

长江口邻近海域海表温度变化特征分析

王 洁^{1,2}, 王 杰¹, 许佳峰³, 栾奎峰^{1,2*}, 杨奕杰¹, 吕阳阳¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 基于遥感数据, 采用功率谱和相关性分析等方法, 研究了长江口邻近海域海表温度(SST)的时空变化特征以及影响因素。结果表明: 1982—2017 年长江口邻近海域的 SST 整体表现为每 10 a 升温约 0.48 °C 的趋势, 且具有 10.0, 3.6, 2.4 和 1.0 a 的振荡周期。长期以来, 冬、春、夏、秋四季的长江口邻近海域 SST 总体呈现升温趋势, 其中春季的升温趋势最显著, 而秋季变化趋势最不明显。研究海区的 SST 呈现明显西北—东南向温度递增的分布特征。此外, 长江口径流量的变化对邻近海域的 SST 具有一定影响, 从多年变化来看, 径流量增大(减小), 长江口邻近海域 SST 随之升高(降低), 从月变化来看, 3 月、4 月和 9 月的长江径流对 SST 有影响。气温对 SST 具有一定的强迫作用, 大气温度的总体趋势是升高的, 通过海气相互作用进行热传输, 从而造成长江口邻近海域 SST 升温。

关键词: 长江口; 海表温度; 径流量; 气温

中图分类号: P731.11

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)04-0624-11

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.007

引用格式: WANG J, WANG J, XU J F, et al. Characteristics of the sea surface temperature variation in adjacent area of the Yangtze River estuary[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(4): 624-634. 王洁, 王杰, 许佳峰, 等. 长江口邻近海域海表温度变化特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 624-634.

海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)体现了海洋内、外动力过程以及海气之间相互作用的综合结果, 它不仅是海面水汽和热量交换研究的一个重要物理参数, 也是海洋环流、水团、海洋锋、上升流和海水混合等海洋科学研究的一种直观指示量^[1]。在 200 多年的发展进程中, 人类对海表面温度的观测经历了船舶观测到船体感应温度再到浮标观测、卫星遥感观测的演变^[2-4], 国内外研究学者对各个海域的 SST 时空分布变化进行了广泛的研究和分析^[5-8]。

长江口紧邻大陆, SST 变化受陆地地面环境的影响很大, 陆地气候对 SST 变化也存在较为显著的影响, 同时由于长江径流量的作用, 使得长江口邻近海域的 SST 变化与外海温度变化相比要更加明显。伍玉梅等^[9]通过 EOF 方法对 1985—2005 年的东海 SST 距平进行了分析, 认为 1998 年之前的 SST 变化幅度要大于 1998 年以后; 冯琳和林霄沛^[10]在 2009 年对东中国海 SST 趋势进行分析后指出, 东中国海区有明显的长期升温趋势, 其中东海最明显; 郭伟其等^[11]研究指出东海沿岸 SST 总体呈现上升趋势, 其中嵎山站冬季上升趋势可达 0.52 °C/(10 a), 夏季可低至 0.12 °C/(10 a)。我国对近海的研究主要集中在大尺度海气相互作用上, 对近海 SST 长期变化研究很少, 而对近海 SST 变化及其对沿岸中尺度气候影响的研究则更少。

本文利用长时间序列资料对长江口及其邻近海区的 SST 进行统计研究, 还分析了径流量和气温对 SST 的影响。对长江口邻近海域 SST 的变化情况以及影响因素进行分析研究, 不仅具有非常重要的理论意义, 而且能更好地服务于海洋渔业、矿产资源的开发利用, 以及更准确地对海洋环境进行监测以及预报。

收稿日期: 2019-07-29

资助项目: 上海海洋大学博士启动项目——基于 HY-2 卫星的台风灾害动态监测(A2-0203-00-100345); 上海市海洋局科研项目——基于轻小型多光谱传感器的长江口海域悬沙信息快速提取关键技术研究(沪海科 2019-05)

作者简介: 王 洁(1981-), 女, 副教授, 主要从事海洋遥感方面研究. E-mail: wangjie@shou.edu.cn

* **通信作者:** 栾奎峰(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事主动光学海洋测绘与激光雷达成像质量控制方面研究. E-mail: kfluan@shou.edu.cn

(李 燕 编辑)

1 数据与方法

1.1 数据源

本文使用数据包括:SST 遥感数据、径流量数据以及 NOAA 气候数据。SST 遥感数据:1982—2009 年 NOAA 卫星高分辨率辐射计(AVHRR)反演的年平均及月平均 SST 产品,分辨率为 $0.044^{\circ} \times 0.044^{\circ}$,该数据由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布,利用探路者算法进行反演,精度可达 0.02°C ^[12];2010—2017 年 MODIS Terra 反演的年平均及月平均 SST 产品,分辨率为 $0.041^{\circ} \times 0.041^{\circ}$,该数据由美国国家航空航天局发布,其反演算法是在探路者算法的基础上发展而来的,反演精度更高。上述 2 种 SST 产品已业务化运行多年,数据产品已非常成熟。径流量数据:长江口最下游的大通水文站实测 1982—2017 年的月径流量数据。大通水文站是长江流域最下游的一个具有长期观测资料的水文站,是国家一类水文站。NOAA 气候数据是空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 1982—2017 年的 850 hPa 处的月平均气温资料。该数据是经过后处理再分析的月平均数据。在研究区域的选择上,研究空间分布时选取的范围为部分中国海($114^{\circ} \sim 130^{\circ}\text{E}$, $24^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$,即图 1 中大框区域),进行时间序列分析时选择长江口海域($122^{\circ}00' \sim 122^{\circ}30'\text{E}$, $31^{\circ}00' \sim 31^{\circ}30'\text{N}$,即图 1 中红框区域)的数据的平均值来代替整个区域。

