

# 东海陆架表层水温年际变化时空特征分析\*

李家星 魏 皓 罗晓凡

(天津科技大学海洋科学与工程学院 天津 300457)

**提要** 结合东海沿岸嵊山(北)和厦门(南)站 1960—2001 年海表温度(SST)监测数据与东中国海 1982—2011 年 AVHRR 水温资料,讨论了台站监测的空间代表范围,分析了东海陆架 SST 年际变化的时空特征。结果表明,嵊山和厦门站 SST 变化分别代表内陆架和台湾海峡。东海陆架 52 年来 SST 总体呈升温趋势,冬季最为显著;内陆架的升幅远大于台湾海峡。内陆架水温冬季分别在 1977 年和 1995 年发生两次跃升,共升温 2.34℃;春、夏、秋季均在 1994 年发生冷暖转折,分别升高 1.19℃、1.43℃和 1.16℃。台湾海峡水温冬季在 1989 年跃升 0.91℃,夏季在 1987 年跃升 0.38℃,春、秋季则在 1996—1997 年间分别升温 0.80℃和 0.58℃。全年水温变化最大处在长江口附近内陆架海区,可能的主导因素是低盐水与外海水混合:随季风、降水、径流变化的沿岸流、长江冲淡水 and 台湾暖流给该区域带来不同水团,使得热量向下层输运减少,从而导致东海内陆架升温快于其它海区。

**关键词** 海表温度年际变化,东海陆架,台站监测水温数据,EOF

**中图分类号** P731.11

海表温度(SST)的空间分布源于海洋内部热力、动力过程及海气耦合的相互作用,能够间接反映因热通量变化所引起的海洋环流系统演变及气候变迁(Tang *et al*, 2002; Li *et al*, 2009)。而 SST 年际变化对海洋生态系统及海气间物质-能量交换等海洋过程有巨大影响(McGowan *et al*, 1998),是目前国内外海洋界研究的热点。

东海作为西北太平洋的边缘海,其大部分海域位于宽广的陆架上,水深较浅,易受外部因素干扰。海域内沿岸与外海流系交汇明显,SST 变化强烈响应于陆架环流的演变(包括沿岸水系、入海径流及暖流等),太平洋的西边界流黑潮对其环流结构有重要影响(Yang, 2007),东亚季风等天气系统也会驱动东海各水系时空变化并促进这些水系间的交互作用(Lee *et al*, 2003)。

东海海域 SST 的年际变化特征较为复杂,近年来颇受关注。郭伟其等(2005)对东海沿岸 8 个海洋站 1960—1999 年共 40 年监测数据进行分析,指出沿岸

海域 SST 变化呈上升趋势,在冬季增幅最大。Tang 等(2009)用中国科学院海洋科学数据集(1957—1996 年历史水文实测数据)分析东海北部冬夏季的 SST 变暖趋势,并讨论了该趋势与气温、长江径流及黑潮的关系。为了解大面海域长期变化趋势,张秀芝等(2005)分析了近百年 HadISST1 模式同化数据,指出中国近海的 SST 有长期升温趋势。冯琳等(2009)进一步分析 1945—2006 东中国海 HadISST1 数据,指出东海升温现象最突出,且变化源于黑潮向陆架入侵增强。而从空间分布来讲,HadISST1 数据所能提供的分辨率较低,相对误差较大。具有较高时空分辨率的 NOAA/AVHRR 卫星产品目前成为区域海洋年际变化分析的良好数据来源,但其时间长度较为有限。鲍献文等(2002)根据 1990—1999 年 AVHRR 资料分析了黄、东海 SST 温度场的季节分布,并探讨了暖流等环流对其变化的影响。宋德海等(2007)利用 AVHRR 资料探讨了东中国海及毗邻海域 1985—2005 年 SST 年际变化与气候指数、地表径流及黑潮流量的关系。李云芳

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目,2011CB403606 号,2010CB428904 号;国家自然科学基金重点项目,40830854 号。  
李家星, E-mail: lillyjiaxing@126.com

通讯作者: 魏 皓, 博士, 教授, E-mail: weihao@ouc.edu.cn

收稿日期: 2011-12-31, 收修改稿日期: 2012-02-28

等(2007)利用 1984—2003 年遥感月均 SST 数据探讨了厄尔尼诺和黑潮、对马暖流、黄海高盐暖水舌对东海 SST 时空演变的影响。Tseng 等(2000)利用 1994—1996 年 AVHRR SST 数据揭示了黑潮、台湾暖流、中国沿岸流及长江羽流等东海海流表层特征的时空分布。黑潮作为大洋西边界流季节变化较小,对陆架海的 SST 影响趋于低频形态,而沿岸流、入海径流及暖流等浅海水系明显存在季节差异,因而对东海陆架海区 SST 空间特征的变异尤为重要。上述研究对理解东海 SST 变异提供了重要信息,但都不同程度上受时间跨度或空间分辨率等因素的限制,尽管台站监测是最准确的数据,但台站的空间代表性还需深入探讨。

为了既能考察水温的年际变化,又能保证数据的精确性、较高时空分辨率和较长的时间跨度,本文结合东海南北两海洋站(嵊山和厦门)1960—2001 年 SST 监测数据与东中国海 1982—2011 年 AVHRR 水温资料,讨论东海陆架 SST 时空变化特征。在完成对卫星数据可靠性分析与校验基础上,量化两海洋站 SST 的空间代表性,并将台站监测和卫星遥感资料融合为自 1960—2011 年的 52 年逐月 SST 数据,以此分析东海陆架 SST 长期变化规律;最后对东海陆架海区 SST 进行空间模态分析,进一步了解东海陆架沿岸水系、入海径流及暖流等对温度场空间特征的影响。

## 1 数据来源与校验

### 1.1 资料来源

本文 SST 台站监测数据源于国家海洋局东海分局分别位于东海沿岸北端嵊山站(30°42'N, 122°49'E)和南端厦门站(24°27'N, 118°04'E),时间跨度为 1960—2001 年共 42 年的月均数据。

卫星资料来自美国国家气象局(NOAA)发射的太阳同步极轨卫星(NOAA/POES),卫星所载的改进型

甚高分辨率辐射计(AVHRR)属于可见光和红外波段辐射计,可以遥感海洋表面温度。本文使用 NOAA 网站提供的空间分辨率为  $0.250 \times 0.250$  最优插值的逐日 AVHRR 观测的覆盖全球海域的 Pathfinder SST 资料。选用资料长度从 1982 到 2011 年共 30 年,将逐日资料处理为东中国海域(20—42°N, 117—131°E)各个格点上 SST 月均数据。

### 1.2 卫星遥感水温在东海的可靠性

目前 NOAA/AVHRR(PFSST)数据产品与现场浮标资料比较,存在系统性误差,且偏差存在显著的区域差异性(Kilpatrick *et al*, 2001; 鲍献文等, 2002)。为检验卫星数据在东海的可靠性,从 1982—2001 年卫星遥感水温数据中选择与嵊山和厦门两个观测站位置相匹配点,并与两站对应的器测数据进行线性拟合。

从 20 年月均 SST 数据的拟合结果可见(图 1),嵊山和厦门两站的卫星与器测数据拟合斜率分别为 0.89(略小于 1)和 1.16(略大于 1),两者差异源于不同的环境(如云、地域等)及受陆地气候影响程度等因素。卫星反演的 SST 数据在嵊山和厦门两站的均方误差(RMSE)分别为  $0.75^{\circ}\text{C}$  和  $0.78^{\circ}\text{C}$ 。然而从相关系数( $R^2$ )上判定,两站卫星与器测数据间都呈现高度相关( $R^2$  达 0.980),可见两者对温度场变化的反映具有良好的 consistency。因此,利用 NOAA/AVHRR PFSST 卫星数据分析区域海表层温度的变化趋势具有较高的可靠性。

