

文章编号: 1000-5641(2018)04-0184-11

利用 SOM 神经网络研究长江口邻近海域 海表温度特征

白 玫, 吴 辉

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 长江口及邻近水域的海表面温度 (SST) 受到多种动力过程的共同作用, 呈现出复杂的时空变化规律. 本研究基于数值模拟的结果, 采用 SOM (Self-Organizing Map) 自组织神经网络方法, 对长江口及邻近海域 SST 的季节、大小潮和天气等不同时间尺度上的变化规律进行聚类分析. 研究表明: 长江口及邻近海域的 SST 在冬、夏季节比较稳定, 春、秋季节随时间变化较大; 长江口南部沿岸的低温带主要是由长江冲淡水冬季向南扩展造成的; 近岸地区尤其是舟山群岛附近存在低温区, 与浙江沿岸的上升流相关; 苏北地区低温带和向东南方向延伸的低温水舌在冬季和春季最为明显.

关键词: 长江口; SOM 神经网络; 海表温度

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.04.018

Characteristics of sea surface temperature in the Changjiang Estuary and adjacent waters based on a Self-Organizing Map

BAI Mei, WU Hui

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal
University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Sea surface temperature (SST) in the Changjiang Estuary and adjacent waters is affected by multiple dynamic processes, which show complex spatiotemporal variability. In this study, the SST variability was investigated by analyzing modeled results with a Self-Organizing Map (SOM) method. The SST variations were clustered on seasonal, spring-neap, and intra-tidal timescales. It was found that the SST pattern remains stable during the winter and summer seasons but highly variable during the spring and autumn seasons. A cold water band is present south of the Changjiang River mouth in the winter season, due to the southward along-shore extension of the Changjiang River plume. A cold water patch occurs near the Zhoushan Islands, caused by upwelling in the Zhejiang coastal water. In the Subei coastal water, the cold water patch and tongues were most significant during the winter and spring seasons.

收稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(41776101)

第一作者: 白 玫, 女, 硕士研究生, 从事河口海岸动力研究. E-mail: deanbai@sina.com.

通信作者: 吴 辉, 男, 副研究员, 研究方向为河口与近海动力学. E-mail: hwu@sklec.ecnu.edu.cn.

Keywords: Changjiang Estuary; SOM neural network; sea surface temperature

0 引言

海表温度(SST)表征了海洋动力、热力过程和海气相互作用的综合结果,也为解释海洋环流、上升流、海水混合和生物活动等现象提供依据^[1-2]。长江口及其邻近海域的海表温度受到风场、流场、潮汐、河流淡水和地形等多个因素的综合影响,有着明显的季节变化特征^[1,3]。总体上,秋季和冬季,长江口及其邻近海区温度分布为近岸低外海高,近岸温度呈垂直均匀分布,外海深水区中上层温度低且呈均匀分布,底层温度高并形成弱的分层;春季和夏季,近岸温度高,外海温度低,近岸温度大致呈垂直均匀分布,外海分层明显^[4]。鲍献文等^[5]将卫星 AVHRR 资料和实测资料相结合,系统分析了黄、东海海域的月平均温度场的分布特征和变化趋势。他们认为, SST 在冬季受平流结构的影响,出现冷水和暖水舌结构;夏季受地形和海水混合影响,低温海水上升,出现冷水中心结构。

浙江近海,特别是舟山群岛海域,夏季上升流以及由此导致的低温带是长江口附近海域重要的水文特征^[6]。早在20世纪60年代初,毛汉礼等^[7]对南黄海和东海北部的水文特征展开了初步研究,并指出中国东海沿岸存在上升流现象。赵保仁^[8]根据实测资料进一步论证了长江口外的上升流现象,认为长江口外海存在上升流现象的根本动力是海底地形对台湾暖流的抬升作用。黄祖珂等^[9]根据数值模拟结果提出,浙江沿岸海域上升流的产生是由于潮汐的非线性效应和海底地形的共同作用。朱建荣^[10]通过现场观测和遥感图片分析指出,长江口外水下河谷夏季存在上升流现象,低温水集中于杭州湾口门东侧和水下河谷西侧,并用三维数值模拟分析认为,水下河谷北侧上升流的产生主要是由于斜压效应,而在水下河谷南侧的上升流是由于正压效应。Jiang 等^[11]利用数值模拟分析指出,上升流锋面的位置取决于风应力的强度和持续时间,沿岸地形的剧烈变化则使该海区更容易产生上升流。

在黄海南部与东海相接处存在着黄海表层冷水。赵保仁等^[12]通过分析实测数据对此进行研究,指出黄海冷水团的边缘可能存在着海水的上升运动。苏育嵩和苏杰^[13]利用卫星图片分析了黄海夏季表层低温水团的分布特征。翁学传等^[14]研究了黄海冷水团的变化特征,指出南黄海西侧低温中心的温度变化较为显著,东侧低温中心的温度变化幅度较小。李昂^[15]结合多种海洋和气象资料,并利用数值模拟的方法得出,南黄海冷水团两个核心的温度长期变化的趋势不同,西部核心温度升高,东部核心温度降低。于非等^[16]分析了黄海冷水团的演变,得出南黄海西侧的冷水中心位于水深相对较浅的西侧海域,容易受热力因素的作用,存在的时间相对较短,仅出现在春末夏初。