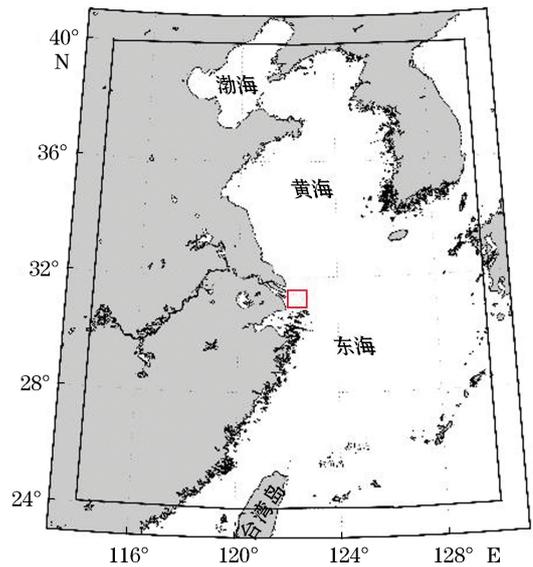


图 1 研究区域

Fig.1 Domain of study area

1.2 数据处理方法

本文主要运用了 2 种分析方法:功率谱分析以及相关性分析。功率谱分析^[13]是以傅里叶变换为基础发展而成的一种分析方法,该方法是通过分配整个时间序列数据的总能量到不同的频率上,获取各个频率的分量,对不同频率的波的方差贡献进行分析,发现整个时间段具有的几个明显周期,从而获得时间序列上的显著振荡周期。利用功率谱分析对长江口 SST 的振荡周期进行分析,得到了长江口 SST 具有 10.0, 3.6, 2.4 和 1.0 a 的振荡周期。相关性是指两个因素之间存在一定的影响关系,相关系数的大小代表了两者之间的相关程度,相关系数越大,两个变量的关联越密切,影响越显著,相关系数越小,说明两者表现为轻微相关,影响程度很小。在讨论长江径流和气温对长江口 SST 的影响时,通过对径流量和 SST、气温和 SST 的年均和月均数据进行相关性分析,来说明两者之间存在的影

2 长江口海域 SST 的年际变化

2.1 时空变化

图 2 为不同年份长江口邻近海域年平均 SST 变化趋势,长期年均 SST 分布于 $18 \sim 24^{\circ}\text{C}$,36 a 中年平均 SST 最高值出现在 1995 年,其值约 25°C ,1987 年的年平均 SST 在 36 a 中最低,低于 20°C ,年平均 SST 的最高与最低值相差了 5°C 。

图 3 中分别为 4 个不同年份的长江口邻近海域的年均 SST 分布图。SST 分布呈现出有层次的带状分

布,离长江口 100~400 km 的 SST 比近海 SST 低 1~2 °C,400 km 以外的远海的 SST 最高,大范围内其值分布较均匀。长江近海 SST 比稍远处 SST 高主要是由于靠近内陆地区 SST 会受陆地下垫面各种复杂因素的影响。远海的 SST 更高是受台湾暖流和黑潮的影响,SST 比较稳定是因为大洋环流稳定,再加上受陆地的影响较小,因此远海的 SST 更高且变化差异小。

由图 2 和图 3 可见,长江口邻近海域的年平均 SST 在时间上呈现出一种振荡变化的特征,空间上呈现带状分布的特征,且没有明显异常点。

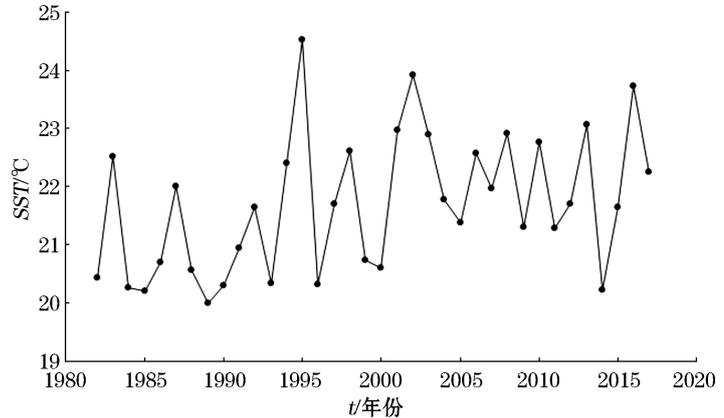


图 2 1982—2017 年长江口邻近海域年平均 SST 变化

Fig.2 Variation of annual mean sea surface temperature (SST) in the Yangtze River estuary from 1982 to 2017

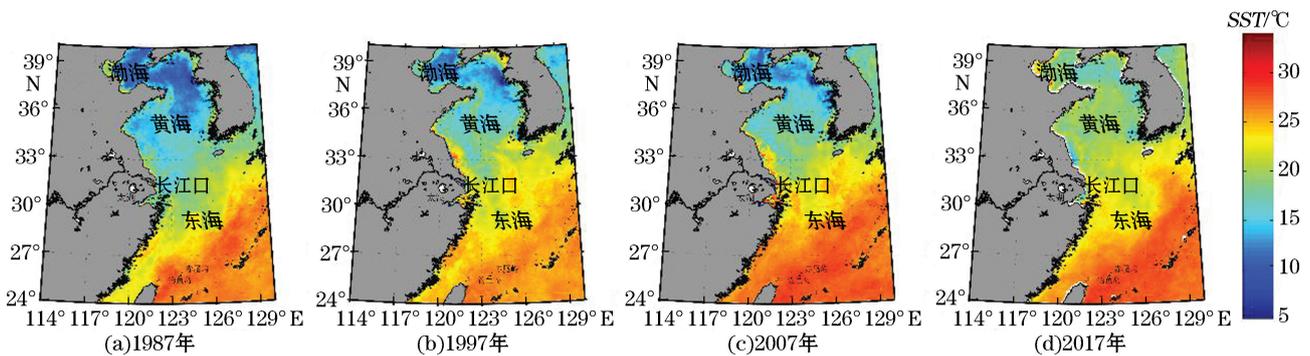


图 3 不同年代长江口邻近海域年平均海表面温度

Fig.3 Distribution of annual mean SST in different years

2.2 SST 年变化趋势及振荡周期

通过计算 1982—2017 年间每 10 a 的 SST 的变化率,进行 SST 时间分布特征的分析(图 4)。1982—2017 年长江口邻近海域的 SST 变化率大于 0,并且长江口海域呈现每 10 a 增温 0.48 °C 的趋势,这一结果与伍玉梅等^[9]对东海 SST 增温趋势的研究结果一致。此外,近海海域的 SST 变化率大于外海海域的 SST 变化率。长江口邻近海域年均 SST 呈现整体的增温趋势以外,还具有先降温后升温,再降温的振荡特征(图 5)。