### 1.3 嵊山站与厦门站卫星数据订正

为分析 SST 长期变化规律,本研究分别将嵊山和厦门两站近 10 年(2002—2011)的卫星数据补于器测数据(1960—2001)后形成 52 年 SST 长时间序列。因卫星数据存在偏差,需对卫星数据进行订正。通过对两者重合的 20 年(1982—2001)卫星数据与器测数据逐月进行拟合和相关分析可知,卫星数据准确性受季节因素影响严重,每月偏差有所不同。如图 2 所示,尤其在 7、8 月卫星反演质量相对较差,这可能与云量偏多有关,云量影响卫星反演 SST 的质量(王保

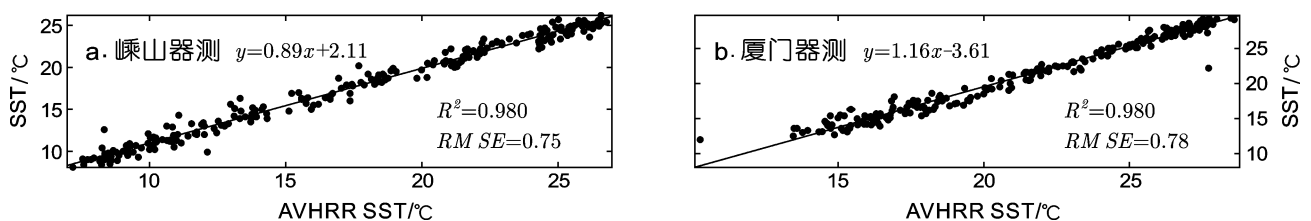


图 1 嵊山(a)和厦门(b)站 AVHRR SST 与器测 SST(1982—2001 年)数据线性校验结果

Fig.1 Linear calibration between AVHRR SST and in-situ SST in 1982—2001 at Shengshan (a) and Xiamen (b)

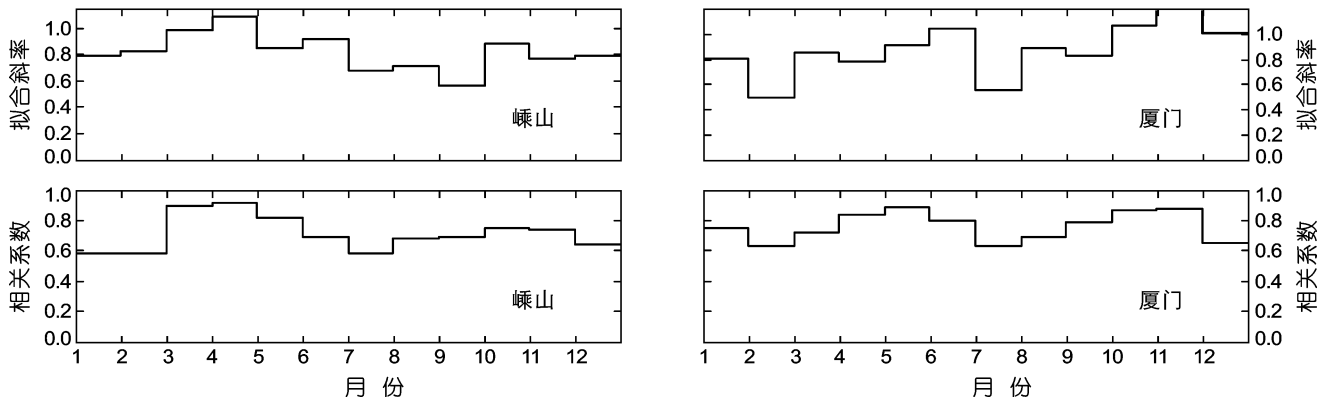


图2 嵎山(左)和厦门(右)站卫星 SST 数据逐月统计评估(包括线性拟合斜率和相关系数)

Fig.2 Monthly fitting slope (upper panel) and correlation coefficient (lower panel) between monitoring data and AVHRR SST of Shengshan (Left) and Xiamen (Right)

华, 2001)。此外, 南北两站也存在不同地理、气候条件(郭伟其等, 2005), 这也对它们的误差统计分布有较大影响。

综合考虑斜率及相关系数的分布情况, 同时也为了增加回归统计的样本数, 将具有相似统计特征的月份合并分别进行线性拟合, 得到各月线性校正方程, 应用这些方程分别去除卫星数据的各月存在的系统误差, 达到更准确订正卫星数据的目的。订正后卫星数据质量如图 3 所示, 嵎山和厦门两站与器测数据线性拟合斜率都达到 1, 偏移仅有  $10^{-3}$  数量级。订正后相关系数( $R^2$ )也相应提高了 6%—8%, 而均方误差(RMSE)降低了 13%—23%, 系统误差被较好地抑制。

## 2 东海陆架 SST 的年际变化分析

嵎山和厦门监测站 SST 变化所能代表的海域范围有多大? 其规律是否具有一定的普适性? 针对上述问题, 本文首先利用 30 年东中国海 SST 卫星数据探讨嵎山和厦门两站 SST 空间影响范围, 然后对两站的 1960—2011 年间 52 年 SST 长序列(融合器测数据与订正后卫星数据)变化规律进行分析。

### 2.1 嵎山、厦门沿岸站水温变化的空间代表性

通常情况下统计学用相关系数(corrcoef)的大小判断两序列变量的相似程度: 系数在 0.4—0.6 间为中等程度相关, 在 0.6—0.8 间表明强相关, 当达到 0.8—1 时则认为两个变量有极强的线性关系。本文利用 1982—2011 年东中国海域 SST 卫星遥感资料, 按月份分别将嵎山和厦门海洋站水温的时间序列与东中国海域各格点时间序列逐一进行相关分析, 并用各自相关系数空间分布来量化沿岸站的 SST 变化的空间代表性。分别取 2、5、8、11 月的嵎山和厦门站相关系数空间分布来认识其空间影响能力, 并认定相关系数大于 0.6(强相关)的区域内 SST 变化趋势具有较好相似性, 能够表征台站的代表范围。从两站各个季节的 SST 相关系数空间分布来看(图 4), 虽然各自影响范围(相关系数 corrcoef > 0.6)存在季节差异, 但代表区域基本一致: 嵎山站 SST 水温变化可代表东海内陆架海域, 厦门站 SST 水温变化可代表台湾海峡; 且嵎山和厦门南北两站的空间格局相对独立, 影响其海温变化的主导因素源于不同的物理机制。

SST 能够有效揭示陆架环流的表层分布特征(Tang *et al.*, 2002; Tseng *et al.*, 2000), 反过来陆架环流

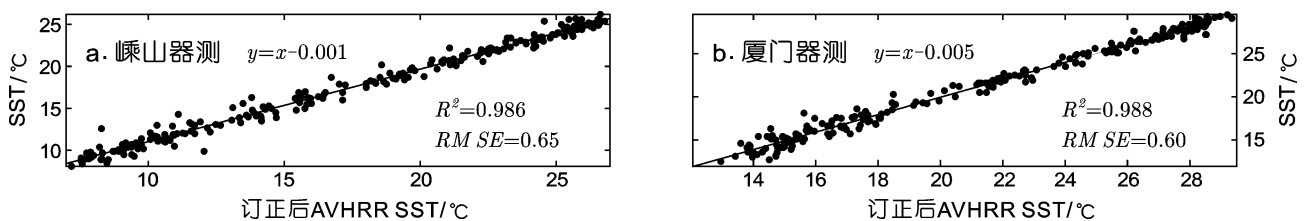


图3 嵎山(左)和厦门(右)站订正后 SST 卫星数据与器测数据线性校验结果

Fig.3 Linear relationship between calibrated AVHRR SST and in-situ SST in 1982—2001 at Shengshan (Left) and Xiamen (Right)