以上研究在气候态时间尺度上对长江口及邻近海域的 SST 变化规律进行了很好的总结。由于实际海洋受到瞬时风场、潮汐和昼夜热通量差异等多种动态变化因素的共同作用, SST 也随之呈现出了复杂的时空变化特征。当前,海洋学的研究逐渐从传统的气候态过程进一步深化到多因素和非稳态过程的研究。由于这些过程在时间和空间上的高度变异性,因此具有海量的信息。对其变化信息进行特征提取则依赖于一些高效的数学统计手段,如 EOF^[17]或 REOF^[18]。

本文采用一种新的研究手段,即 SOM(Self-Organizing Map) 自组织神经网络方法,对数值模拟计算的 SST 数据进行分析,研究长江口及邻近海域 SST 的季节性、大小潮和天气等时间尺度的变化规律。

1 数据及方法介绍

1.1 模型介绍

本文采用的数值模型为 ECOM-si^[19], 来源于普林斯顿海洋模型 POM^[20]. 该模型综合考虑了潮汐、风、径流、海气热通量等多个外部因素的影响, 可用于水动力、泥沙输运、污染物扩散等模拟研究. 模型采用 2.5 阶湍流闭合模型计算垂向粘滞系数和垂向扩散系数^[21]. 利用三阶精度的 HSMT-TVD 数值格式^[21]求解物质输运方程中的平流项过程, 有效地减少了数值振荡并提高了模型计算的准确性.

模型的范围包括了整个东海、黄海、渤海以及日本海部分区域, 水平方向上网格数为 367×319. 其中, 长江口及邻近区域的网格分辨率在 2~3 km. 垂直方向上采用 σ 坐标系, 共分为 20 层. 该模型在以往的研究中已经得到了较多的应用^[23-25], 对长江冲淡水区域的盐度、潮汐和环流等有着很好的模拟结果. 但以往研究未关注海水温度的模拟, 因此本文进一步对海水温度进行模拟研究.

模型起算时间为 2015 年 1 月 1 日, 运算时间为 2 年. 温度和盐度初始条件数据来源于 SODA(Simple Ocean Data Assimilation), 水位及流速初始场设为零. 长江径流量数据为大通站观测点实测数据. 网格开边界条件包括温盐边界条件、环流边界条件和潮流边界条件. 温盐边界条件和环流边界条件的资料为月平均的 SODA 数据 (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/CAR-TON-GIESE/SODA>). 为了得到潮流边界条件, 先用水位调和常数(资料来源于 Nao Tide dataset, <http://www.miz.nao.ac.jp/>) 运行模型, 得出内边界处法向流速, 再进行调和与分析, 最后得到潮流边界的调和常数. 每一时刻的海气热通量场则是由该时刻的大气相对湿度、海气温差、风速、短波辐射、大气压强和云量资料利用块体公式^[26]计算得到. 资料来源于 ECMWF(<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>) 的 ERA-Interim 数据, 时间分辨率为 6 h.

1.2 观测数据

本文中验证数值模型的海温观测数据来自 2016 年 7 月的国家自然科学基金委员会共享航次“长江口科学考察实验研究”项目以及 2016 年 5 月河口海岸学国家重点实验室自主航次. 观测仪器为 Seabird 25 型 CTD.

1.3 SOM方法介绍

SOM(Self-Organizing Map) 神经网络是芬兰学者 Kohonen(1982) 提出的一种自组织竞争人工神经网络^[27], 在数据信息处理, 数据特征提取, 模态识别等领域有着成功应用.

SOM 网络结构分为两层, 输入层和输出层, 输入层接受待处理数据, 输出层为分析结果. 输入层每一个神经元用输入向量表示. 输出层是具有晶格结构的二维神经网络, 需要事先设定神经网络的大小和排列方式, 有矩形排列和六角形排列, 每一个神经元都有一个权向量. 输出层每个神经元与其周围的其他神经元侧向连接, 相邻的神经元称为彼此的邻居, 有侧抑制作用, 抑制方式由相邻半径和相邻函数决定, 侧抑制作用在训练学习过程中对神经元权向量的调节有重要作用. SOM根据某种学习算法, 在无监督的情况进行学习训练^[28]. 学习训练时, 首先要进行向量的初始化, 然后计算每一权向量与输入向量的欧几里得距离, 距离最近的权向量即为胜出者. 再根据学习率函数和欧氏距离, 调整获胜权向量, 同时根据相邻函数调整获胜权向量周围的相邻权向量, 这样就完成了一次训练. 经过反复迭代学习训练, 调整权向量, 使输出层最好地反映输入数据, 从而完成学习分类.

用SOM神经网络方法对数据进行分析时,首先要设置权向量的初始化方法、输出层神经网络的大小及排列方式、相邻函数、相邻半径等参数^[29],这些设置对分析的准确性有重要影响.SOM分析的结果为神经网络学习训练后输出层神经元的权向量(即模态),以及每一时刻的最匹配单元,即这一时刻的场与哪一模态最相近.还有QE(average quantization error)和TE(topographic error)两个表示分析误差的参数.QE即平均量化误差,表示输入层向量与输出层向量的平均距离.TE即拓扑误差^[30],表示非相邻单元最匹配单元与次匹配单元的数据矢量百分比.它们的值越小分析的结果越准确.

