

南海海表温度时空分布特征的数值模拟

于庆龙¹, 王 辉², 万莉颖²

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要:应用混合坐标HYCOM海洋模式模拟得到南海海表温度17年(1992~2008)的逐月资料,利用经验正交函数分解方法(EOF)得到南海海表温度的时空分布。通过与前人的分析结果进行对比,各个模态的方差贡献率与空间分布型基本一致,说明利用模式模拟可以达到与观测相当的效果。在此基础上,对第二、第三模态的时间系数应用Morlet小波分析,发现均存在半年周期变化,但年周期变化存在明显差别。

关键词:南海;海表温度;HYCOM模式

中图分类号:P731 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2010)04-0059-08

1 引言

南海地处亚洲东南部,是地球上为数不多的半封闭深水海盆之一。南海是海洋-大气相互作用的敏感地区,大气主要通过风应力向南海提供动量,影响和驱动南海上层海洋环流,而南海上混合层中的能量以长波辐射、潜热和感热交换的方式向大气输送能量,影响大气运动^[1]。由于上混合层海水充分混合均匀,海表温度可以很好的表征上混合层的温度^[2,3],因此,海表温度(SST)是描述海洋表层热状况的主要指标。南海海表温度一直是人们观测、研究和预报的重点。

南海海表温度最先引起人们注意的是年际时间尺度上的振荡^[1]。早期,有些学者利用南海个别测站的表层水温,发现南海表层水温存在3~5年和准两年周期的低频振荡。并且指出南海水温低频振荡是热带太平洋水温低频振荡的重要组成部分^[4]。然后,利用COADS资料进一步研究了南海海表温度的季节性变化以及年际变化,分析了南海海表温度的年变化及半年变化周期,并指出南海海表温度与ENSO相关^[5,6]。随着遥感资料的增

多,应用遥感资料时空覆盖率高的优点,进一步来揭示COADS等资料没有反映的信息。Xie等^[7]利用TRMM(Tropical Rain Measuring Mission)资料指出夏季南海西边界的离岸流对越南外海的冷水形成具有重要的作用,形成“南海冷丝”。Liu等^[8]指出,冬季南向的西边界流同样会影响南海海表温度的分布。王桂华等^[9]利用HOAPS(Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite data)资料对南海海表温度时空分布特征进行分析,并且与NCEP资料的时空分布进行了对比,发现HOAPS资料与NCEP资料没有明显差异,但能更好的反映一些细微特征。

数值模式作为研究南海总体特征的主要手段,早期受计算能力和模式发展的限制采用简单的约化重力模式^[10],虽然体现了南海海表温度复杂的空间结构,但模拟精度有待进一步提高。随着计算能力的提高以及数值模式的发展,具备对复杂真实的海洋进行高精度的数值模拟能力。本文采用混合坐标HYCOM海洋模式,在海洋内部用等密度面坐标,在弱层结效应的浅表层应用 z 坐标,在混合强烈的浅水区用跟随地形 σ 坐标^[11],利用混合坐标适合南海复杂地形的优点对南海海表

收稿日期: 2009-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(40531006);科技部国际合作项目(2009DFA20760)

作者简介: 于庆龙(1985-),男,在读硕士,主要从事海洋动力学研究。E-mail: Alexanderyl@163.com

温度时空分布特征进行数值模拟。一方面, 结合高精度数值模式结果, 应用传统的经验正交函数分解方法(EOF)得到南海海表温度的时空变化特征; 另一方面, 在前人工作的基础上对HYCOM海洋模式的模拟能力进行进一步的检验, 通过模式模拟可以反映南海海表温度时空分布特征的主要信息。

2 模式

2.1 模式介绍

HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)海洋模式是在美国迈阿密大学原有等密度面坐标模式MICOM(Miami Isopycnic-Coordinate Ocean Model)的基础上发展起来的。在垂直坐标上, 由单一的等密度面坐标, 发展为可以同时使用 z -平面坐标、跟随地形 σ 坐标和等密度面坐标。将三种坐标的优点结合起来, 同时克服单一坐标系引起的问题。