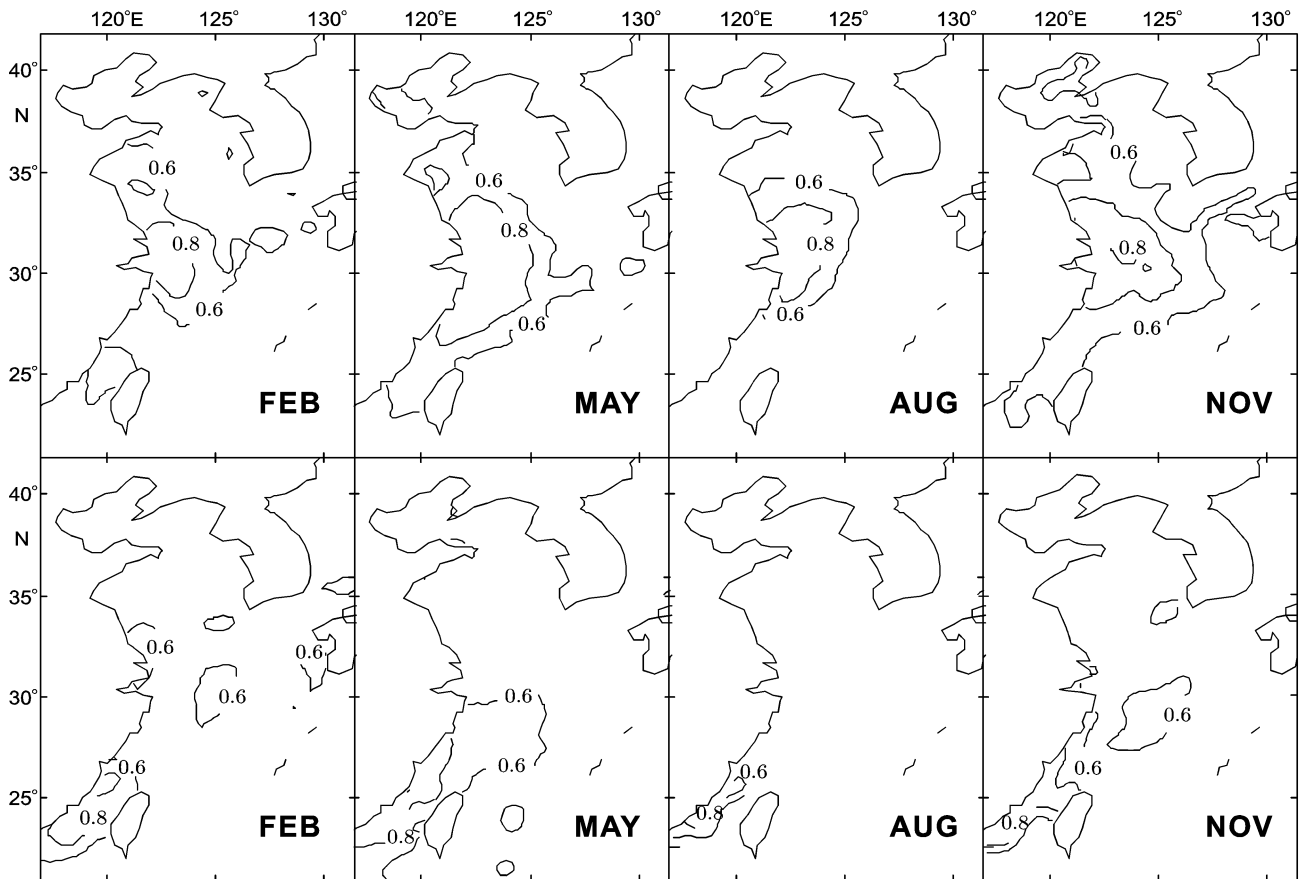


图4 嵊山(上)和厦门(下)站 SST 四季(2、5、8、11月)变化在东中国海分别代表的区域范围

Fig.4 The representative areas of SST variation trend of Shengshan (upper panel) and Xiamen (lower panel) in the ECSs at all seasons (Feb, May, Aug, Nov)

季节变化也势必影响沿岸站 SST 相关系数空间格局。Li 等(2006)在基于水温和盐度是鉴别水团特性最重要指标的前提下,利用美国国家海洋数据中心提供的 1930—2003 年东中国陆架海区的温盐数据,根据温盐结构对水密度的联合贡献率讨论东中国海沿岸水系(黄海沿岸流、闽浙沿岸流等)、暖流(黄海暖流、台湾暖流及台湾海峡暖流)及外海水系(黑潮)逐月演变过程,也可较好地印证沿岸站影响范围空间格局季节差异的形成机制。

冬季(2月),与嵊山站 SST 年际变化强相关的空间格点由内陆架向黄海西北部扩展,主因是较强的东亚冬季季风增强了黄海沿岸流,并向南驱动其到达东海陆架中心(Kawai, 1998; Lee *et al*, 2003),因此冬季嵊山水温变化与黄海近岸水系有较为密切的关系。厦门海域水温主要受闽浙沿岸流和台湾暖流的影响,2月较强的闽浙沿岸流顺岸南下,北风抑制了台湾暖流北上至内陆架。虽然南北沿岸站分处不同系统,

但在冬季厦门和嵊山两站相关系数可达 0.6,有可能其水温变化同时受到季风系统的影响。

春季(5月),虽然黄海沿岸流开始衰减,但增强了的长江冲淡水从长江口向南北扩充并重组沿岸流结构(Chen *et al*, 2001),使得嵊山水温与内陆架西北、西南方向海域水温均有密切关系(相关系数  $\text{corrcoef} > 0.6$ ),此时闽浙沿岸流变窄,台湾海峡暖流和台湾暖流向北注入东海。水团的交互作用,使得与嵊山站 SST 保持强相关的空间格点以长江口内陆架为中心向西北-西南方向扩展,而与厦门站保持强相关的空间格点从台湾海峡向东北方向扩展。

与其它季节相比,夏季(8月)嵊山和厦门站 SST 所代表空间范围相互间最为独立。对于内陆架海区,沿岸流水系基本消失,长江冲淡水从全盛期达到稳态,在偏西南夏季风的影响下,从长江口向东北方向转向(Senju *et al*, 2006)。由于夏季海水层化程度最强,抑制了垂直水温的热量交换,嵊山站表层水温的代

表范围主要受长江冲淡水的影响。而厦门站表层水温的代表范围限制在台湾海峡内, 主要受台湾暖流的影响。鲍献文等(2005)在利用改进 POM 模型模拟东海陆架环流季节演变中指出夏季台湾暖流水中上层主要来自台湾海峡, 因与黑潮间存在顺时针方向的暖涡, 既增加了陆架上的南北水位梯度, 从而阻碍台湾东北部黑潮次表层水向陆架的入侵, 又致使台湾暖流水东分支的减弱。Li 等(2006)也指出在 8 月长江冲淡水是抑制黑潮表层水向陆架入侵的主要因素之一。上述因素都推动两站独立格局的形成。

秋季(11月)长江冲淡水虽然已减弱, 但因东亚冬季风增强, 海面已盛行东北风, 黄海沿岸流和闽浙沿岸流逐渐增强, 嵎山站 SST 相关系数的分布与春季相似。鲍献文等(2005)指出秋季东海南部海区 10m 层海水沿 50m 等深线从台湾海峡直到杭州湾外海北上流动, 黑潮中上层水入侵到台湾东北陆架海域, 形成台湾暖流系统的东分支, 并部分沿 100m 等深线继续北上。由于 11 月份层化现象很弱, 海水的垂直混合及平流输运势必影响厦门表层水温的代表范围的形成格局。

### 2.2 东海表层水温年际变化特征

从上述分析可知, 对东海沿岸南北站(嵎山和厦

门)52 年 SST 长期变化规律进行分析, 在东海海域(内陆架和台湾海峡)内具有一定代表性。采用 STARS (Sequential T-test Analysis of Regime Shift)(Rodionov *et al*, 2005)计算两站温度时间序列的跃变指数 *RSI*, 其中设置显著性检验置信水平  $P=0.1$ , 跃变的切断长度  $L=20$ , Huber 权重参数  $H=1$ 。两站 SST 年均变化曲线如图 5 所示, 东海大部分海域 52 年间 SST 总体呈现升温趋势, 嵎山站的升温幅度远大于厦门站, 其中嵎山站年均 SST 的变化率为  $0.041^{\circ}\text{C/a}$ , 厦门站的变化率为  $0.014^{\circ}\text{C/a}$ 。嵎山和厦门两站在 20 世纪 90 年代以后有较明显的升温, 跃变年份分别发生在 1994 年和 1993 年, 平均水温分别提升了  $1.43^{\circ}\text{C}$  和  $0.57^{\circ}\text{C}$ 。