SOM在提取海洋流场、温盐场、高度场以及海表风场等方面都有很好的表现.2003年,Richardson等^[31]运用SOM方法分析了NOAA系列极轨环境卫星(POES)在南非西海岸南本格拉地区海表温度的遥感数据.直观地显示了海表温度最基本的模态和年际、季节和天气事件尺度的过程.近年来,刘永刚等^[32]利用SOM和GHSOM(growing hierarchical self-organizing map)方法研究了西弗罗里达海域从1998年到2002年的SST变化模态,并比较了它与EOF的结果差异,指出SOM和GHSOM比EOF在提取信息方面更加有效,可以展示出一些非线性过程.刘永刚等^[30,33-34]还利用正弦函数探索了SOM的各种参数方案的选择对于分析结果的影响,得出了适用于特定情况下最优参数方案的设定,并将其应用到西弗罗里达陆架流场与风场对应关系和中国南海海表高度异常的研究中.

SOM分析方法对多个要素进行综合分析之后,可以对海洋环流进行动力方面的深入探讨,帮助人们更好地理解海洋环流背后的动力学机制.刘永刚等^[35]利用SOM方法对西弗罗里达陆架区域流场、风场和温度场进行了相关性分析,发现在天气尺度上,流场与局地风场的相关性较强;在季节尺度上,流场与局地风和海表温度存在较大的相关性.Tsui和Wu^[36]运用GHSOM方法分析了吕宋海峡的黑潮入侵现象,得出各模态的季节、年际变化与风场、上游黑潮输送和太平洋年代际震荡的相关性.

2 模型验证

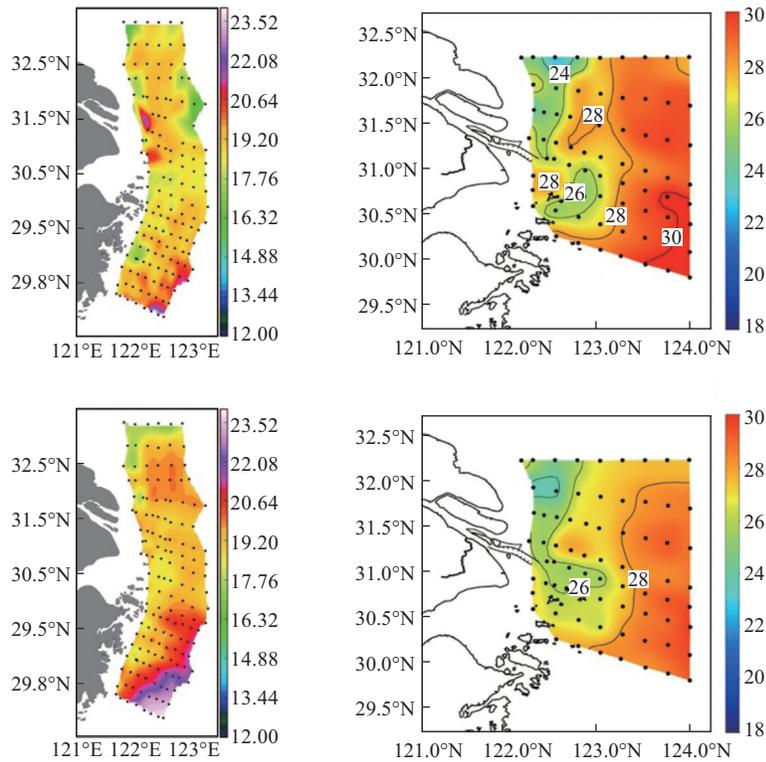
由于本文所用的数值模型在以往研究中已经进行了大量的水流和盐度验证^[23-25],因此只展示了温度的验证结果.图1和图2为2016年5月和7月模型计算结果与实测海表温度的验证对比图.5月长江冲淡水逐渐从沿岸扩展转为离岸扩展,因此近岸的低温水体向外延伸,在形态上呈现了斑块化的结构,似与锋面不稳定有关.7月长江口外存在显著的表层低温带,主要是由上升流引起的.在图2中拟合直线的斜率为0.813,相关系数的平方为 $R^2=0.9075$,接近1.从验证结果看,模型很好地再现了长江口邻近区域SST的时空分布规律.

3 结果分析

3.1 2016年全年海表温度SOM分析

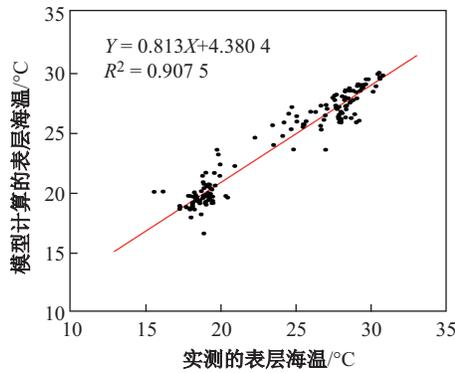
为了减少计算量并确保分析的准确性,将数值模拟得到的2016全年逐时SST在 $120.5^{\circ}\text{E}\sim 126.5^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ}\text{N}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ 范围内进行插值,形成格点数为 36×45 的数据集;然后截断周期为33h的低通滤波,取逐日数据进行SOM分析.设定初始化方法为线性初始化,输出层的网络大小为 3×3 ,排列方式为矩形排列,相邻函数为“ep”,相邻半径为[1 0.1],迭代次数为50次,使得SOM分析结果的TE和QE值尽可能最小^[30],并准确而简洁地反映出海温的季节性变化.图3与图4表示全年海表温度的分析结果.SOM把2016年内的海表温度变化分为9个模态(见图3),每个模态右上角表示了这种模态出现的次数占全年的比重.图4上为最匹配单元(BMU)时间序列图,下方分别为对应时间的区域平均风场、长江径流和海气热

通量的时间序列图. BMU 图指示出从 2016 年 1 月到 12 月, 海表温度分布从模态 1 开始, 以 1 → 4 → 7 → 8 → 5 → 9 → 6 → 3 → 6 → 9 → 5 → 2 → 1 的方式变化.