对 122°00′~122°30′E,31°00′~31°30′N 范围内 SST 的月平均数据进行功率谱分析,结果如图 6 所示。长江口邻近海域的 SST 变化存在着多个振荡周期,其中比较明显的谱峰对应的频率约为 0.008 3, 0.023 1, 0.034 7 和 0.083 3,分别对应 120, 43.2, 28.8 和 12 个月,说明长江口海域 SST 值的变化对应应有 10.0, 3.6, 2.4 和 1.0 a 的变化周期。

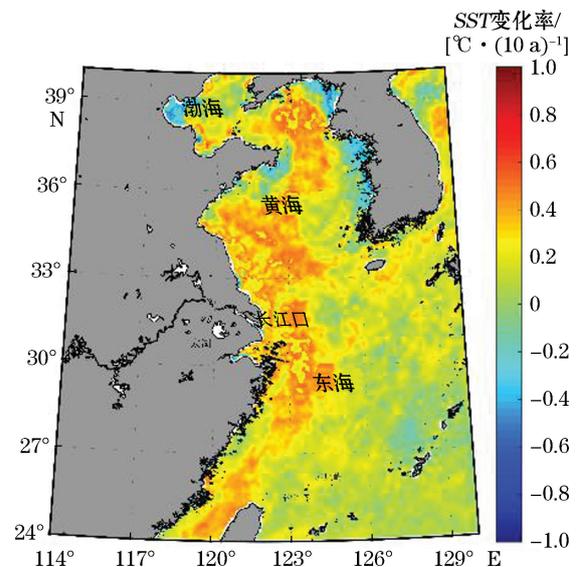


图 4 1982—2017 年长江口邻近海域年均 SST 变化趋势

Fig.4 Trend of annual mean SST from 1982 to 2017

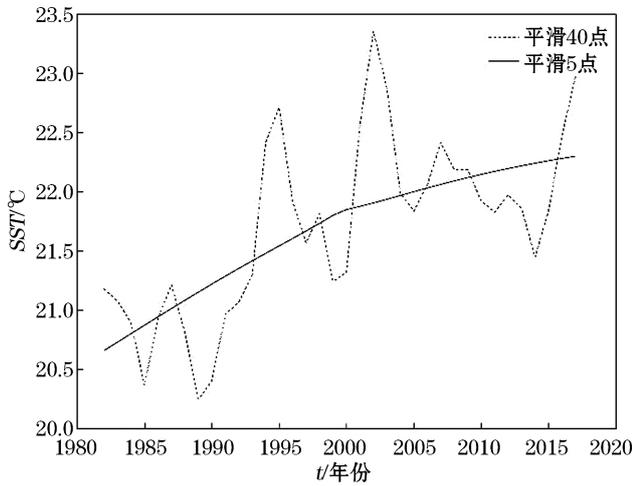


图 5 长江口邻近海域年均 SST 变化趋势
Fig.5 Trend of annual mean SST of the adjacent area of the Yangtze River estuary

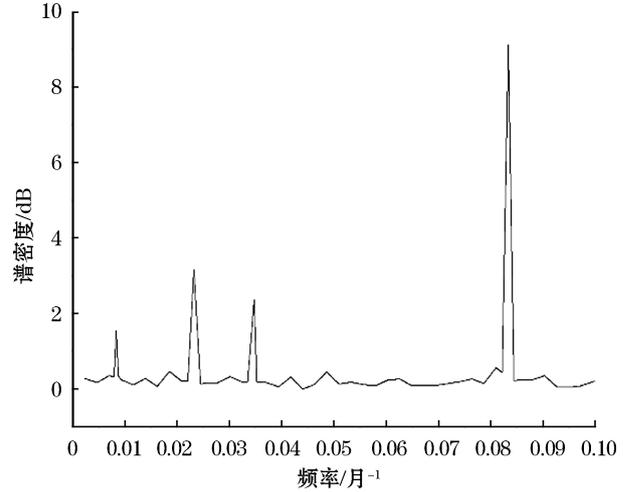


图 6 长江口邻近海域月平均 SST 的频谱图
Fig.6 Spectrum of the SST

3 长江口海域 SST 的季节变化

3.1 时空变化

通过分析 36 a 的月平均 SST 数据(图 7)发现,长江口邻近海域的月平均 SST 变化曲线接近正弦曲线,月均 SST 最低值出现在 2 月,最高值出现在 8 月。其中春季由于太阳辐射的不断增加,SST 值不断升高,并且温度升高的速率也呈现增加的趋势,而秋季到冬季则相反,SST 值不断降低。

在分析不同季节 SST 空间分布时,将不同年代的 2 月、5 月、8 月和 11 月的 SST 分布,来分别代表该年代冬、春、夏、秋季时期 SST 的分布。研究区域内不同年份相同季节的 SST 分布结构极为相似,而同一年内不同季节之间 SST 分布存在较明显的差异。冬季长江口近岸 SST 值的范围为 5~12 °C,近岸到远海的 SST 分布呈现出由低到高递增的带状分布,且递变梯度最大(图 8)。春季长江口邻近海域的 SST 分布范围为 18~23 °C,依然存在 NW—SE 向 SST 递增分布的特征,递增的梯度较冬季来说较弱(图 9)。夏季长江口邻近海域的 SST 范围为 26~31 °C,夏季 SST 空间分带不明显,长江口附近与外海的 SST 几乎相当,高达 30 °C 左右(图 10)。秋季长江口邻近海域的 SST 值范围为 18~23 °C,与夏季类似,不具有明显的空间分带特征(图 11)。