东海内陆架(嵎山)四季的海表水温年际变化如图 6 所示。嵎山站四季 SST 在 52 年间都有升温趋势, 冬、春、夏、秋季水温变化率分别为  $0.060^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.033^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.033^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.031^{\circ}\text{C/a}$ 。其中冬季升温最为显著, 水温增长速率最快, 几乎是其它季节升温的两倍; 冬季水温(图 6a)在 1977/1978 年存在明显由冷至暖的状态跃变, 且从 20 世纪 80 年代后期升温显著, 并于 1995 年向更暖状态跃变, 两次跃变共增温  $2.34^{\circ}\text{C}$ ; 冬季最冷发生在 1962 年, 平均水温  $8.63^{\circ}\text{C}$ , 最暖发生在 1994 年, 平均水温高达  $14.60^{\circ}\text{C}$ , 两者相差  $5.97^{\circ}\text{C}$ 。

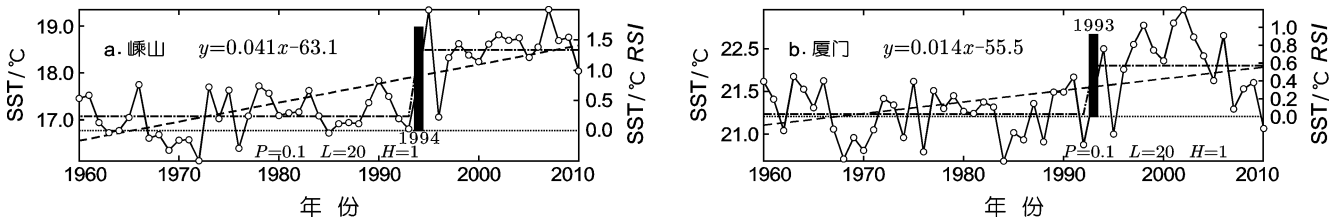


图 5 嵎山(a)和厦门(b)1960—2011 年年均 SST 年际变化

Fig.5 Inter-annual variations of the annual mean SST at Shengshan (a) and Xiamen (b) in 1960—2011

注: 虚线表示平均水温线性年际变化趋势, 折线表示跃变前后水温均值, 柱状图表示 *RSI* 指数

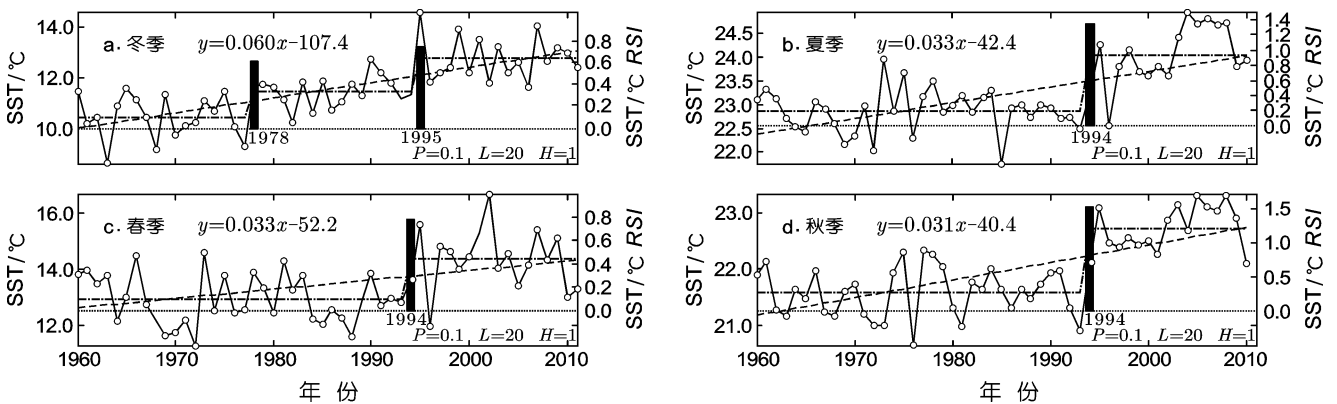


图 6 嵎山 1960—2011 年冬(a)、春(c)、夏(b)、秋(d)四季 SST 年际变化

Fig.6 Inter-annual variations of SST in winter (a), spring (c), summer (b), and autumn (d) at Shengshan in 1960—2011

注: 虚线表示平均水温线性年际变化趋势, 折线表示跃变前后水温均值, 柱状图表示 *RSI* 指数

夏、春、秋季水温冷暖转折均发生在 1994 年。夏季水温(图 6b)在 20 世纪 90 年代前处于相对偏冷时期(平均水温  $22.86^{\circ}\text{C}$ ), 进入 90 年代后, 平均水温达到  $24.05^{\circ}\text{C}$ , 经历了  $1.19^{\circ}\text{C}$  温度跃升。春季水温(图 6c)在 1994 年前后由冷期(平均水温  $12.93^{\circ}\text{C}$ )到暖期(平均水温  $14.36^{\circ}\text{C}$ )提高了  $1.43^{\circ}\text{C}$ 。秋季(图 6d)在 1994 年前后由冷期(平均水温  $21.57^{\circ}\text{C}$ )到暖期(平均水温  $22.73^{\circ}\text{C}$ )跃升了  $1.16^{\circ}\text{C}$ 。

图 7 显示了台湾海峡(厦门)四季水温的年际变化。厦门站在 52 年间亦有升温趋势, 但明显比崂山小很多, 冬、春、夏、秋季水温变化率分别为  $0.020^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 、 $0.008^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 、 $0.008^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 、 $0.012^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。冬季水温(图 7a)增长速率较快, 在 1989/1990 年间有明显的由冷至

暖的状态跃变, 20 世纪 90 年代前平均水温为  $14.78^{\circ}\text{C}$ , 90 年代后的平均水温达到  $15.69^{\circ}\text{C}$ , 相差  $0.91^{\circ}\text{C}$ ; 2008 年后冬季 SST 发生微小降温( $0.61^{\circ}\text{C}$ ), 平均温度下降至  $15.08^{\circ}\text{C}$ ; 冬季最冷发生在 1968 年, 平均水温  $13.17^{\circ}\text{C}$ ; 最暖发生在 2001 年, 平均水温高达  $16.87^{\circ}\text{C}$ , 两者相差达  $3.70^{\circ}\text{C}$ 。夏季水温(图 7b)变幅较小, 在 1987/1988 发生微小跃升( $0.38^{\circ}\text{C}$ ), 平均水温从  $27.39^{\circ}\text{C}$  提高到  $27.77^{\circ}\text{C}$ , 而在 2007 年后发生微小降温( $0.41^{\circ}\text{C}$ ), 平均温度下降至  $27.36^{\circ}\text{C}$ 。春季水温(图 7c)在 1997 年前后由冷期(平均水温  $18.32^{\circ}\text{C}$ )到暖期(平均水温  $19.12^{\circ}\text{C}$ )提高了  $0.80^{\circ}\text{C}$ 。秋季水温(图 7d)在 1996 年前后由冷期(平均水温  $24.36^{\circ}\text{C}$ )到暖期(平均水温  $24.94^{\circ}\text{C}$ )跃升了  $0.58^{\circ}\text{C}$ 。