注: 黑色点代表观测位置; 温度单位°C

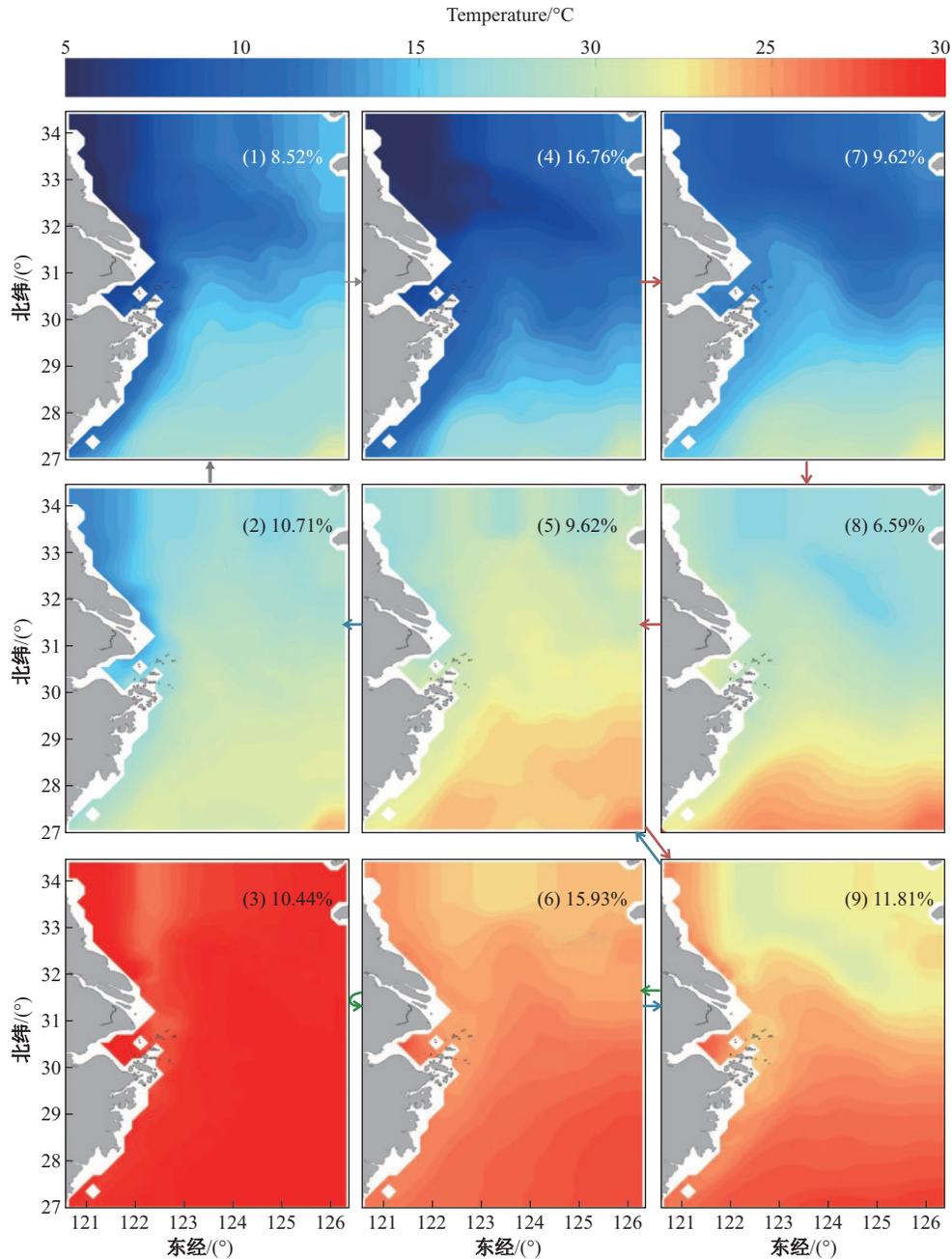
图1 2016 年 5 月(左)和 7 月(右)两个航次现场观测(上)和数值模拟(下)的海表温度对比
Fig.1 Observed (upper panels) and modeled (lower panels) sea surface temperature in May 2016 (left panels) and July 2016 (right panels)



注: 直线表示由数据点线性拟合所得直线, 左上角为拟合直线表达式和相关系数的平方

图2 2016 航次观测点温度与模型温度比较

Fig.2 Comparison of sea surface temperature between observed and modeled results



注: 每个模式右上角的数值表示此模式出现的频率; 箭头(→)表示 BMU 时间序列指示的模式年内变化过程, 根据图 4 中 BMU 图的每一时间段对应的模式, 把模式变化分为四季, 灰色箭头表示冬季模式跳动, 红色为春季, 绿色为夏季, 蓝色为秋季

图 3 2016 全年海表温度 SOM 3×3 的模式结果

Fig. 3 3×3 SOM patterns of sea surface temperature in 2016 with the frequency of occurrence given as a percentage

冬季 12 月底至 3 月中上旬如模式 1、4 所示, 温度总体较低. 在此过程中, 此时海气热通量值较低(见图 4), 特别在一月份, 多数时刻为负值, 海面散热, 温度持续降低, 以致海表温

度由模态 1 变为模态 4. 除此之外, 各海区流场和风场等环境条件对局部海区温度分布有明显作用. 冬季盛行偏北风, 长江径流量较低. 苏北海域存在冷水区, 向东南方向延伸形成低温水舌, 低温的长江冲淡水向南扩展, 长江口南部沿岸存在低温带. 浙闽沿岸外海则由于黑潮和台湾暖流的影响, 温度较高.

