磊, 等. NOAA/AVHRR 卫星海表温度在西北太平洋的印证及分析 [J]. *海洋预报*, 2009, 26(2): 7–14.
- Fan H Y, Teng J, Guan L, et al. Validation of sea surface temperature from NOAA/AVHRR in the Northwest Pacific [J]. *Marine Forecasts*, 2009, 26(2): 7–14.
- [25] 徐冰, 陈新军, 田思泉, 等. 厄尔尼诺和拉尼娜事件对秘鲁外海茎柔鱼渔场分布的影响 [J]. *水产学报*, 2012, 36(5): 696–707.
- Xu B, Chen X J, Tian S Q, et al. Effects of El Niño/La Niña on distribution of fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru waters [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(5): 696–707.
- [26] 王文秀, 林燕丹, 许桂旋, 等. 1951—2016 年厄尔尼诺/拉尼娜事件对登陆华南地区台风的影响 [J]. *亚热带水土保持*, 2018, 30(2): 13–19.
- Wang W X, Lin Y D, Xu G X, et al. Impact of El Niño or La Niña on the typhoon landed in South China from 1951 to 2016 [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2018, 30(2): 13–19.
- [27] 刘少锋, 陈红, 林朝晖. 海温异常对 2008 年 1 月中国气候异常影响的数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 2008, 13(4): 500–509.
- Liu S F, Chen H, Lin Z H. Numerical simulation of the impact of sea surface temperature anomalies on the climate anomalies over China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(4): 500–509.

Spatiotemporal evolution of sea surface temperature in the East China Sea

WANG Ping¹, MAO Kebiao², MENG Fei¹, YUAN Zijin²

(1. School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to grasp the law of sea surface temperature (SST) change in the East China Sea from 2003 to 2018, the authors analyzed the relationship between SST changes and climate anomalies, and used remote sensing data to monitor the temporal and spatial evolution of SST in the East China Sea for 16 years. With the 2003—2018 MODIS SST product as the data source, the data were first repaired by the nearest neighbor point value replacement method, and the measured data were used to verify the accuracy. The least square method and Pearson correlation coefficient were used to analyze the SST change trend. Through cross-correlation analysis, the correlation between sea surface temperature anomaly (SSTA) and southern oscillation index (SOI) was studied. The results are as follows: ① SST in the East China Sea generally showed an upward trend from 2003 to 2018, and the temperature rise in summer was more obvious. The temperature rise rate in the Yangtze River estuary could reach above 0.042 °C/a; ② SST in the East China Sea showed a SE—NW distribution, and at the same latitude, SST near the mainland was usually lower than the eastern sea area, but the SST of Hangzhou Bay area from April to September was higher than that of the eastern area; ③ SOI was basically not related to the East China Sea SSTA that was 15 months behind it, but it had a strong negative correlation with the East China Sea SSTA that was 21~39 months behind with correlation coefficient exceeding -0.2. The research results can provide a reference for grasping the laws of climate change and predicting extreme weather.

Keywords: sea surface temperature (SST); spatial and temporal variability; East China Sea

(责任编辑: 张仙)