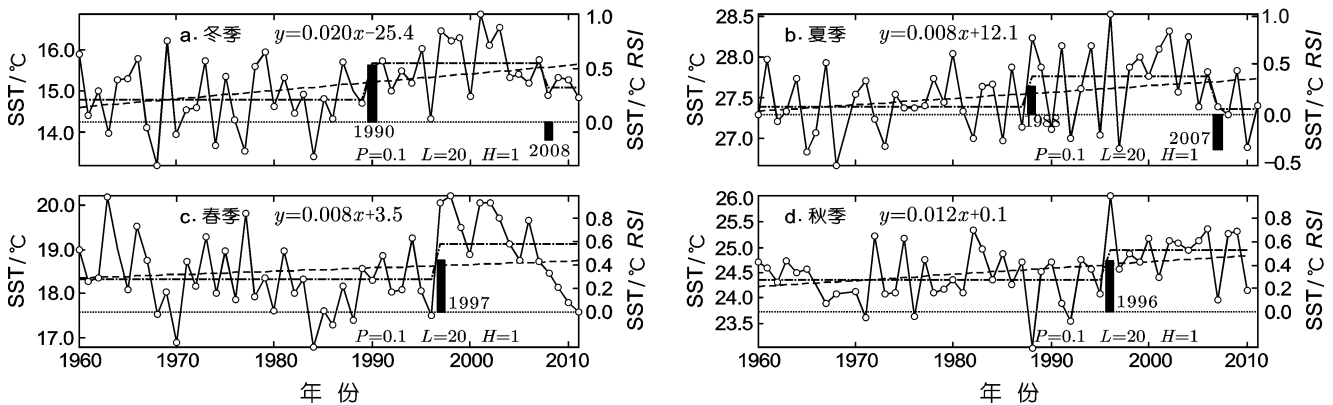


图 7 厦门 1960—2011 年冬(a)、春(c)、夏(b)、秋(d)季 SST 年际变化

Fig.7 Inter-annual variations of SST in winter (a), spring (c), summer (b), and autumn (d) at Xiamen in 1960—2011

注: 虚线表示平均水温线性年际变化趋势, 折线表示跃变前后水温均值, 柱状图表示 RSI 指数

从上面分析可知东海陆架大部分海域 SST 整体呈增温趋势, 冯琳等(2009)与本文分析结果一致。内陆架和台湾海峡的海表水温都表现为冬季升温最为显著, 且冬季水温的波动远大于夏季。这种季节差异可能源于驱动水温变化的主导因素不同。Tang 等(2009)在对 1957—1999 年东海北部海区实测水温数据分析中指出在气候发生冷暖跃变后, 东海北部海域水温在冬、夏两季都有变暖趋势, 而导致它们变暖的成因有所不同: 冬季水温变暖主要受气候变化的影响, 夏季则受黑潮流量变化所引起的台湾暖流水的增强及气候跃迁的影响。因地理因素差异, 台湾海峡(厦门)的水温变化相比内陆架(崂山)更易受到黑潮及台湾暖流水的影响, 本文结果也显示内陆架(崂山)和台湾海峡(厦门)夏季海温变化存在明显差异(不同

跃变年及升温趋势不同)。而在冬季, 两个海区在 20 世纪 80 年代后期都存在明显的升温趋势。Tian 等(2008)在对东海东北部的日本海域 1964—2006 年水温数据(源于日本气象机构 JMA)分析中发现在 80 年代末期冬季出现物理环境由冷到暖的转变, 尤其是对马暖流区; 并认为冬季跃变与北极涛动(AO)和东亚冬季季风存在关系。袁承仪(2011)<sup>1)</sup>基于 1958—2007 年全球与西北太平洋嵌套的 NEMO 模式的模拟结果, 发现黄海冬季水温在 1989 年后发生跃升, 其年际与年代际变化均主要受当年局地东亚冬季风强度的影响, 并与大尺度的冬季北极涛动现象存在一定联系。这些都从侧面反映在冬季陆架海域 SST 的变化趋势极可能受气候系统的影响较大。然而, 大气及海洋信号对东海陆架各季水温升温趋势的影响模

1) 袁承仪, 2011. 黄海水温与环境变化特征及机制研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 46—49

式较黄海复杂,其动力机制有待更深入的研究。

### 3 基于遥感观测的 SST 年际变化的空间分布特征

为进一步了解东海陆架表层温度场空间分布特征,对东中国海 200m 以浅海域的 30 年 SST 卫星数据进行经验正交函数(EOF)分析。EOF 分析应在 SST 距平场上计算,这样既可完全保留各空间格点不同时刻 SST 的差异,又可反映 SST 的时间变化特征。且利用特征值较大的典型场(贡献率>10%)可较充分地描述原始场的变化。本研究先分析东海陆架海区年均 SST 主要的空间模态,后分季节讨论影响其空间变化的主要因素,并结合各模态时间变化函数对台站观测结果进行印证。

#### 3.1 东海陆架年均 SST 的经验正交分析

年均 SST 的 EOF 分析滤除了季节变化的影响,其第一模态占比总方差的 64.0%,是东中国海陆架海区 SST 年际变化的主要空间形态。如图 8A 所示,该模态的量值在整个东中国海陆架上均为正值,说明整个海区水温的升降是同步的。从空间模态的系数分布可看出,东海的 SST 变化明显大于渤、黄海;模态中振幅变化较大的区域附近都存在入海的河流或沿岸水系,是陆地淡水和海水混合的强盛区域,特别是在径流量较大的长江口附近(尤其在台州近海)内陆架海区出现了振幅的最大值,且随着长江冲淡水的外推表现出一种舌状分布。宋德海等(2007)在对东中国海域(包括深海区)1985—2005 年的卫星资料进行 EOF 分析中也得到与本文相似的结论,并通过与长江大通站 1985—1999 年平均流量对比,指出该处水温变化最大的主要原因源于陆地径流引起的淡水与海水混合。将第一模态空间分布与时间变化函数(图 8C)结合可看出,在 20 世纪 90 年代后(1993/1994 年跃变),整个东中国海陆架海区有明显的升温趋势,空间系数也表明内陆架的升温趋势明显高于台湾海峡,这与前面台站(崂山和厦门)的 SST 年际变化趋势是一致的。

年均 SST 的 EOF 分析的第二模态贡献率占 10.7%,空间模态(图 8B)中东海海域振幅变化较大区域为台湾海峡及其东北部闽浙沿岸海区。该海域全年存在台湾暖

流水,而台湾暖流主要由台湾海峡暖流和东海陆架边界的黑潮上涌水组成,其中台湾海峡暖流来自南海表层水(Li *et al.*, 2006)。台湾暖流保持着高温高盐的特性,向北入侵东海陆架,通过平流热量输送一定程度上影响东海浅海表层水温的变化。第二模态时间系数(图 8D)在 1990—2000 年间为负数,台湾海峡的空间系数为正值,表明在此期间该模态水温有降低趋势,然鉴于第二模态贡献率较低(权值较小),与第一模态升温趋势相结合,只能说明在 90 年代台湾海峡海表水温的增长幅度减少,从而进一步拉大台湾海峡与内陆架升温趋势的差距。

#### 3.2 东海陆架四季 SST 的经验正交分析

东海陆架海区混合层浅,与大洋的深混合层相比热惯性小,SST 空间变化特征更易受浅海环流的影响。而在东亚季风等因素的驱动下浅海环流结构存在明显的季节演变(Lee *et al.*, 2003),因此该海域 SST 的空间特征存在一定季节差异。图 9 为对冬季 SST(12 月、1 月、2 月)的 EOF 分析中前两个模态的时空特征。第一模态贡献率占 50.5%,其空间模态(图 9A)的振幅量值均为正值,说明整个海区 SST 冬季年际变化趋于一致;再结合该模态时间函数(图 9C),可得出在冬季整个海区在 20 世纪 80 年代末期呈现升温趋势;SST 变化较大区域出现在南黄海西部以及东海