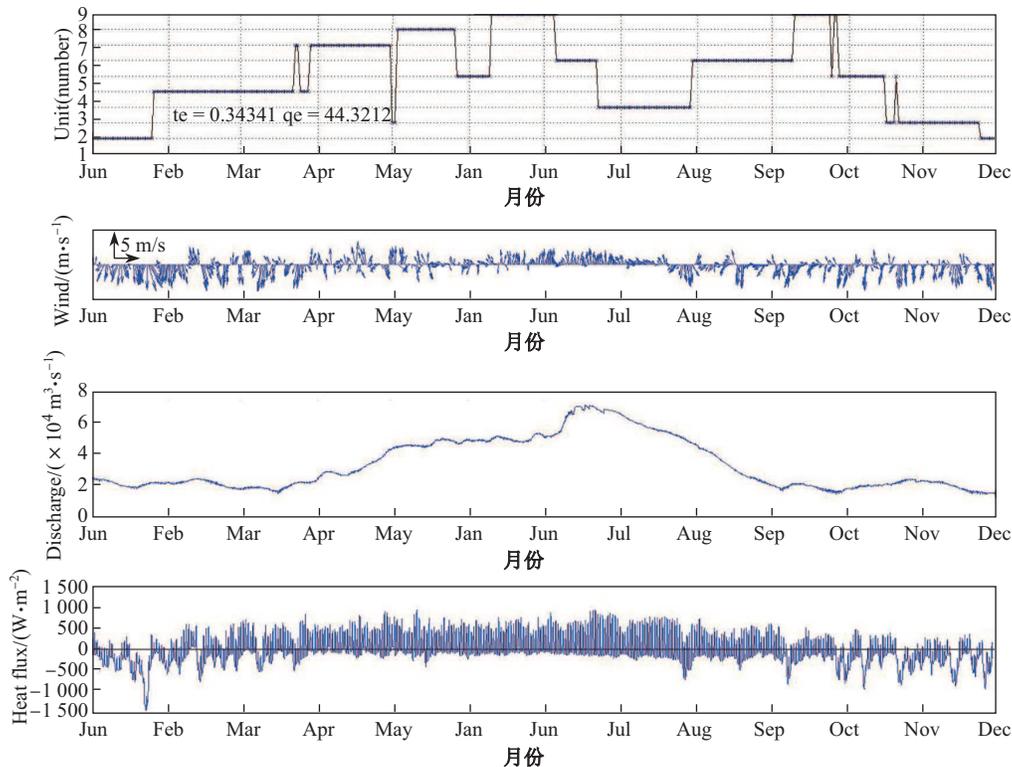


图 4 2016 全年 BMU 时间序列、区域风场时间序列、径流时间序列以及海气热通量时间序列

Fig. 4 BMU time series(first panel), time series of local wind(second panel), runoff(third panel), and air sea heat flux(fourth panel) in 2016

春季 3 月下旬至 6 月中上旬, 模态以 7→8→5→9 的方式变化. 在这期间太阳辐射增强, 海气热通量增大, 海面吸热增加, 因此整体上海表面温度逐渐升高. 此时风场不稳定, 径流量逐渐增大. 苏北和长江口外的冷水舌依然存在, 长江冲淡水的扩展发生了转变, 浙闽沿岸向南扩展的低温带逐渐收缩, 冲淡水向口门东南和东北方向的扩展增多. 高温的黑潮及台湾暖流依然在浙闽外海向北伸入东海.

夏季 6 月下旬到 9 月中上旬, 如模态 3、6 所示, 海气热通量很大, 海水吸热量大, 温度总体高于 25°C, 7 月底到 8 月中旬温度普遍达到 30°C 以上. 夏季长江径流达到 70 000 m³/s, 大部分时间盛行偏南风. 苏北低温区依然存在, 但向东南方向的低温水舌减弱. 浙江近海, 特别是舟山群岛附近存在低温区, 约 24°C 左右, 其与浙江沿岸上升流有关, 该上升流起始于 5 月, 7—8 月达到最强^[9,11]. 夏季长江径流巨大且口门外盛行偏南风, 使冲淡水向东北扩展, 对该海域海温的分布有重要影响.