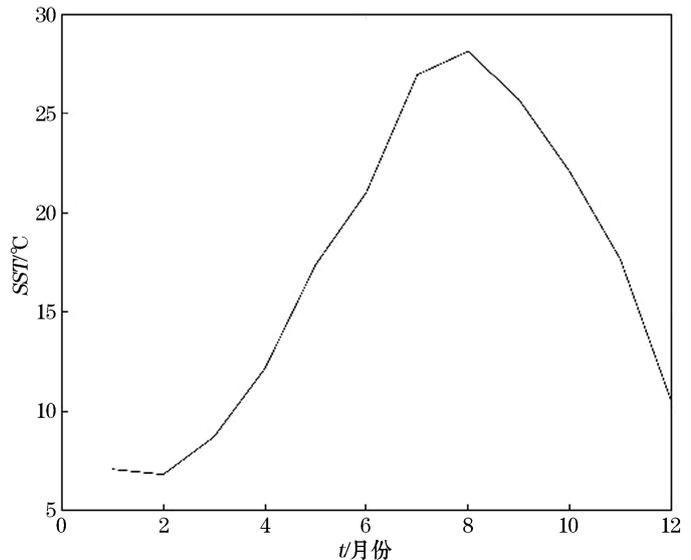


图 7 多年各月平均 SST 变化曲线
Fig.7 Seasonal variation of the SST

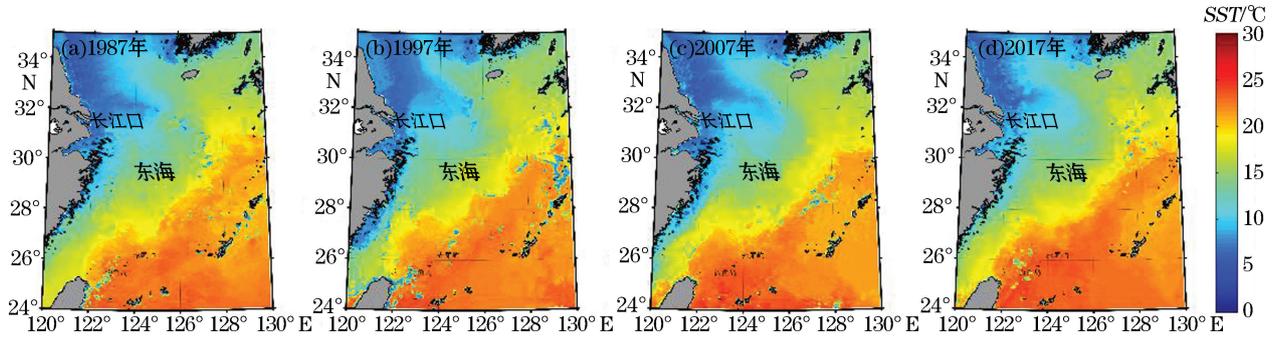


图 8 不同年份冬季 SST

Fig.8 Winter SST in different years

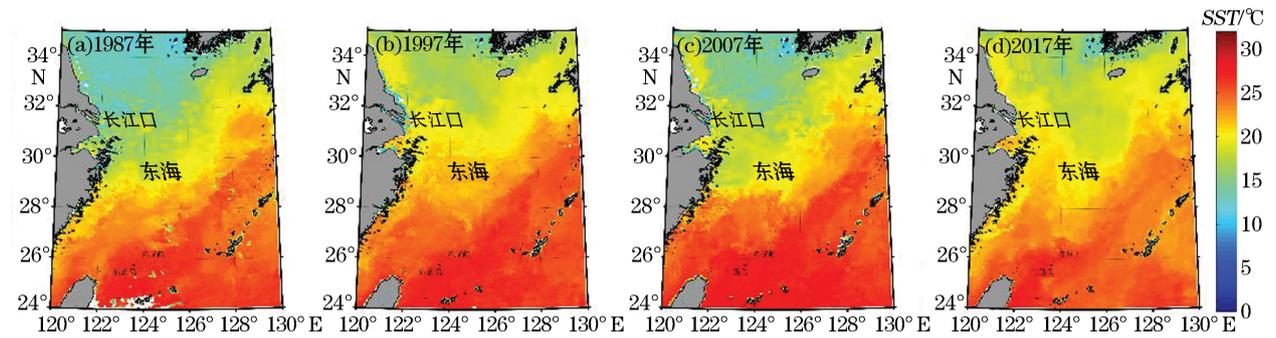


图 9 不同年份春季 SST

Fig.9 Spring SST in in different years

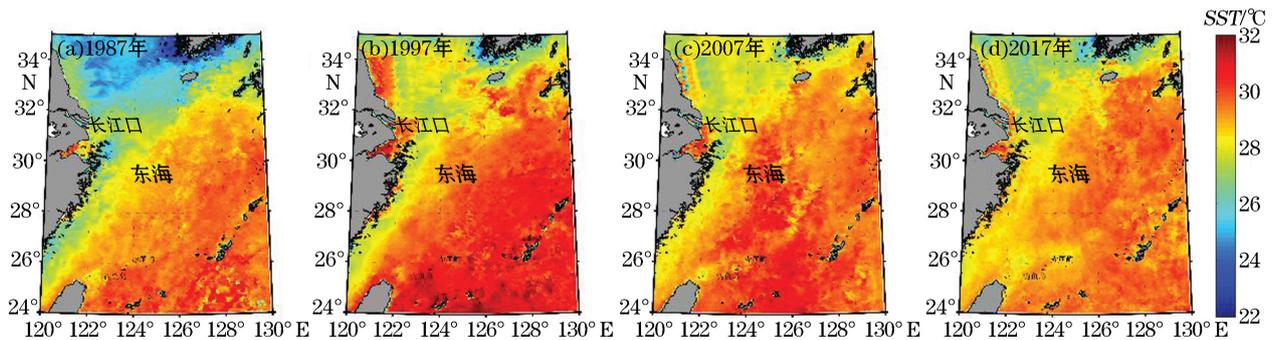


图 10 不同年份夏季 SST

Fig.10 Summer SST in in different years

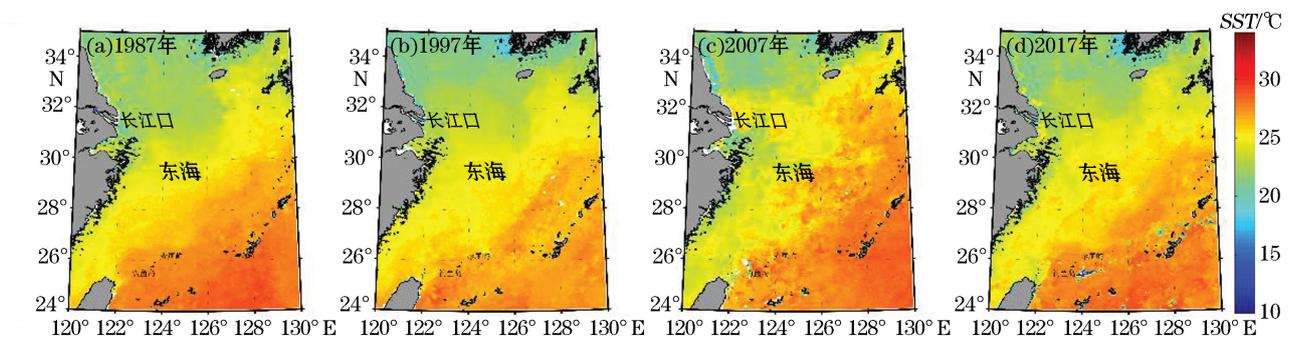


图 11 不同年份秋季 SST

Fig.11 Autumn SST in in different years

3.2 SST 季节变化趋势

1982—2017 年的不同季节 SST 的 10 a 变化率,如图 12 所示。冬季长江口近岸 SST 升温趋势明显,每 10 a 约升高 0.5 °C,远海无显著升温。春季长江口近岸升温幅度较大,每 10 a 约升高 0.6 °C,与春季相似,升温海域集中在近海海域,远海升温趋势不明显。整个研究区夏季 SST 多年变化不明显,近岸海域每 10 a 约升温 0.3 °C。秋季长江口近岸 SST 每 10 a 约升高 0.1 °C,近岸多为升温状态,有大部分海域每 10 a 降温约 0.1~0.2 °C。