本实验应用的HYCOM海洋模式经过挪威南森中心的改进, 在网格选取上, 为了使模拟区域网格加密, 进行了正交投影坐标转换^[12]。同时在模式中加入河流通量、潮汐模式。

2.2 试验设计

计算区域东西方向从 $95^{\circ}\sim 133^{\circ}\text{E}$, 南北方向从 $3^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ (见图1)。水平网格数为 180×280 , 采用非均匀网格, 最大网格距为12.87 km, 最小网

格距为11.87 km。垂直三种坐标混合, 采用22个密度层, 其中位势密度为18.00, 18.67, 19.33, 20.00, 20.67, 21.33, 22.00, 22.67, 23.33, 24.00, 25.21, 26.05, 26.62, 27.02, 27.29, 27.47, 27.60, 27.69, 27.75, 27.79, 27.82, 27.84。其中前十个是线性增长的, 后十二个是指数增长的密度层。为了确保 z -层结的存在, 前面一些的层结密度非常小。在选择区域时, 西边界选择在东亚大陆。在选择嵌套区域时, 是将南海区域嵌套在太平洋, 暂时不考虑印度洋对南海的影响, 因此, 将南边界的马六甲海峡关掉。

大气驱动场包括风场、大气温度、降水、云量及相对湿度。开始时是气候态运行, 风场和大气温度选用的是欧洲中心提供的ECMWF资料, 而云量和相对密度是来自COADS资料集, 而降水是来自Legates and Willmott^[13]的气候降水资料。在气候态运行的基础上进行高频强迫运行, 强迫资料采用的是欧洲中心提供的每日4次的风场、大气温度、露点温度和平均海平面气压, 精度为 $1.125^{\circ}\times 1.132^{\circ}$, 2003之后精度提高到 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。气候插值场提供两种选择: 表层气候插值采用的是Levitus气候资料, 垂直剖面气候插值采用的是GDEM气候资料, 均包括温度与盐度资料。对于海底地形的考虑, 模式中采用了间隔为1分的测海地形(General Bathymetric Chart of the Oceans, 简称GEBCO)。为了计算稳定, 沿岸1 m以上的水深设

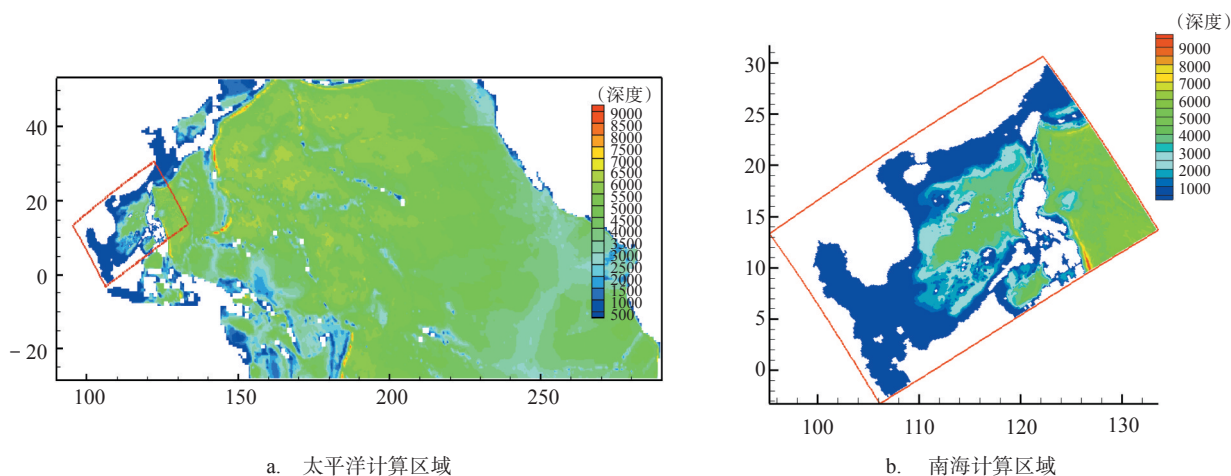


图1 模式计算区域

定为陆地。

南海计算区域嵌套于太平洋计算区域,南海计算区域的边界条件由太平洋计算区域给定,而不是人为的给定。从而在一定程度上避免人为因素引起的误差。太平洋计算区域东西方向从 $95^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{W}$,南北方向从 $28^{\circ}\text{S}\sim 51^{\circ}\text{N}$,水平网格数为 300×140 (见图1),同样采用非均匀网格,最大网格距为72.56 km,最小网格距为45.11 km。太平洋计算区域气候态运行10年,南海计算区域气候态运行5年,在气候态运行的基础上从1992~2008年进行高频强迫运行,模式结果按天输出,得到17年的时间序列。