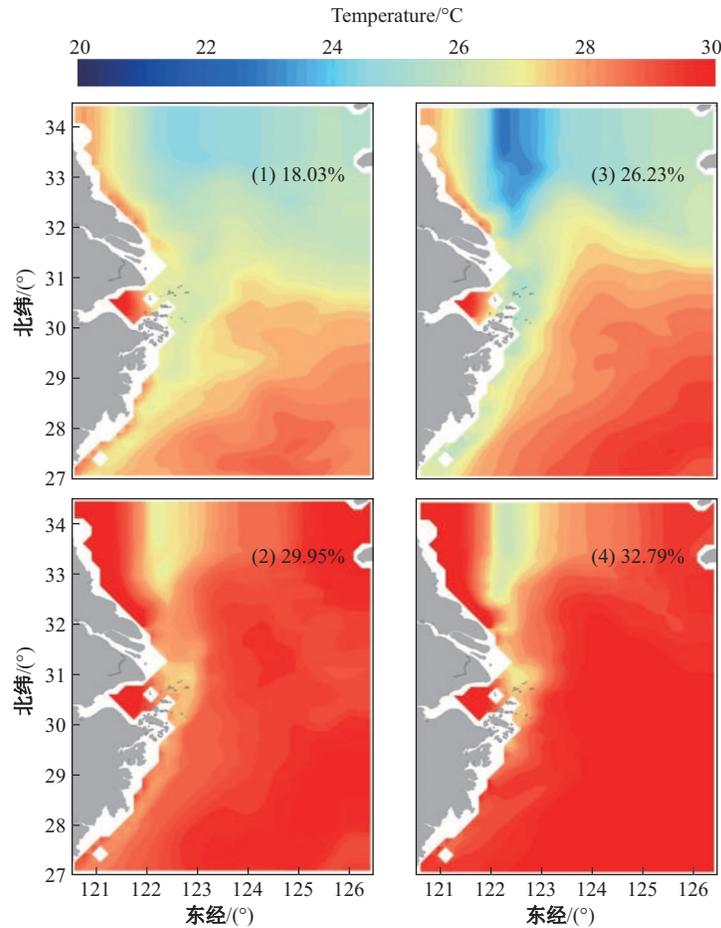
秋季 9 月下旬到 12 月中上旬, 海温主要为模态 9、5、2, 最终回到了模态 1, 这段时期海气热通量减小, 海表散热增多, 温度总体降低. 风向不稳定, 偏北风的发生频率增多, 径流

量逐渐降到约 $20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$. 苏北低温区依然存在, 黄海向南延伸的冷水舌逐渐消失, 温度梯度趋于平缓. 长江冲淡水逐渐由向东南和东北方向扩展变为向浙闽沿岸扩展. 黑潮区依然温度最高. 我们发现模式 5、9 在春季也出现, 说明春、秋季海表温度的分布具有相似性, 均是冬、夏两季相互交替的过渡模态.

3.2 2016 年夏季海表温度 SOM 分析

上文分析表明夏季温度分布为图 3 中的模式 3 和模式 6, 温度的分布形态较为稳定. 为了进一步研究这段时期海表温度的精细变化以及影响因素, 我们截取这段时期的海表温度进行 SOM 分析. 同样, 对每小时数据先进行低通滤波以去掉潮汐振荡等高频信号, 再取逐日的场数据进行 SOM 分析. 因为分析的天数较短, 我们把结果设定分为 4 个模态.

分析结果如图 5、6 所示, 夏季 SST 变化可看作四个主要模态之间的转换. 模式 1 和 3 的总体温度较低, 模式 2 和 4 的总体温度较高. 结合最匹配单元, 温度在 7 月中上旬较低, 长江口南部日均温度为 $28\ ^\circ\text{C}$ 左右, 北部的苏北海域为 $23\sim 26\ ^\circ\text{C}$. 7 月末温度升高, 大部分地区



注: 每个模态右上角的数值表示此模态出现的频率

图 5 2016 夏季海表温度的 SOM 2×2 模态结果

Fig. 5 2×2 SOM patterns of sea surface temperature in the summer of 2016 with the frequency of occurrence given as a percentage

达到 29°C 以上, 苏北近岸存在低温区, 温度约 $26\sim 27^{\circ}\text{C}$, 长江南部沿岸也存在低温水域温度约为 28°C . 9月温度又开始下降, 海表温度如模态1所示. 同时可以看到, 7月中上旬, 模态1、3之间有跳动. 结合水位时间序列图, 可以看出具有较高温度的模态1对应小潮, 较低温度的模态3对应大潮. 这说明小潮期间海表温度相对较高, 大潮期间海表温度较低, 其原因与大潮期间较强的水体垂向混合有关. 同样8月的较高温模态2和较低温模态4稳定时, 也分别对应小潮和大潮时刻. 其他的一些模态微小跳动可能与天气变化等因素有关. 误差分析参数 TE 和 QE 较上节全年结果有所减小, 这与数据量减少有很大的关系.

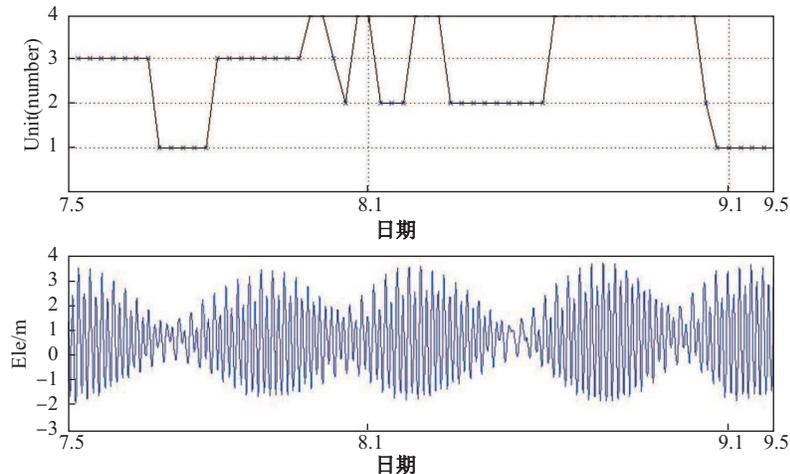


图6 2016夏季的BMU时间序列图(上)和长江口外(122.55°E , 30.95°N)的潮位时间序列(下)