从 36 a 不同季节 SST 值的总体变化趋势(图 13)来看,四季均呈现升温趋势,其中冬季和春季的升温趋势显著,冬季 2000 年前 SST 比较稳定,之后升温迅速,春季 SST 多年来以较快的速度增温,且速率几乎不变。夏、秋季的升温趋势并不显著,夏季 SST 在 2000 年前增温较迅速,而秋季 SST 在 2000 年后增温较迅速。冬季平均每 10 a 升高 0.5 °C,春季平均每 10 a 升高 0.6 °C,夏季每 10 a 升高 0.4 °C,秋季每 10 a 升高约 0.2 °C。

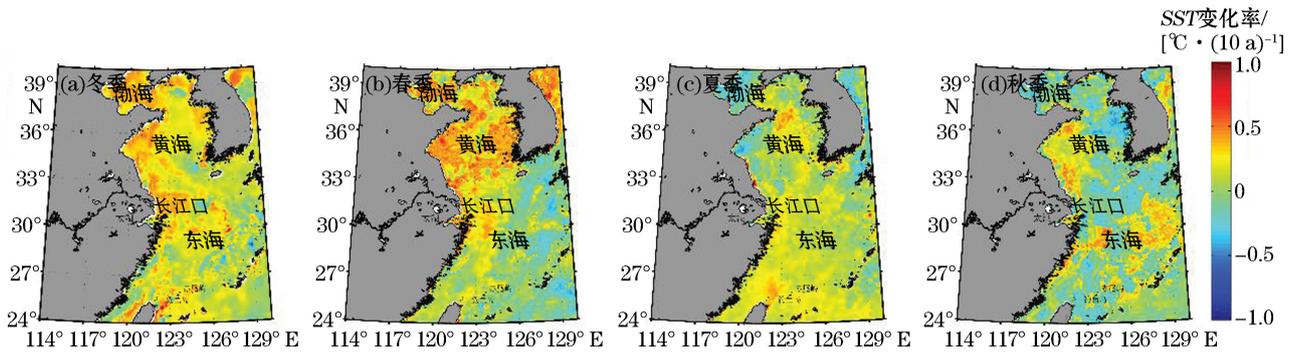


图 12 1982—2017 年不同季节 SST 变化率

Fig.12 Rates of SST change in different seasons from 1982 to 2017

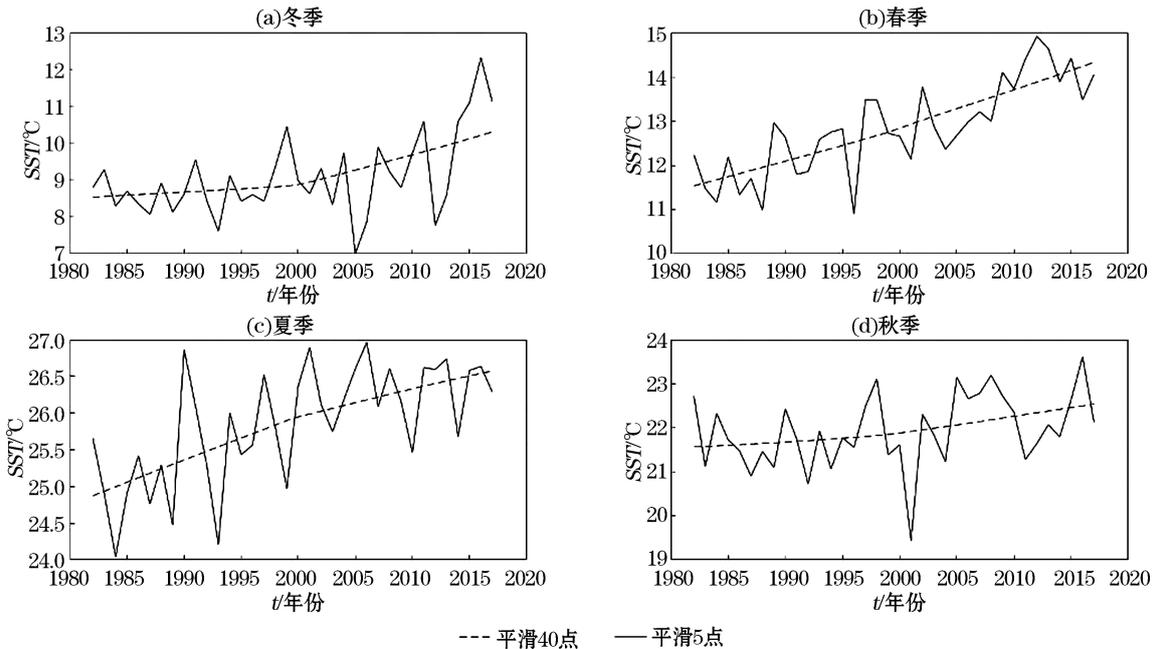


图 13 长江口邻近海域不同季节 SST 变化趋势

Fig.13 Trend of the SST change in different seasons

4 影响长江口海域 SST 变化因素的分析

SST 在没有强烈的外部因素的作用下呈现均匀稳定状态,而随着全球气候变暖,SST 呈现不断上升的趋势,打破了之前温度变化的规律性。在气候作用剧烈时,会在某个时间段发生 SST 异常现象。陈美榕等^[14]指出,长江口海域 SST 变化情况受厄尔尼诺影响较明显。张守文等^[15]的研究发现台风对东海的 SST 有负异常贡献。河口海区的 SST 在很大程度上受陆地河流径流量以及各种水团冲击的影响^[16]。Materia 等^[17]的研究指出,河流径流会影响海洋温度,但 SST 的响应并不是线性的。除了太阳辐射、气候和径流量等因素影响,海洋动力作用也会引起 SST 的变化,比如海流^[18]、海浪^[19]等都会在一定程度上导致 SST 变化。李娟等^[20]指出南海 SST 空间分布具有明显的季节性变化,其中表层水温主要受海面浮力通量的影响。本文主要讨论径流量以及气温对长江口邻近海域 SST 的影响。