3 模式结果分析

3.1 模式性能检验及误差分析

为了检验HYCOM海洋模式模拟南海海表温度(SST)的能力,首先采用GDEM气候态资料与模式输出结果进行比较,在比较气候态模式误差之后,为了检验模式在小的时间尺度上的模拟能力,对于最后三年(2006~2008年)的逐日资料,采用MGDSST逐日海温资料与模式结果进行比较。采用广泛应用于海洋模式进行海表温度(SST)检验的统计工具^[14],包括平均差、均方差和相关系数。

图2显示了GDEM气候态资料与HYCOM模拟结果的比较。平均值之差与均方差的图上,图中深色阴影区域表示温度误差在 1°C 以上的区域。南海中部海盆区域温度误差在 1°C 以内。往近岸区域,误差增大,这与其他人用HYCOM模式进行南海区域海表温度(SST)模拟的结果一致^[13]。由于浅海模拟对分辨率,模式动力框架等诸多方面要求更高,虽然采用了近似 0.1° 度的网格分辨率,并且应用跟随地形的 σ 坐标,但误差仍然较大。在相关系数图上,图中浅色阴影区域表示相关性在0.9以上的区域,深色区域表示相关性在0.95以上的区域。HYCOM模拟结果与GDEM气候态资料相关性非常好,整个模拟区域大部分区域相关性在0.95以上,但在加里曼丹岛西北海域,出现相关性低于0.8的区域,可能是由于此区域靠近嵌套区域的边界,而且受复杂地形的影响。

图3显示了MGDSST逐日海温资料与HYCOM模拟结果的比较。在平均值之差图上,图中浅色阴影区域表示温度误差在 0.5°C 以上, 1°C 以内的区域,图中深色阴影区域表示温度误差在 1°C 以上的区域。南海绝大部分区域温度误差在 1°C 以内,中部海盆区域温度误差在 0.5°C 以内,只在近岸少数几个区域温度误差在 1°C 以上。在均方差图上,图中深色阴影区域表示温度误差在 1°C 以上的区域。与平均值之差的温度误差相类似,南海绝大部分区域温度误差在 1°C 以内,只在近岸少数几个区域温度误差在 1°C 以上。在相关系数图上,图中浅色阴影区域表示相关性在0.9以上的区域,深色区域表示相关性在0.95以上的区域。整个模拟区域大部分区域相关性在0.9以上,其中南海北部与南海南部相关性在0.95以上。

3.2 时空分布特征

3.2.1 空间分布特征

表1为南海海表温度三个最主要的模态的方差贡献率。其中一、二、三模态的方差贡献率与王桂华等^[9]分析HOAPS资料所得到的一、二、三模态的方差贡献率基本一致。其中HOAPS资料为逐月平均资料,时间序列为1988~2002年,与本试验中的时间序列基本一致,因此具有可比性。

表1 SST最主要的三个模态的方差贡献率(%)

参数	方差贡献率	HOAPS资料 ^[9]
第一模态	86.6	85
第二模态	8.3	11
第三模态	1.3	1
累计方差贡献率	96.2	97

图4为南海海表温度特征向量的时空分布图,其中一、二、三模态的空间分布型与王桂华等^[9]分析HOAPS资料所得到的一、二、三模态的空间分布型基本一致。对于海表温度的第一特征向量的空间分布型,整个南海被一片强负值区控制,等值线由南向北逐渐减小,与纬度平行但明显受到沿岸地形的影响,南海北部沿岸地区达到最小。此空间分布性主要反映的是季节性变化特征^[9],在时间变化上具有明显的年周期变化特征。