Fig. 6 BMU time series(upper panel) and the water level time series (lower panel) in the Changjiang Estuary(122.55°E , 30.95°N) in the summer of 2016

3.3 2016年天气尺度的海表温度SOM分析

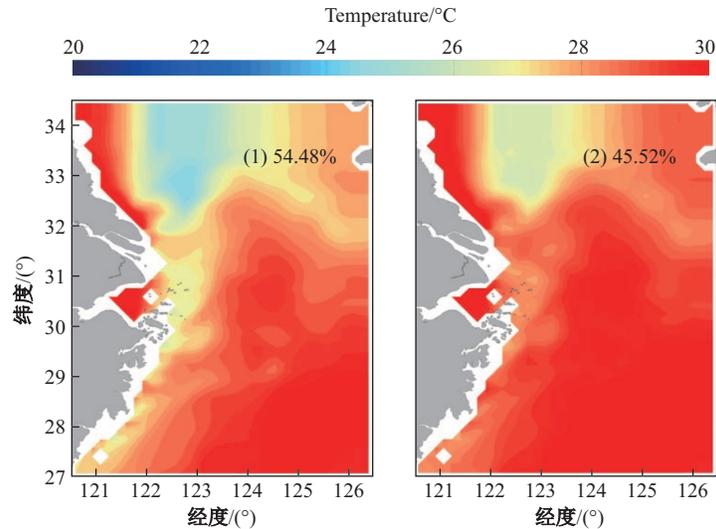
为了更好地分析天气尺度的SST变化, 我们取7月26日0点到8月1日0点之间6d海表温度场数据进行SOM分析. 此时数据不再进行低通滤波, 而是直接分析逐时数据. 由于数据量较小, 结果设定分为2个模态, 即可以得到很小的TE和QE值.

结果如图7和图8所示. 模态1温度总体较低, 模态2则较高, TE趋于0, QE低至16.7. 结合最匹配单元图可以看到, 两种模态存在昼夜周期性的变化, 高温模态2发生在每日的下午时段, 说明海表温度在白天随着太阳辐射持续加热, 在下午达到一天中的最高值, 夜晚温度下降变为模态1. 在逐日变化的基础上, 模态2持续的时间逐渐增加, 体现了这段时期温度总体上升的趋势.

4 总结与讨论

本文利用SOM分析手段, 对长江口及邻近海域2016年的数值模拟海表温度结果进行分析. 首先对全年进行了分析, 得出了年内海表日均温度的总体变化规律. 在冬、夏季节海表温度比较稳定, 春、秋季节随时间变化较大, 这与海气热通量的收支变化有很大关系, 说明太阳辐射和大气热交换是海水的主要热源. 近岸地区特别是舟山群岛附近则存在低温区, 与浙江沿岸上升流有关. 该上升流起始于5月, 7—8月达到最强, 9—10月逐渐减弱. 苏北地区存在低温带及向东南方向延伸的低温水舌, 冬季和春季较为明显, 夏季全场温度升高, 低温水舌不明显, 秋季低温水舌逐渐消失. 长江口南部沿岸的低温带主要由长江冲淡水冬季向

南扩展造成, 秋季开始出现, 冬季温度最低流幅最宽, 春季开始消退. 此外, 本文对 7—8 月份的海表温度进行进一步分析, 得出潮汐对海表温度有重要影响. 小潮期间温度较高, 大潮期间温度较低. 最后, 本文选取 7 月底 6 d 的逐时温度场进行分析, 发现温度场与昼夜变换有关, 在每日午后全场的温度较高.



注: 每个模态右上角的数值表示此模态出现的频率

图 7 2016 年 7 月 26 日到 8 月 1 日 SOM 1×2 海表温度模态结果

Fig. 7 1×2 SOM patterns of sea surface temperature with the frequency of occurrence given as a percentage from July 26th to August 1st, 2016

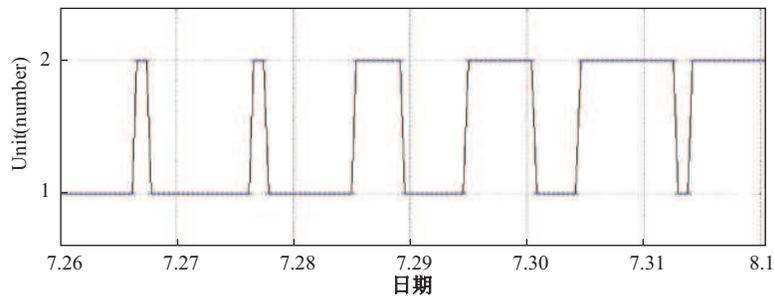


图 8 2016 年 7 月 26 日到 8 月 1 日 BMU 时间序列

Fig. 8 BMU time series from July 26th to August 1st, 2016

同时在使用 SOM 进行了大量分析之后, 发现 SOM 对于数据量小的数据分析结果比较准确, 对于数据量大的数据分析结果误差较大. SOM 分析可以把长江口邻近区域 SST 复杂的时空变化分解成几个基本形态, 并对应了主要的物理过程, 这体现了这种分析方法的优点, 可以在近海海洋学的研究中发挥进一步的作用.