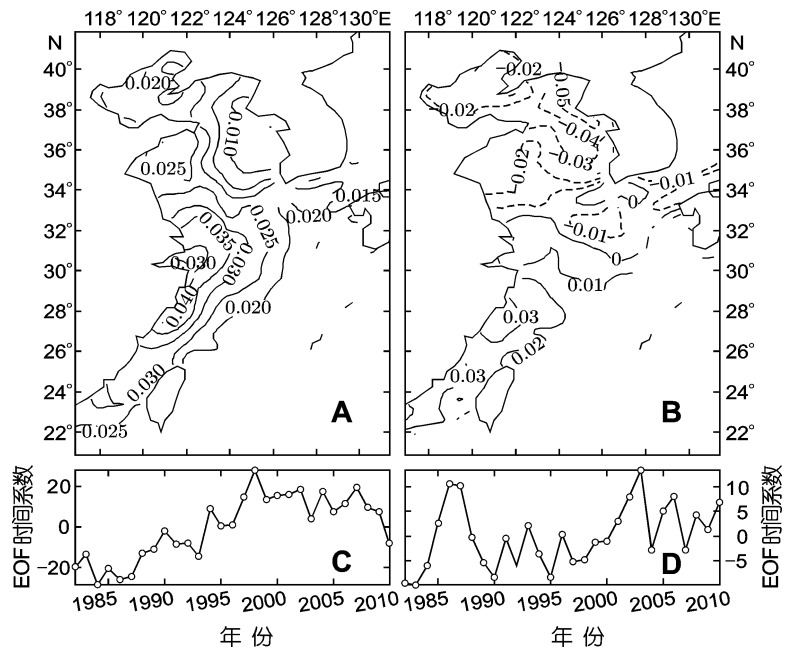


图 8 东中国海陆架海区年均 SST 的 EOF 分析前 2 个模态的时空分布  
Fig.8 The spatial and temporal distribution of the first two modes obtained by EOF analysis for annual mean AVHRR SST in the shelf of the East China Seas  
注: A 和 C 分别为第一模态时、空分布, B 和 D 分别为第二模态时、空分布

近岸水域, 即易受沿岸水系控制及影响的海区。冬季偏北风盛行, 黄海沿岸水和东海闽浙沿岸水都得到较大的增强(Li *et al.*, 2006, 2009)。同时在季风驱动下,

黄海沿岸水沿东南插入东海中心, 而东海沿岸流也自长江口、杭州湾经舟山群岛沿浙闽海岸南下紧贴海岸流动。因此沿岸淡水与海水混合是导致冬季海表水温较快变化的主要因素。第二模态贡献率为 14.9%, 其空间模态(图 9B)表现为: 东海南部出现较高的正变率, 主要体现台湾海峡暖流及黑潮的影响; 而在黄海暖流和沿岸流的影响下, 渤、黄海出现较大的负变率; 不同影响机制导致南、北海域的反位相变化; 冬季海水层化现象消失, 垂直混合致使海水热容很小。第二模态时间函数(图 9D)在 20 世纪 90 年代多数年份为负值亦表明台湾海峡冬季增温幅度不如内陆架显著。

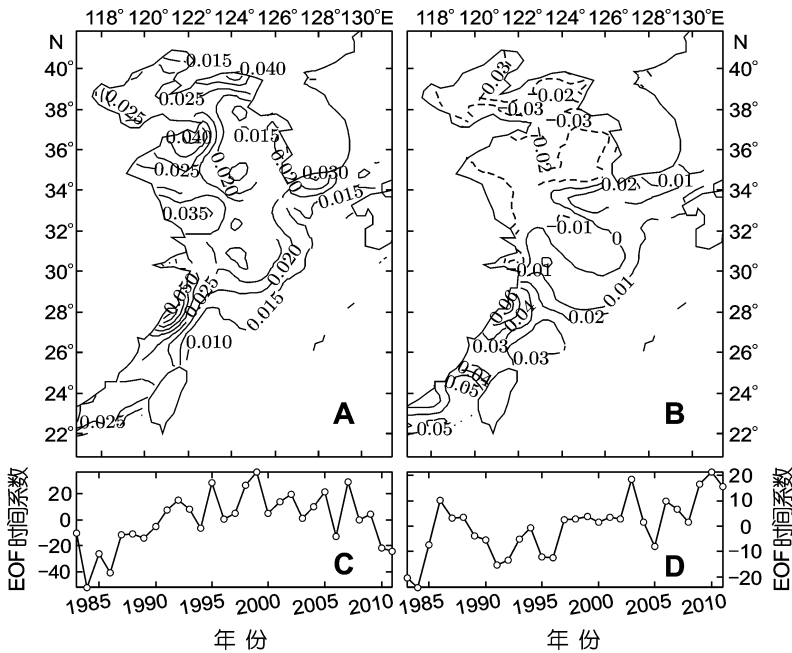


图 9 东中国海陆架海区冬季 SST 的 EOF 分析前 2 个模态的时空分布  
 Fig.9 The spatial and temporal distribution of the first two modes obtained by EOF analysis for winter AVHRR SST in the shelf of the East China Seas  
 注: A 和 C 分别为第一模态时、空分布, B 和 D 分别为第二模态时、空分布

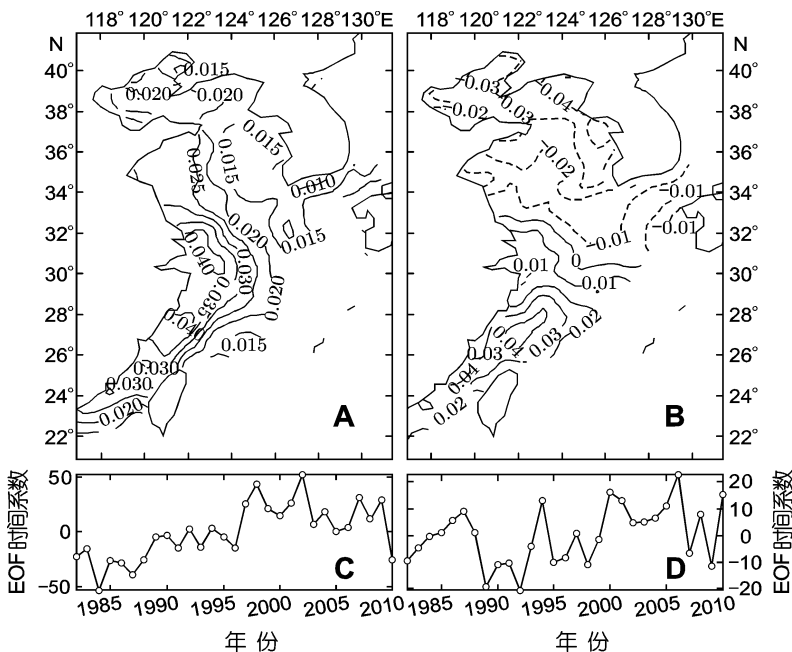


图 10 东中国海陆架海区春季 SST 的 EOF 分析前 2 个模态的时空分布  
 Fig.10 The spatial and temporal distribution of the first two modes obtained by EOF analysis for spring AVHRR SST in the shelf of the East China Seas  
 注: A 和 C 分别为第一模态时、空分布, B 和 D 分别为第二模态时、空分布

在春季 SST(3、4、5 月)的 EOF 分析中, 第一、二模态的贡献率分别为 59.4% 和 11.3%。如图 10 所示, 其变化特征与年均 SST 的变化较为一致。由于春季偏北风由强到弱的变化, 3 月份黄海及闽浙沿岸流最强, 4—5 月份逐渐衰退(Li *et al.*, 2006), 而长江冲淡水逐渐增强, 并在季风的作用下从长江口直下东南(Lie *et al.*, 2003), 成为影响春季东海表层水温变化的主要因素(第一模态如图 10A)。相比冬季, 台湾暖流逐渐向北方向进入东海成为影响春季 SST 变化的次要因素(第二模态如图 10B)。结合第一、二模态的时空系数的乘积上看, 整个海域在 90 年代中期以后(1994 年)春季水温呈升高趋势。