对于海表温度的第二特征向量的空间分布型,以 18°N 附近大致与等深线平行的等值线为

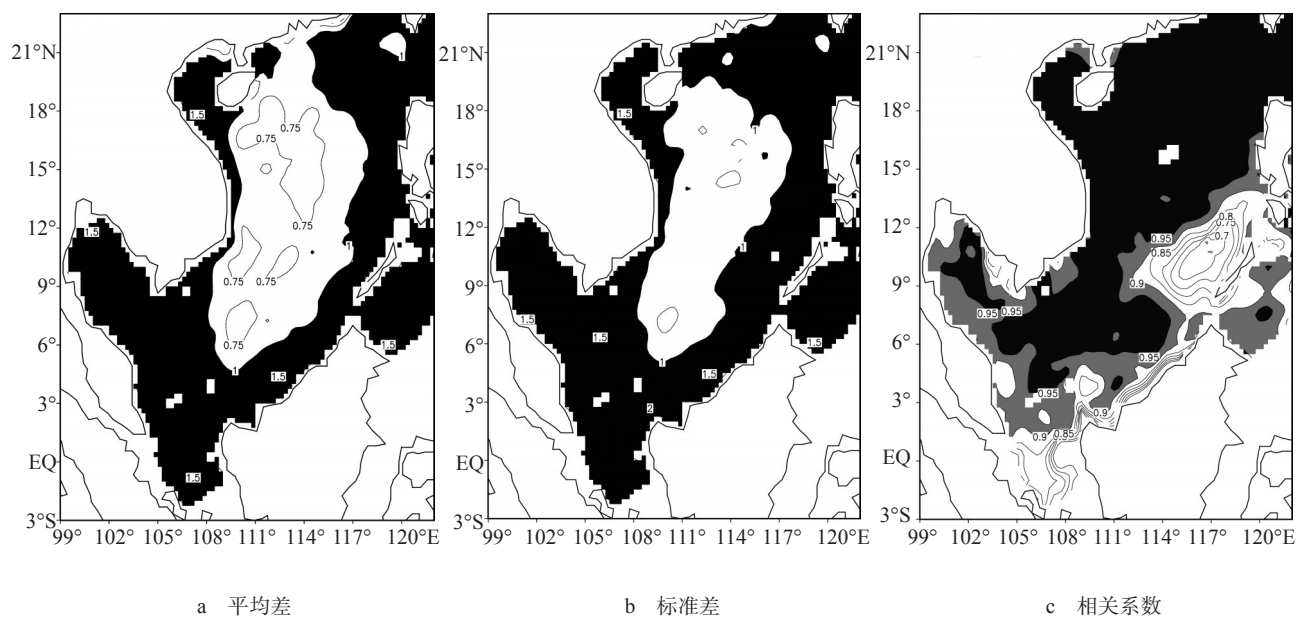