[参 考 文 献]

- [1] 买佳阳. 2000 年以来长江河口海表温度变化的遥感分析 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [2] TADJUDDAH M. Observations of sea surface temperature on spatial and temporal using aqua MODIS satellite in West Banda Sea [J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 33: 568-573.

- [3] 蔡榕硕, 陈际龙, 黄荣辉. 我国近海和邻近海的海洋环境对最近全球气候变化的响应 [J]. 大气科学, 2006, 30(5): 1019-1033.
- [4] 刘兴泉, 侯一筠, 尹宝树, 等. 长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究III温度结构 [J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 526-533.
- [5] 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.
- [6] 苏纪兰, 袁业立. 中国近海水文 [M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
- [7] 毛汉礼, 任允武, 孙国栋. 南黄海和东北北部 (28°—37°N) 夏季的水文特征以及海水类型(水系)的初步分析 [G]//海洋科学集刊. 北京: 科学出版社, 1964(1): 23-77.
- [8] 赵保仁. 长江口外的上升流现象 [J]. 海洋学报, 1993, 15(2): 108-114.
- [9] 黄祖祠, 俞光耀, 罗义勇, 等. 东海沿岸潮致上升流的数值模拟 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 1996(4): 405-412.
- [10] 朱建荣. 夏季长江口外水下河谷西侧上升流产生的动力机制 [J]. 科学通报, 2003, 48(23): 2488-2492.
- [11] JIANG L, YAN X H, TSENG Y H, et al. A numerical study on the role of wind forcing, bottom topography, and nonhydrostaticity in coastal upwelling [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 95: 99-109.
- [12] 赵保仁. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究 [J]. 海洋与湖沼, 1987, 18(3): 218-226.
- [13] 苏育嵩, 苏洁. 渤、黄海夏季低温带及其形成机制初析 [J]. 海洋学报, 1996, 18(1): 13-20.
- [14] 翁学传, 张以恩, 王从敏, 等. 黄海冷水团的变化特征 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 1989, 19(s1): 368-379.
- [15] 李昂. 黄海冷水团年际变化研究 [D]. 山东 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- [16] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析 [J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 26-34.
- [17] WU H, SHEN J, ZHU J, et al. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu Coast [J]. Continental Shelf Research, 2014, 76(2): 108-123.
- [18] 黄二辉, 杨燕明, 潘德炉. 海洋遥感数据缺值对 EOF 和 REOF 时空分布分析的影响 [J]. 应用海洋学学报, 2008, 27(1): 99-111.
- [19] BLUMBERG A F. A primer for ECOM-si [R]. Technical report of HydroQual, Mahwah, NJ, 1994.
- [20] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model [J]. Three Dimensional Coastal Models, 1987(4): 1-16.
- [21] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 851-875.
- [22] WU H, ZHU J. Advection scheme with 3rd high-order spatial interpolation at the middle temporal level and its application to saltwater intrusion in the Changjiang Estuary [J]. Ocean Modelling, 2010, 33(1): 33-51.
- [23] WU H, ZHU J, SHEN J, et al. Tidal modulation on the Changjiang River plume in summer [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(C8): 192-197.
- [24] WU H, SHEN J, ZHU J, et al. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu Coast [J]. Continental Shelf Research, 2014, 76(2): 108-123.
- [25] YUAN R, WU H, ZHU J, et al. The response time of the Changjiang plume to river discharge in summer [J]. Journal of Marine Systems, 2016, 154: 82-92.
- [26] AHSAN A K M Q, BLUMBERG A F. Three-Dimensional Hydrothermal Model of Onondaga Lake, New York [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(9): 912-923.
- [27] KOHONEN T. Self-organized formation of topologically correct feature maps [J]. Biological Cybernetics, 1982, 4(1): 59-69.
- [28] 张莹, 潘保芝. 基于主成分分析的 SOM 神经网络在火山岩性识别中的应用 [J]. 测井技术, 2009, 33(6): 550-554.
- [29] 岳素青. SOM 神经网络的研究及在水文分区中的应用 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [30] LIU Y, WEISBERG R H, MOOERS C N K. Performance evaluation of the self-organizing map for feature extraction [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2006, 111(C5): 101-112.
- [31] RICHARDSON A J, RISIEN C, SHILLINGTON F A. Using self-organizing maps to identify patterns in satellite imagery [J]. Progress in Oceanography, 2003, 59(2/3): 223-239.
- [32] LIU Y, WEISBERG R H, HE R. Sea surface temperature patterns on the West Florida Shelf using growing hierarchical self-organizing maps [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2006, 23: 325-338.
- [33] LIU Y, WEISBERG R H. Patterns of ocean current variability on the West Florida Shelf using the self-organizing map [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C6): 339-357.
- [34] LIU Y, WEISBERG R H. Patterns of upper layer circulation variability in the South China Sea from satellite altimetry using the self-organizing [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 27(S1): 129-144.
- [35] 胡莹英, 赵亮, 郭新宇, 等. 长江口外海域冬、春季水温变化规律研究 [J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 655-661.
- [36] TSUI I F, WU C R. Variability analysis of Kuroshio intrusion through Luzon Strait using growing hierarchical self-organizing map [J]. Ocean Dynamics, 2012, 62(8): 1187-1194.