图 11 为对夏季 SST(6、7、8 月)的 EOF 分析中第一、二模态的空间函数, 贡献率分别为 49% 和 11.6%。从第一空间模态的分布格局(图 11A)可知, 长江冲淡水是夏季水温变化主要因素, 且影响范围向东北方向(日本海)扩充。在夏季, 黄海与闽浙沿岸流基本消失, 而长江径流从 6 月开始进入全盛期, 7、8 月达到稳定状态, 其中 7 月流量最大(Lie *et al.*, 2003)。在偏南风的作用下, 长江冲淡水形成为舌状羽流从长江口向东北方向扩展到济州岛(Chang *et al.*, 2003)。大量长江冲淡水使得海水盐度快速下降, 致使海域内温盐混合不一致形成较厚的障碍层(Chen *et al.*, 2008)。Park

大量长江冲淡水使得海水盐度快速下降, 致使海域内温盐混合不一致形成较厚的障碍层(Chen *et al.*, 2008)。Park



等(2011)利用数值模拟讨论了在夏季长江径流的增加使障碍层(BL)及混合层底部的层化增强,从而阻碍垂直方向热量混合与运输,导致长江冲淡水所在海域 SST 的快速升温。第二模态空间格局(图 11B)则显示台湾暖流影响的东海南部海区与对马暖流影响的东海济州岛海区出现西南-东北反相的“跷跷板”现象。结合一、二模态的时空系数的乘积(图 11C, D),在 1994 年后多为正值,表明此后的大年份该海域 SST 均升高,冲淡水所在内陆架区(嵎山)域升温最为显著,而台湾海峡(厦门)升温幅度较小。

秋季(9、10、11 月)是夏季到冬季的过渡期,偏东北向的冬季季风开始,黄海和闽浙沿岸流开始出现,海水的层化也逐渐减弱。长江冲淡水虽然变弱,但 9—10 月长江径流流量相对较大,新低盐羽流从长江口流出并与夏季已漂过来的淡水一起向朝鲜海峡输运(Chang *et al.*, 2003),成为影响秋季 SST(第一模态,贡献率占 49.2%,见图 12A)的主要因素。第二空间模态(贡献率占 16.5%,见图 12B)中东海水温变化较大海域则由黑潮与台湾暖流共同引起。秋季黑潮表层水沿 100m 等深线延伸入东海陆架(Li *et al.*, 2006),台湾暖流系统的东分支则因台湾东北部陆架海域的黑潮水入侵而增强并沿 100m 等深线继续北上(鲍献文等, 2005),两者与东海陆架水相互作用一定程度上影响该区域 SST 的年际变化特征。结合一、二模态的时空系数的乘积,秋季水温在 1994 年以后亦呈升温趋势。

### 4 结论

通过对卫星遥感反演数据和海沿岸站监测数据的比较,认为卫星数据反映表层水温长期变化具有较高的可靠性。将东海沿岸南北两站(嵎山和厦门)SST 器测数据与订正后的卫星数据融合,分析了东海陆架 SST 年际变化规律,探讨了沿岸南北台站 SST 的空间影

响范围,以及东海陆架海区 SST 年际变化的空间模态特征。结果表明:

(1) 从 SST 相关系数空间分布上看,虽沿岸站代

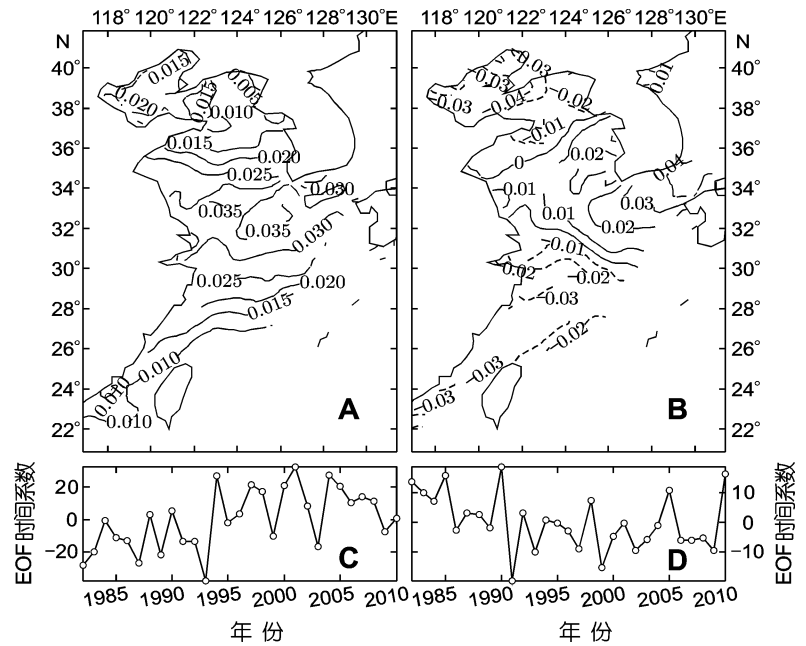


图 11 东中国海陆架海区夏季 SST 的 EOF 分析前 2 个模态的时空分布  
Fig.11 The spatial and temporal distribution of the first two modes obtained by EOF analysis for summer AVHRR SST in the shelf of the East China Seas  
注: A 和 C 分别为第一模态时、空分布, B 和 D 分别为第二模态时、空分布

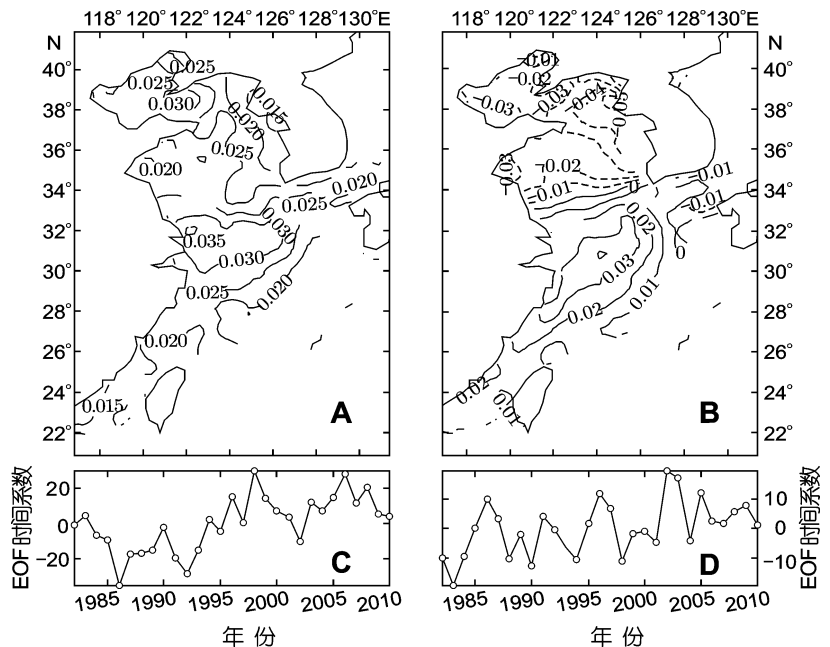


图 12 东中国海陆架海区秋季 SST 的 EOF 分析前 2 个模态的时空分布  
Fig.12 The spatial and temporal distribution of the first two modes obtained by EOF analysis for autumn AVHRR SST in the shelf of the East China Seas  
注: A 和 C 分别为第一模态时、空分布, B 和 D 分别为第二模态时、空分布

表范围存在季节差异, 但总体趋势上反映一致: 崂山站 SST 水温变化可代表东海内陆架海域, 厦门站 SST 水温变化可代表台湾海峡; 且崂山和厦门南北两站的空间格局相对独立, 影响海温变化规律主导因素源于不同的物理机制。东海沿岸南北站(崂山和厦门)SST 变化规律在东海海域广泛范围内具有一定的普适性。