图2 GDEM气候态SST与HYCOM模拟结果的比较

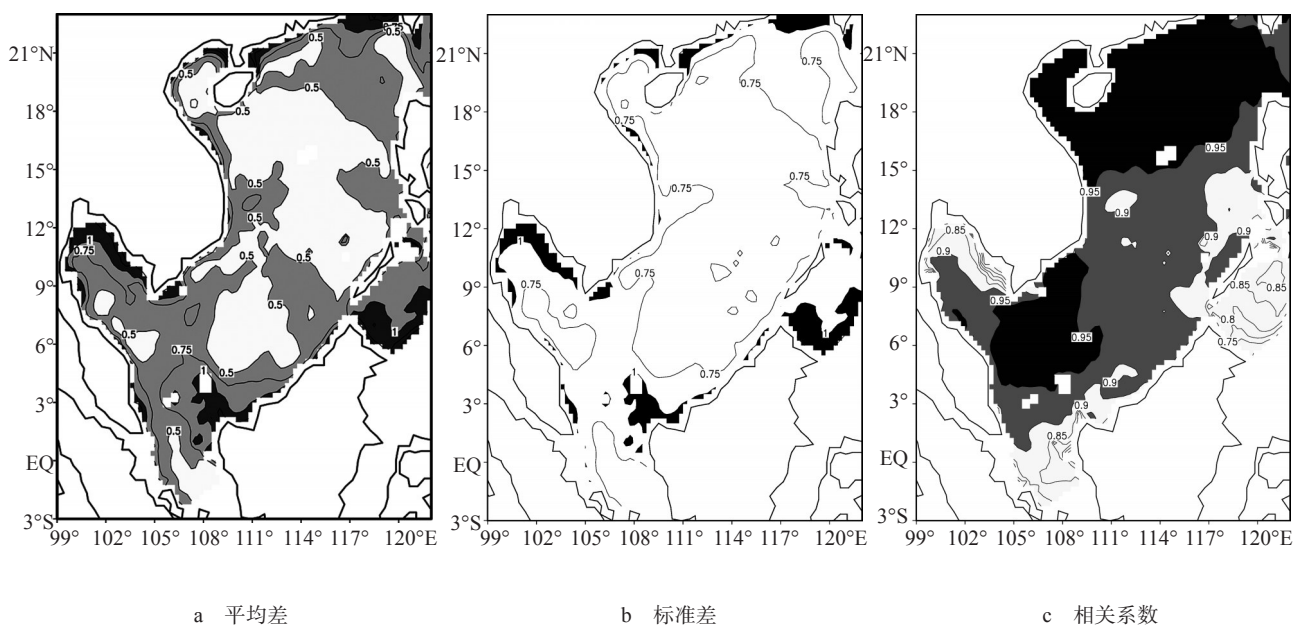
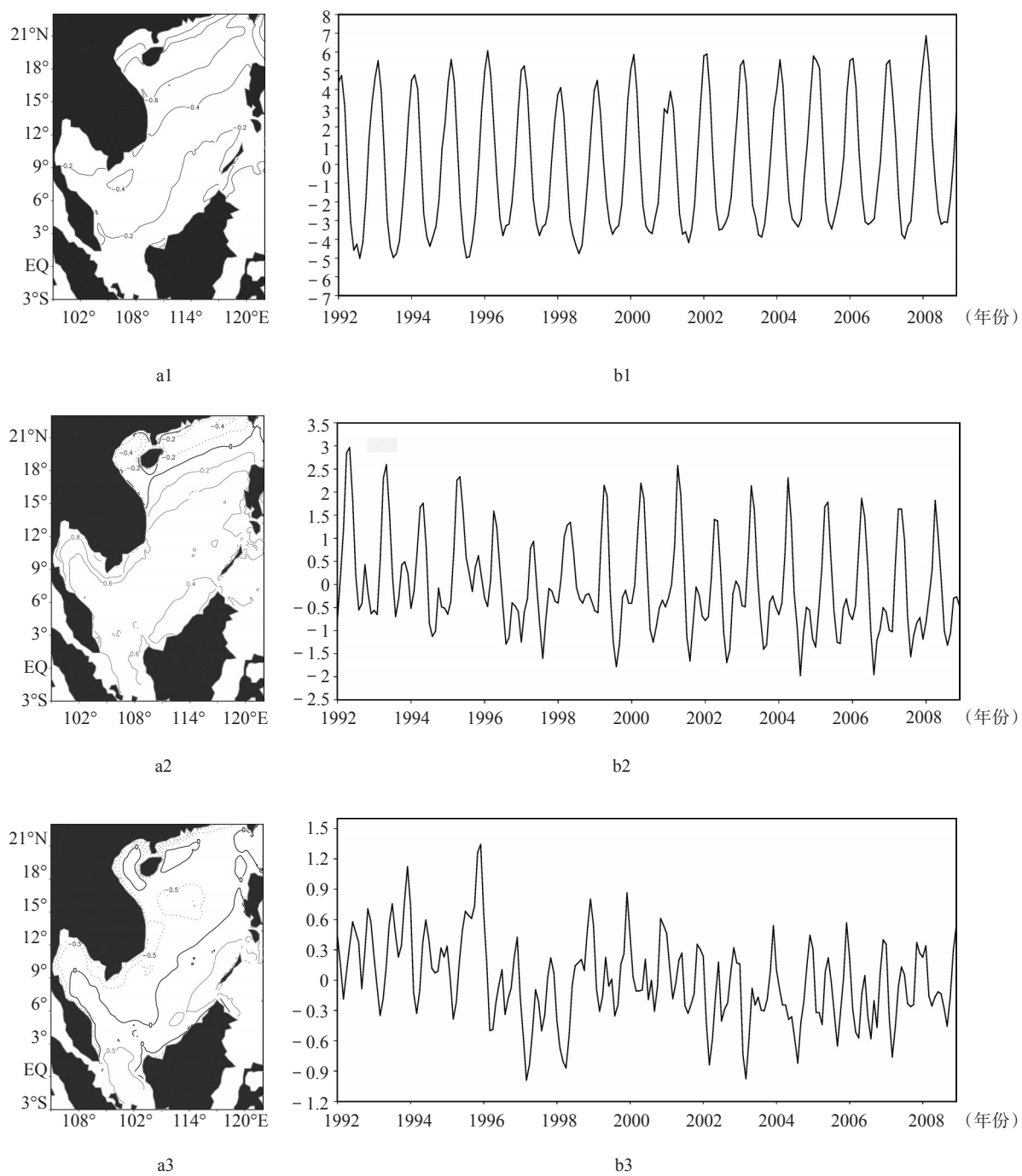