4.1 径流量对长江口邻近海域 SST 的影响

长江口径流量具有显著的季节性变化,将多年平均径流量数据以及月均 SST 数据进行对比(图 14),可以明显地看到长江口径流量的季节变化曲线与 SST 变化曲线形状比较一致,但是长江口径流量的变化大概要比 SST 变化提前一段时间,该情况主要可能是因为径流数据是在内陆河流的大通水文站观测,河流以径流的方式到达长江口,水团混合都需要一定的时间,从而导致一年中径流量的曲线比 SST 曲线稍微提前了一点。长江口 7 月份径流量最大,1 月份径流量最小。分析月均径流量与 SST 的相关性(图 15),两者的相关系数(r)达到 0.794,通过了 0.01 的显著性检验,说明径流量对 SST 确实具有一定的影响,即从多年月均 SST 与径流量分析来看,随着径流量的增大(减小),长江口 SST 随之升高(降低)。

表 1 是 1982—2017 年长江径流量与长江口 SST 各月间的相关系数,由同期相关系数比较可以看出:3 月、4 月两者相关系数较大,分别为 0.343 和 0.326,且都通过了 0.05 的显著性检验,说明长江口径流对 SST 的季节影响主要体现在春季,尤其是春季的 3 月、4 月。春季降雨增多,加上气温的转变,携带大量冷水入海,使得长江口 SST 降低。冬季径流量对于 SST 的影响较弱,而夏、秋季两者相关性比较差。

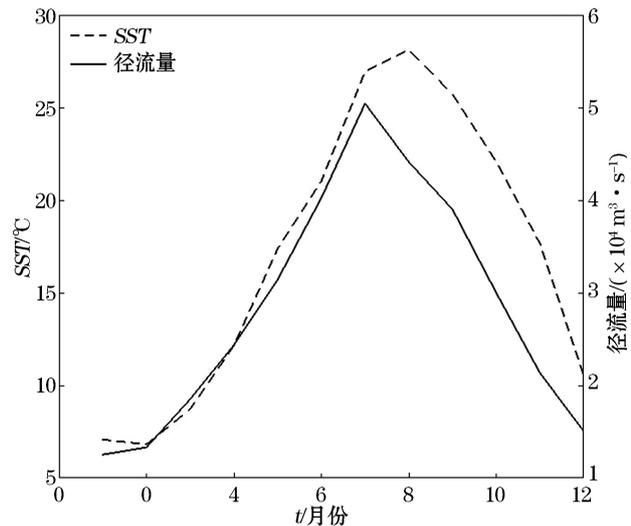


图 14 各月平均径流量与海表面温度分布

Fig.14 Seasonal variation of runoff of the Yangtze River and SST

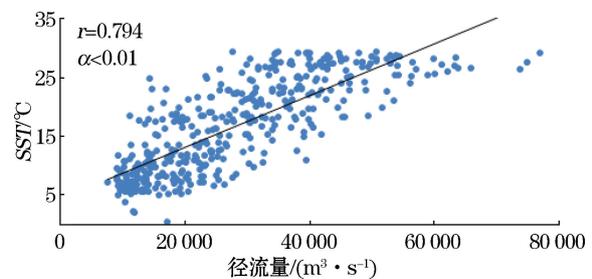


图 15 月平均径流量与海表面温度的相关性

Fig.15 Correlation between monthly mean runoff and SST

表 1 1982—2017 年各月均长江径流量与长江口 SST 相关系数

Table 1 Correlation coefficients between monthly mean runoff and SST from 1982 to 2017

滞后月数/个	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
0	0.056	-0.158	0.343	0.326	0.159	-0.019	-0.134	-0.101	0.174	-0.045	-0.265	0.160
1	0.036	0.098	0.310	-0.142	0.022	0.072	-0.023	0.278	0.484	-0.212	-0.241	0.126
2	0.285	0.105	0.463	0.370	0.029	0.253	-0.118	0.114	0.404	0.067	-0.283	0.232
3	0.247	0.017	0.233	0.302	0.029	0.030	0.159	0.167	-0.086	0.092	-0.013	-0.130
4	0.204	0.218	0.001	0.014	0.026	0.027	-0.105	0.001	0.040	0.098	-0.217	-0.040

综观长江口径流量和滞后的 SST 的相关性,3 月、9 月径流量与滞后 1 个月的 SST 相关系数较大,分别为 0.310 和 0.484;3 月、4 月和 9 月径流量与滞后 2 个月的 SST 相关性较高,相关系数分别为 0.463,0.370 以及 0.404;滞后 3 个月的 SST 与 4 月径流量的相关性较高,为 0.302。3 月径流量对滞后 1,2 个月的 SST 影响较大,也就是对 4 月、5 月的长江口 SST 有影响,4 月径流量对滞后 2,3 个月 SST 的影响较大,这说明 4 月径流量对 6 月、7 月的 SST 有影响。这是因为 3 月、4 月属于季节转换期,冷空气逐渐减弱,且长江地区处于多雨时节,而且此时 SST 比气温高,长江径流携带大量冷水入海,使得混合后 SST 降低^[21]。9 月径流量对 10 月、11 月 SST 的影响较大,这是由于 9 月是季节转换期,冷空气逐渐增加,长江口地区降水量变大,长江携带的暖水对 10 月、11 月 SST 有影响。径流量月变化对 SST 的月变化有一定的影响,但是两者相关性较小,径流量并不是影响 SST 变化的主导因素。