(2) 东海大部分海域(内陆架和台湾海峡)52 年来的 SST 总体呈现升温趋势, 虽然台湾海峡(厦门)每年的年均 SST 皆高于东海内陆架(崂山), 但内陆架的升温幅度远大于台湾海峡, 且两站冬季升温都最为显著。崂山冬季水温共经历两次跃升, 在 1977/1978 年间明显的由冷至暖的状态跃变, 从 20 世纪 80 年代后期升温明显, 尤其在 1995 年后更为突出, 总共提高 2.34℃。厦门站冬季 1989/1990 年间明显的由冷至暖的状态跃变, 跃升 0.91℃。崂山夏季海表水温在 1994/1995 年呈现由冷至暖的状态跃变, 经历了 1.19℃ 温度跃升。而厦门站夏季 SST 在 1987/1988 年间发生较小跃升(0.38℃)。通过极值年份温差的分析可知, 东海陆架大面积海域冬季海表水温的波动远大于夏季, 且在冬、夏季内陆架(崂山站)海表水温的波动远大于台湾海峡(厦门站)。其具体变化机制有待深入研究。

(3) 从东海陆架海区 SST 年际变化的空间分布上看, 东海的 SST 变化明显大于渤、黄海; SST 变化较大的区域在长江口附近(尤其在台州近海)内陆架, 沿岸流及陆地径流引起的淡水与海水混合作用是其变化的主要因素; 空间模态在东亚季风的驱动下存在季节变化: 冬季主要受沿岸水系影响, 夏秋两季主要受长江冲淡水影响, 春季则介于两者共同作用; 此外, 台湾暖流也在一定程度上影响东海陆架南部海域水温变化。

致谢 本文的陆架 SST EOF 分析得益于与加拿大 Bedford 海洋研究所鹿有余博士的讨论, 谨致谢忱。

### 参 考 文 献

王保华, 2001. 极轨气象卫星业务产品 SST 反演方法及精度检验. 气象科技, (1): 27—30  
冯琳, 林霄沛, 2009. 1945—2006 年东中国海海表温度的长期变化趋势. 中国海洋大学学报, 39(1): 13—18  
李云芳, 郭佩芳, 李广云, 2007. 东海海域海表温度场的 EOF 分析. 海洋湖沼通报, 3: 1—4  
宋德海, 于华明, 鲍献文, 2007. 东中国海及毗邻海域 SST 年际变化特征分析. 中国海洋大学学报, 37(sup.): 21—28  
张秀芝, 裘越芳, 吴迅英, 2005. 近百年中国近海海温变化.

气候与环境研究, 10(4): 799—807  
郭伟其, 沙伟, 沈红梅等, 2005. 东海沿岸海水表层温度的变化特征及变化趋势. 海洋学报, 27(5): 1—8  
鲍献文, 万修全, 吴德星等, 2002. 渤海、黄海、东海 AVHRR 海表温度场的季节变化特征. 海洋学报, 24(5): 125—133  
鲍献文, 林霄沛, 吴德星等, 2005. 东海陆架环流季节变化的模拟与分析. 中国海洋大学学报, 35(3): 349—356  
Chang P H, Isobe A, 2003. A numerical study on the Changjiang diluted water in the Yellow and East China Seas. Journal of Geophysical Research-Oceans, 108(C9): 1—17  
Chen Z Y, Li J F, Shen H T *et al*, 2001. Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux. Geomorphology, 41(2—3): 77—91  
Chen X Y, Qiao F L, Wang Q *et al*, 2008. Barrier and compensation layers in the East China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 27(3): 70—78  
Kawai H, 1998. A brief history of recognition of the Kuroshio. Progress in Oceanography, 41(4): 505—578  
Kilpatrick K A, Podesta G P, Evans R, 2001. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. Journal of Geophysical Research, 106(C5): 9179—9197  
Lee H J, Chao S Y, 2003. A climatological description of circulation in and around the East China Sea. Deep-Sea Research II—Topical Studies in Oceanography, 50(6—7): 1065—1084  
Li G X, Han X B, Yue S H *et al*, 2006. Monthly variations of water masses in the East China Seas. Continental Shelf Research, 26(16): 1954—1970  
Li G X, Sun X Y, Liu Y *et al*, 2009. Sea surface temperature record from the north of the East China Sea since late Holocene. Chinese Science Bulletin, 54(23): 4507—4513  
Lie H J, Cho C H, Lee J H *et al*, 2003. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. Journal of Geophysical Research, 108(C3): 3077  
McGowan J A, Cayan D R, Dorman L M, 1998. Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific. Science, 281(5374): 210—217  
Park T, Jang C J, Jungclaus J H *et al*, 2011. Effects of the Changjiang river discharge on sea surface warming in the Yellow and East China Seas in summer. Continental Shelf Research, 31(1): 15—22  
Tang D L, Kester D R, Ni I H *et al*, 2002. Upwelling in the Taiwan Strait during the summer monsoon detected by satellite and shipboard measurements. Remote Sensing of Environment, 83(3): 457—471  
Tang X H, Wang F, Chen Y L *et al*, 2009. Warming trend in northern East China Sea in recent four decades. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 27(2): 185—191  
Tian Y J, Hideaki Kidokoro H, Tatsuro Watanabe T *et al*, 2008. The late 1980s regime shift in the ecosystem of Tsushima warm current in the Japan/East Sea: Evidence from histori-

- cal data and possible mechanisms. *Progress in Oceanography*, 77(2—3): 127—145
- Tseng C, Lin C Y, Chen S C *et al*, 2000. Temporal and spatial variations of sea surface temperature in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 20(4—5): 373—387
- Rodionov S, Overland J E, 2005. Application of sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*, 62(3): 328—332
- Senjyu T, Enomoto H, Matsuno T *et al*, 2006. Interannual salinity variations in the Tsushima Strait and its relation to the Changjiang discharge. *Journal of Oceanography*, 62(5): 681—692
- Yang J Y, 2007. An oceanic current against the wind: How does Taiwan island steer warm water into the East China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 37(10): 2563—2569

## SPATIAL AND TEMPORAL INTER-ANNUAL VARIATIONS OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE CONTINENTAL SHELF OF THE EAST CHINA SEA

LI Jia-Xing, WEI Hao, LUO Xiao-Fan

(College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300457)

**Abstract** Using the AVHRR data (1982—2011) in the East China Sea (ECS) and the in-situ monitoring data (1960—2001) of Shengshan and Xiamen stations which are located at the northern and southern sides of the ECS coast, spatial and temporal inter-annual variations of sea surface temperature (SST) in the continental shelf of the ECS are analyzed. (1) Based on reliability analysis and verification of the satellite data, spatial distribution of correlation coefficients between SST time series of the coast stations and that of each lattice point in ECS are calculated, and it suggests that SST variation trends of this two stations have certain representativeness in broad shelf of the ECS, i.e. Shengshan represents the inner shelf and Xiamen represents the Taiwan Strait areas. (2) The in-situ monitoring data and the calibrated satellite data are merged into 52-year's monthly SST from 1960 to 2011 and the inter-annual variations of SST in the inner shelf and the Taiwan Strait have been analyzed. The warming trends were found especially in winter and the inner shelf (Shengshan) became warming quickly than the Taiwan Strait (Xiamen). In the inner shelf, there were two winter SST shifts from cold to warm phase in 1977/1978 and in 1994/1995 respectively, and the temperature was increased by 2.34°C within 52 years. The shifts in spring, summer and autumn all existed in 1994, and the SST increased by 1.19°C, 1.43°C and 1.16°C in those seasons. In the Taiwan Strait, weaker shifts from cold to warm existed for all seasons, i.e. with 0.91°C rising in 1989/1990 in winter, with 0.38°C rising in 1987/1998 in summer, with 0.80°C rising in 1996/1997 in spring and with 0.58°C rising in 1995/1996 in autumn. (3) More quantitatively, a 30-year time series of AVHRR SST data is examined using EOF analysis to understand the spatial and temporal variations in continental shelf of ECS. The largest inter-annual variation was found in the inner shelf adjacent to the Changjiang estuary. This was mainly influenced by the mixing between seawater and freshwater. Coastal current, Taiwan Warm current and the Changjiang diluted water changed with monsoon and precipitation and brought different water masses. This could induced the less heat flux to the lower water column and made the SST increasing quickly than other areas like middle shelf of ECS or the Yellow Sea.

**Key words** Inter-annual variations of SST, Continental shelf of ECS, Monitoring data of SST, EOF