图3 MGDSST逐日SST与HYCOM模拟结果比较



(a1~a3分别是第一、第二、第三模态特征向量空间分布, b1~b3是对应a1~a3的时间系数)

图4 SST的特征向量时空分布

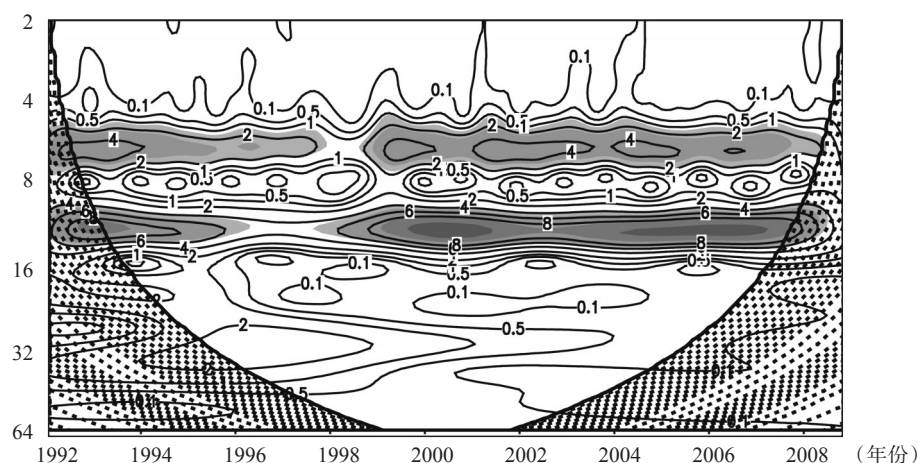
界,南海北部陆架区被负值区控制,南海中部与南部被正值区控制,这说明南海北部陆架区海表温度与南海中部与南部海表温度是反相关关系。此空间分布型主要反映的是南海中部夏季分布特征^[9]。夏季在西南季风的影响下,越南沿岸出现强烈的上升流区,对应着越南冷涡,冷涡输送冷的沿岸水离岸向东延伸至海盆中部,形成南海冷丝,影响夏季南海中部 SST 的分布与变化^[7]。

对于海表温度的第三特征向量的空间分布型,以南海中部西南-东北走向的等值线为界,等值线以北被负值区控制,等值线以南被正值区控制。此空间分布型主要反映冬夏季季节转换中南海中部西南-东北走向的温度锋面特征^[9]。冬季在东北季风的影响下,南海中部出现西南-东北走向的急流轴,急流轴以北为风应力的负旋度,引起