对长江口径流量数据进行谱分析(图 16),发现长江口径流量年际变化具有 4 个明显谱峰,分别对应 17.0,2.4,1.5 以及 1.0 a 的振荡周期。前文分析长江口海域 SST 具有 10.0,3.6,2.4 以及 1.0 a 的显著振荡周期,多年来径流量及 SST 两者存在较一致的振荡周期,说明长江口径流量的年际变化对 SST 年际变化有一定影响。

4.2 气温对长江口邻近海域 SST 的影响

研究区多年月平均气温曲线与 SST 月均曲线的形状极为相似(图 17),均为单峰型曲线,但是气温曲线变化较 SST 曲线提前 1 个月。多年月平均气温与多年月平均 SST 的相关系数为 0.923,而滞后 1 个月气温值与 SST 值相关系数高达 0.981。大气对海洋有决定性作用,即大气温度的变化,通过海气相互作用,从而使 SST 也发生明显的响应。

将 1982—2017 年均 SST 与年均气温相比(图 18),两者存在着部分相同的变化曲线,其相关系数为 0.438,当气温处于上升时,SST 也上升,当气温降低时 SST 也随之降低,气温的变化同样比 SST 变化提前。长时间年均 SST 的变化受气温变化影响较显著,气温对 SST 的变化具有决定性作用,气温升高,通过海气相互作用进行热传输,从而造成 SST 升温。

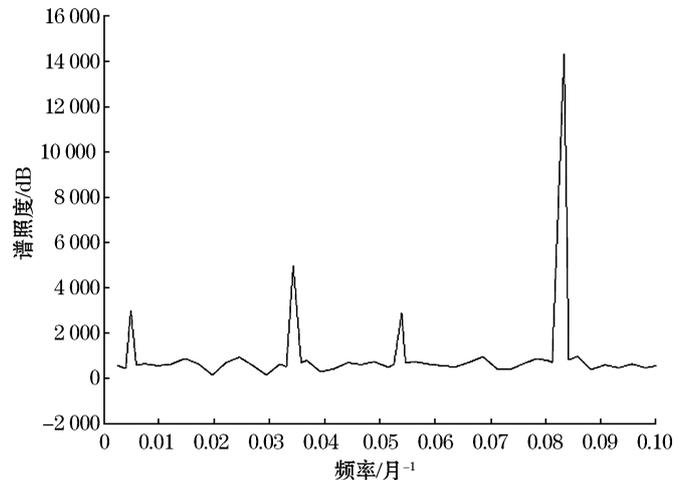


图 16 长江口月平均径流量的谱分析

Fig.16 Spectrum of the runoff of the Yangtze River

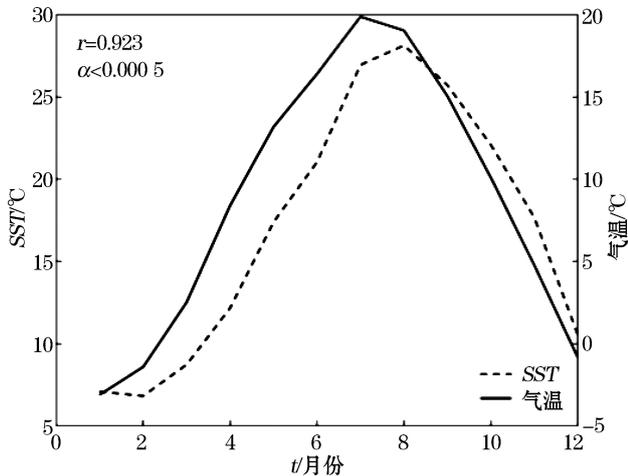


图 17 多年月平均气温与 SST 变化曲线

Fig.17 Seasonal variation of temperature and SST

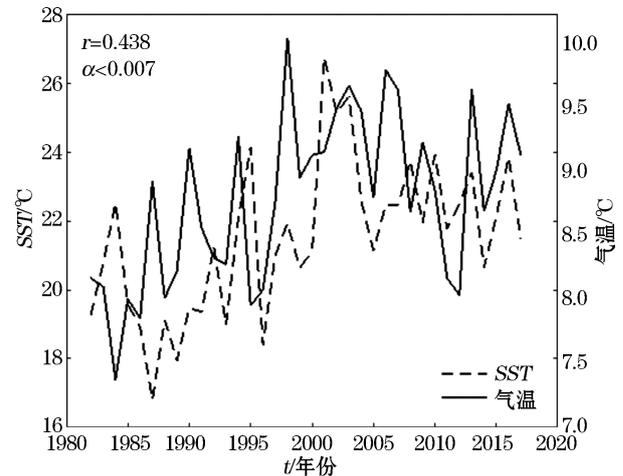


图 18 年平均 SST 对气温的响应情况

Fig.18 Interannual variation of sea surface temperature and SST

5 结 论

本文利用长时间序列(1982—2017 年)SST 遥感数据分析长江口邻近海域 SST 的季节和年际变化规律。利用功率谱分析研究长江口邻近海域 SST 及径流量的振荡周期,并分析两者的响应关系;利用相关性分析探讨气温、长江口径流量对海表面温度的影响程度,旨在揭示影响长江口邻近海域 SST 变化的主要因素。得到了以下结论:

1)从变化周期来看,长江口邻近海域年均 SST 在 36 a 间存在 10.0, 3.6, 2.4 以及 1.0 a 的显著变化周期。

2)从年际变化来看,长江口海域 SST 呈现增温的趋势,每 10 a 增温的幅度达到 0.5 °C。从季节变化来看,SST 的最低值出现在 2 月,最高值出现在 8 月;四个季节随年代变化,SST 都呈现增高的趋势,其中春季 SST 增温最明显,秋季 SST 变化趋势最小。

3)从空间上来说,长江口邻近海域 SST 呈现 NW—SE 向 SST 递增的带状分布特征,其中春、冬季带状分布趋势较明显,变化梯度较大,而夏、秋季空间分带变化梯度较小。

4)长江口径流量对邻近海域 SST 具有一定的影响,从多年变化来看,随着年均径流量的增大(减小),年均 SST 随之升高(降低);从月变化来看,3 月、4 月以及 9 月的径流量对 SST 值的影响较大;气温对 SST 的变化具有决定作用,大气温度的总体趋势是升高的,通过海气相互作用进行热传输,从而造成多年来长江口邻近海域 SST 逐渐升温。

参考文献(References):

