

南海表层环流和热结构特征的 数值模拟与影响因素分析*

聂宇华^{1,2}, 詹杰民¹, 陈植武¹

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275;
2. 国家海洋局南海分局, 广东 广州 510300)

摘要: 采用普林斯顿海洋模式, 在真实的地形数据、计算区域右边界上半部分设为开边界的条件下, 对南中国海 98° - 126°E, 3°S - 26°N 的范围进行了环流和温度结构的模拟。模拟从静止的海洋开始, 以1月份的月平均温盐数据为初始场, 在12个不同的月平均风场驱动下, 模式稳定地模拟了4个模式年。从第3年开始进行数据分析。首先从数值模拟的角度给出了南海表层环流和热结构的时空演变过程, 继而详细分析了气候和环境因素的影响。结果表明: 冬季南海主要被一个大的气旋式环流占据, 夏季主要呈大的反气旋式环流。春季和秋季是季风转换季节, 南海环流在受到上一个季节影响的同时也向下一个季节的典型流态转换, 并由多个涡旋组成。此外, 气候和环境条件的设置, 都会影响到南海的环流和热结构特征。

关键词: 南海环流; 热结构; 黑潮; 普林斯顿海洋模式

中图分类号: P731.11, P731.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 02-0134-05

Simulation and Influence Factor Analysis of Circulation and Thermal Structure of the Surface Layer of the South China Sea

NIE Yuhua^{1,2}, ZHAN Jiemin¹, CHEN Zhiwu¹

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. South China Sea Branch, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China)

Abstract: By using the Princeton Ocean Model, circulation and thermal structure of the South China Sea (SCS) in the domain 98° - 126° E, 3° S - 26° N are simulated on real topography data. The upper half of the right vertical boundary is set as an open boundary. The simulation starts from a motionless ocean, and average temperature and salinity data of January are used as the initial field. Driven by 12 different monthly averaged wind fields, the model runs steadily for four model years. Simulation results are recorded from the beginning of the third year. The temporal and spatial evolution of the circulation and thermal structure is analyzed. The results show that the SCS is dominated by a big cyclone type circulation in winter and by an anti-cyclone type in summer. During spring and autumn the monsoon reverses direction. The circulation is influenced by the monsoon of the last season and transits to the typical circulation type of the next season. It consists of multiple vortices. Additionally, the climate and environmental conditions can influence the characteristics of the circulation and thermal structure.

Key words: circulation of the South China Sea; thermal structure; Kuroshio; Princeton Ocean Model

* 收稿日期: 2010-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40476012)

作者简介: 聂宇华 (1986年生), 女, 硕士, 助理工程师; 通讯作者: 詹杰民; E-mail: cejmzhan@gmail.com

南海位于热带西太平洋的边缘,是西太平洋最大的半封闭深水海盆,具有某些大洋的特征。同时它不仅是联接亚澳季风的桥梁,也是典型的季风区,并存在显著的局地性海-气相互作用^[1]。因此,对南海环流和热结构特征进行研究具有重要的理论和实践意义。

南海海况的研究主要包括实际观测和数值模拟两种方法。对于大洋环流的研究,实际观测成本较高,因此数值模拟是较为常用的研究手段。

数值模拟从20世纪80年代开始应用于南海海域。1987年,Pohlmann^[2]应用三维环流模式(OGCM),得到了与Wyrki^[3]相似的结果。1989年,曾庆存^[4]用二维全流方程模式,计算了南海12个月的平均表层流,他认为南海暖流的主要成因是风生海流受四周海岸约束以及西沙和南沙群岛等海底地形的阻挡而造成的补偿流作用。同年,文献[5]以二维全流模式对南沙群岛邻近海域春季典型月平均流进行数值模拟,其结果与实测结果基本相符。1996年,王东晓^[6]应用一个包含动力学和热力学的热带海洋两层半模式,模拟南海上层海洋封闭边界条件下的季节性环流,显示了模式对南海海盆尺度的环流系统具有较好的模拟能力。1999年,钱永甫等^[7]利用普林斯顿海洋模式(POM)对南中国海的年平均海流进行了数值模拟。结果表明,在南海海流的形成中风应力的作用更为重要。2001年,薛惠洁等^[8]利用POM计算南海及其邻近海域的环流。2004年,杨波等^[9]采用美国地球物理流体动力学实验室开发的一套大洋环流模式MOM(Modular Ocean Model),也较好地模拟了南海的环流。

然而,在众多的数值模拟研究中,还没有文献在考虑各种气候因素影响的条件下,对南海表层环流及热结构的年周期变化进行系统研究。这就是本文研究的出发点。

1 模式配置及验证

1.1 模式配置

本文在最新版本POM模式的基础上,对其进行适当的修改,使其能够用来模拟实际的南海环流和热结构问题。所选取的计算范围为 $98^{\circ} - 126^{\circ} \text{ E}$, $3^{\circ} \text{ S} - 26^{\circ} \text{ N}$ 。采用ETOPO5 $5' \times 5'$ 的实际地形数据,最大水深超过5 500 m。水平网格精度为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,垂直方向共分为16个 σ 层。右边