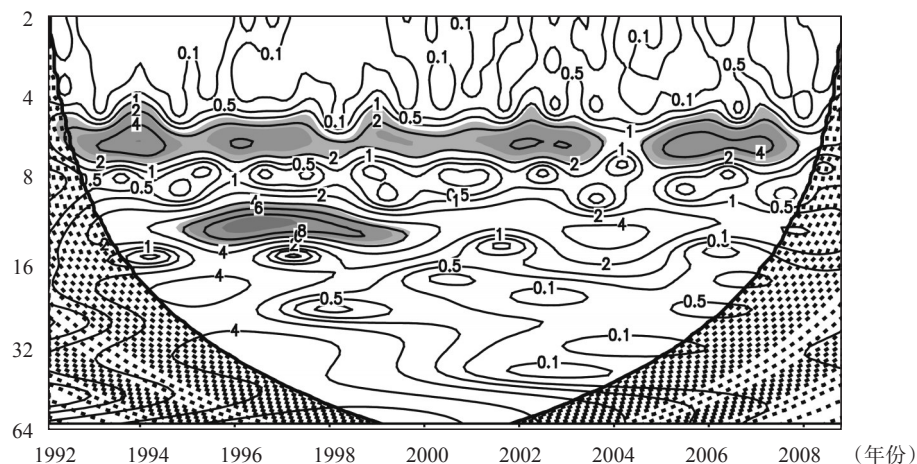
南向的 Sverdrup 输送;急流轴以南为风应力的正旋度,引起北向的 Sverdrup 输送,使得温度锋面增强。夏季在西南季风的影响下,南海中部同样出现西南-东北走向的急流轴,但急流轴以北为风应力的正旋度,引起北向的 Sverdrup 输送;急流轴以南为风应力的负旋度,引起南向的 Sverdrup 输送,使得温度锋面减弱。因此,南海中部西南-东北走向的温度锋面在冬季非常显著,而在夏季不明显^[15]。与前两个模态相比,该模态的时间变化大。

3.2.2 时间分布特征

在 EOF 分析的基础上,对各个时间系数进行 Morlet 分析小波。由于第一模态的时间系数呈现明显的年周期变化特征,因此重点针对第二模态与第三模态时间系数进行分析(见图 5),图中阴影区



a 图为第二模态



b 图为第三模态

(图中阴影区域通过置信度 95% 红白噪声检验)

图 5 第二模态与第三模态时间系数 Morlet 小波分析

域表示通过置信度95%的红白噪声检验。

通过对第二模态时间系数进行小波分析,具有明显的半年周期与年周期变化。对于半年周期变化,整个1998年没有通过置信度95%的红白噪声检验。对于年周期变化,从1996年底至1998年初没有通过置信度95%的红白噪声检验。第二模态主要显示的南海中部海表温度的分布特征,通过半年周期与年周期对比发现,强ENSO事件发展期对南海中部SST年周期变化有影响,强ENSO事件成熟期对半年周期变化有影响。

第三模态也具有明显的半年周期与年周期变化。对于半年周期变化,对应1998年的强ENSO事件,通过了置信度95%的红白噪声检验。对于年周期变化,只有2000年之前,通过了置信度95%的红白噪声检验,且1997年对应极大值,可见强ENSO事件的发展期对第三模态的年周期变化有显著影响。

分析第二模态的32月的周期,从1994年至1999,对应极大值区。分析第三模态的24个月的周期,在1998年对应极大值区。通过第二模态与第三模态的小波分析,可以捕捉到准两年周期变化的信号,但均没有通过置信度95%的红白噪声检验。另外,第二模态与第三模态准两年周期变化的信号也没有通过置信度90%的红白噪声检验。由于时间序列只有17年,考虑到边界的影响,对于更长时间的低频变化,没有进一步分析。

4 结论与讨论

本文应用混合坐标HYCOM海洋模式,利用嵌套方案,通过太平洋计算区域提供边界条件,得到南海区域海表温度17年的时间序列。

首先,采用广泛应用于海洋模式进行SST检验的统计工具对模式结果进行检验,整个南海大部分地区,尤其是南海中部海盆区域温度误差在1℃以内。

然后,利用EOF方法对SST的空间分布进行分析,并且与前人的工作进行对比,通过比较发现,模式结果与通过遥感资料得到的结果在方差贡献率与空间分布型上基本一致。海表温度的第一特征向量的空间分布型主要反映的是季节性变化特征,在时间变化上具有明显的年周期变化特