- [1] BAO X W, WAN X Q, GAO G P, et al. The characteristics of the seasonal variability of the sea surface temperature field in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea from AVHRR data[J]. Haiyang Xuebao, 2002, 24(5): 125-133. 鲍献文, 万修全, 高郭平, 等. 渤海、黄海、东海 AVHRR 海表温度场的季节变化特征[J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 125-133.
- [2] EMERY W J, CASTRO S, WICK G A, et al. Estimating sea surface temperature from infrared satellite and in situ temperature data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(12): 2773-2786.
- [3] KENT E C, TAYLOR P K. Toward estimating climatic trends in SST: part I methods of measurement[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(3): 464-475.
- [4] BAO L, REN G Y. Sea surface temperature observation methods and comparison of commonly used sea surface temperature datasets[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(6): 52-57. 宝乐尔其木格, 任国玉. 海温观测方法及常用海温资料数据集

- 比较[J]. 气象科技进展, 2013, 3(6): 52-57.
- [5] TANG C L, ZHENG Z Y, YOU D W, et al. Analysis of SST variation in recent 30 years in the Zhujiang River estuary[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2006(1): 96-101. 汤超莲, 郑兆勇, 游大伟, 等. 珠江口近 30a 的 SST 变化特征分析[J]. 台湾海峡, 2006(1): 96-101.
- [6] MUHAMMADBC S, MEMONA A A, MUNEEBA M, et al. Seasonal and spatial patterns of SST in the northern Arabian Sea during 2001—2012[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2016, 19(1): 17-22.
- [7] NABABAN B, ROSYADI N, MANURUNG D, et al. The seasonal variability of sea surface temperature and Chlorophyll-a concentration in the South of Makassar Strait[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 33: 583-599.
- [8] KONG D, WEI G, CHEN M T, et al. Northern South China Sea SST changes over the last two millennia and possible linkage with solar irradiance[J]. Quaternary International, 2017, 459: 29-34.
- [9] WU Y M, XU Z L, FAN W, et al. Change of sea surface temperature in East China Sea during 1985-2005[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(6): 9-18. 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.
- [10] FENG L, LIN X P. Long-term trend of the East China Sea surface temperature during 1945—2006[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(1): 13-18. 冯琳, 林霄沛. 1945—2006 年东中国海海表温度的长期变化趋势[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(1): 13-18.
- [11] GUO W Q, SHA W, CHEN H M, et al. Characteristics and trend of SST variation in the coastal region of the East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2005, 27(5): 1-8. 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.
- [12] KILPATRICK K A, PODESTIFI G P, EVANS R. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2001, 106(15): 9179-9197.
- [13] ZENG G E. Characteristic study of the intra-seasonal variability of sea surface temperature in the East China Sea and the Yellow Sea[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. 曾广恩. 东、黄海海表面温度季节内变化的特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [14] CHEN M R, SHI S H, SHEN H M. Relationship between surface temperature and el nino events in the Yangtze river estuary[J]. Marine Forecasts, 2005(1): 80-85. 陈美榕, 石少华, 沈红梅. 长江口海域海水表层温度与厄尔尼诺事件的关系[J]. 海洋预报, 2005(1): 80-85.
- [15] ZHANG S W, WANG H, JIANG H, et al. Sea surface temperature variations of the Yellow Sea and East China Sea influenced by both ENSO and typhoons in July[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(12): 32-41. 张守文, 王辉, 姜华, 等. 厄尔尼诺和台风共同影响下的 7 月份黄、东海海温变化[J]. 海洋学报, 2017, 39(12): 32-41.
- [16] WU X D, SONG J M, LI X G. Seasonal variation of water mass characteristic and influence area in the Yangtze Estuary and its adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2014, 38(12): 110-119. 吴晓丹, 宋金明, 李学刚. 长江口邻近海域水团特征与影响范围的季节变化[J]. 海洋科学, 2014, 38(12): 110-119.
- [17] MATERIA S, GUALDI S, NAVARRA A, et al. The effect of Congo River freshwater discharge on Eastern Equatorial Atlantic climate variability[J]. Climate Dynamics, 2012, 39(9/10): 2109-2125.
- [18] FENG S H, YANG G. Analysis of the connection between tropical sea surface temperature and convection[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013, 23: 238-240. 冯劭华, 杨刚. 热带海表面温度与对流关系分析[J]. 现代农业科技, 2013, 23: 238-240.
- [19] XIAO L, SHI J, JIANG G R, et al. The influence of ocean waves on sea surface current field and sea surface temperature under the typhoon background[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(4): 396-403. 肖林, 史剑, 蒋国荣, 等. 台风背景下海浪对海表流场和海表温度的影响[J]. 海洋通报, 2018, 37(4): 396-403.
- [20] LI J, ZUO J C, LI Y F, et al. Low frequency variation of SST in South China Sea and its influencing factors[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(5): 575-582. 李娟, 左军成, 李艳芳, 等. 南海海表温度的低频变化及影响因素[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 575-582.
- [21] ZHOU X Y. Climate characteristics of sea surface temperature (SST) variation in the Changjiang Estuary[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005. 周晓英. 长江口海域表层水温变化的气候特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.

Characteristics of the Sea Surface Temperature Variation in Adjacent Area of the Yangtze River Estuary

WANG Jie^{1,2}, WANG Jie¹, XU Jia-feng³, LUAN Kui-feng^{1,2}, YANG Yi-jie¹, LÜ Yang-yang¹

(1. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China;*

3. *School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)*

Abstract: Based on remote sensing data, the characteristics and mechanisms of spatial and temporal variation of sea surface temperature (SST) in adjacent sea area of the Yangtze River estuary were studied with power spectrum and correlation analysis methods. The results show that the SST has an increasing trend of 0.48 °C/(10 a) from 1982 to 2017 and significant oscillation periods of 10.0, 3.6, 2.4 and 1.0 years. Although the rising trend of SST exists in all seasons, the warming trend in spring is most significant while that in autumn is weakest. The SST increases from northwest to southeast in the area. In addition, the change in runoff of the Yangtze River has remarkable impacts on the SST variability, SST becomes warmer (cooler) when the runoff increases, and the impacts are most obvious in March, April and September. Atmospheric temperature above the Yangtze River estuary is significantly correlated with the SST. The general trend of atmospheric temperature has been rising, and this may cause the warming in SST due to positive heat flux from atmosphere to the sea through air-sea interaction.

Key words: the Yangtze River estuary; sea surface temperature (SST); runoff; air temperature

Received: July 29, 2019