征。第二特征向量的空间分布型主要反映的是南海中部夏季分布特征。第三特征向量的空间分布型主要反映冬夏季季节转换中南海中部西南-东北走向的温度锋面特征。在EOF方法分析的基础上,对第二模态,第三模态的时间系数进行Morlet分析小波,提取周期信号,并且分析周期信号的变化规律。第二模态夏季南海中部海温变化与第三模态冬夏季季节转换的海温变化均有明显的准半年周期。年周期变化呈现显著的差异,第二模态南海中部海温变化对应1998年强ENSO事件没有年周期变化,第三模态冬夏季季节转换的海温变化对应1998年强ENSO事件出现年周期变化。

对于第二模态、第三模态均捕捉到准两年周期的信号,但并没有通过显著性检验,一方面,本实验采用高精度模式结果,空间分辨率达到 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,前人采用COADS等资料,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,另一方面,由于时间序列只有17年,且出现1998年历史记录以来最强的ENSO事件,因此准两年周期信号以及时间更长的低频振荡有待进一步研究。

致谢:

感谢国家海洋环境预报中心的刘桂梅老师在撰写本文时给予的指导和帮助。感谢中国气象科学研究院姜华老师对此文章的修改提供宝贵意见。感谢挪威南森环境与遥感中心提供HYCOM海洋模式。

参考文献:

- [1] 姜霞. 海洋动力过程对南海海面温度的影响[D]. 中国海洋大学, 2006.
- [2] Qiu B. Interannual variability of the Kuroshio extension system and its impact on the wintertime SST field[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30:1486-1502.
- [3] Qu T. Role of ocean dynamics in determining the mean seasonal cycle of the South China surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C4): 6943-6955.
- [4] 周发琇, 于慎余. 南海表层水温的低频振荡[J]. *海洋学报*, 1991, 13(3): 333-338.
- [5] 于慎余, 周发琇, 傅刚等. 南海表层水温低频振荡的基本特征[J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(5): 546-551.
- [6] 王东晓, 周发琇, 李永平. 南海表层水温和海面热收支的年循环特征[J]. *海洋学报*, 1997, 19(3): 33-44.
- [7] XIE S P, XIE Qiang, WANG Dong-xiao, et al. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations

- [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(c8): 3261, doi: 10.1029/2003JC001876.
- [8] LIU Qing-yu, JIANG Xia, XIE S P, et al. A gap in the Indo-Pacific warm pool over the South China Sea in boreal winter: Seasonal development and interannual variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: C07012, doi: 10.1029/2003JC002179.
- [9] 王桂华, 黄韦良, 王 辉. 利用 HOAPS 资料研究南海海气界面热通量时空分布[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 1-7.
- [10] 王东晓. 南海表层水温年循环的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1998, 20(4): 25-37.
- [11] Bleck R, Halliwell G, Wallcraft A, et al. Hybrid Coordinate Ocean Model, User's Manual [M]. Miami: University of Miami press, 2002.
- [12] M Bentsen, G Evensen, H Drange, et al. Coordinate Transformation on a Sphere Using Conformal Mapping[J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127: 2733-2740.
- [13] Legates D R, C J Willmott. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation[J]. *International Journal of Climatology*, 1990, 10: 111-127.
- [14] Kara A B, Barron C N, Martin P J, et al. Validation of interannual simulations from the 1/8 degree Global Navy Coastal Ocean Model (NCOM)[J]. *Ocean Modeling*, 2006, 11: 376-398.
- [15] Chu P C, Wang Gui-hua. Seasonal variability of thermohaline front in the central South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59(1): 65-78.

Numerical simulation of the temporal and spatial variability of sea surface temperature over South China Sea

YU Qing-long¹, WANG Hui², WAN Li-ying²

(1. Chinese Academy of Meteorology, Beijing 100081 China; 2. National Marine Environment Forecast Center, Beijing 100081 China)

Abstract: Based on the monthly data of sea surface temperature (SST) from 1992 to 2008 using Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), the temporal and spatial variability of SST has been analyzed by the EOF (Empirical Orthogonal Function) method. The variance contribution rate and spatial patterns of the modes are generally similar to the results obtained by others, and the model can perform as well as the remote sensing observation. Furthermore, the time variation of the time coefficient series of the second and the third mode has been analyzed using wavelet analysis. The second mode and the third mode all have half annual variability; however, the annual variability between the modes is significantly different.

Key words: South China Sea, sea surface temperature, HYCOM