界上 $12^{\circ} - 26^{\circ} \text{ N}$ 的地方设置为开边界。在此开边界上给定流速的大小,采用詹杰民等^[10]2004年模拟北太平洋时西岸流场的的数据,其他边界均设置为封闭边界。

计算从静止的海洋开始,采用Levitus数据库中1月份月平均温度和盐度作为初始场,并采用DASILVA数据库中12个月份的月平均风场作为表面强迫条件。计算时将这12个风场作为每月15号的风场,其它时刻的风场在每个时间步上插值得到。12个月的海面净热通量取自COADS。模拟时,外模时间步长取6 s,内模时间步长取180 s。取每个模式月为30 d,每个模式年为360 d。经过两个模式年的模拟后,计算已基本稳定。从第3年的1月份开始记录和分析模拟结果。

1.2 模式验证

在进行具体的环流和热结构特征模拟之前需要进行模式验证。本文选取Wyrki^[3]绘制的包括整个南海在内的东南亚海域双月表层海流图中的冬季南海表层海流图和李荣凤等^[11]模拟得到的中国及邻近海域1月份月平均流场图作为对比。本文模拟所得到的1月份表层流场如图1a所示。经过对比可知,本文结果与文献中的实测及模拟结果基本吻合^[3-11]。冬季南海存在着一个大的气旋式环流。具体来说,在西海岸是向南沿岸流,西边界流强化现象比较明显;在南部浅水区的东部海域存在向北的回头流,加里曼丹北侧存在着向南的补偿流,暹罗湾内则是顺时针涡旋,南海南部也能够清楚地看到一个非常明显的逆时针涡旋,并且较好地模拟出了黑潮入侵现象。这些结果都与文献[11]模拟出的流场结构相吻合。但流场形态在细节上不可能完全一致。因为计算条件和模式配置本身就存在不同。例如,本文仅右边界的上半部分设为开边界,其余边界封闭。而李荣凤等^[11]为了避开困难的开边界处理问题,把计算区域取为 $98.75^{\circ} \text{ E} - 69.75^{\circ} \text{ W}$ 和 $60.25^{\circ} \text{ N} - 60.25^{\circ} \text{ S}$,并充分考虑了太平洋流系特别是黑潮与我国海域海流的相互作用和水交换。因此,两种结果在一些细节上存在差异是在所难免的。

2 南海表层环流和热结构的时空演变

下面以一个年周期四季代表月的表层流场和温度场来详细讨论南海表层环流和热结构的时空演变特征。

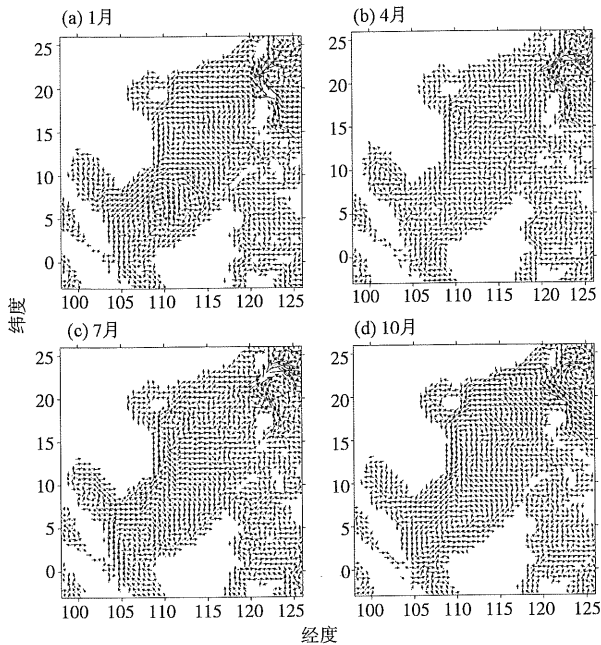


图 1 四季代表月的流场图

Fig. 1 Representative flow fields of four seasons

由冬季南海表层流场图(图 1a)可以看到, POM 模式很好地再现了南海冬季海流, 即总体上呈气旋式大环流。强大的东北季风给中南半岛东南侧海域带来了 1 个非常明显的逆时针涡旋。由相应的温度图(图 2a)可知, 其处于低温区, 属冷涡。该冷涡的周围还存在着 3 个较明显的小涡旋。南海西侧沿岸至中南半岛有一支强海流, 自北向南流向爪哇海, 导致上述冷涡形成, 即“南海环流的西向强化”现象^[3]。另外, 黑潮洋流北上流经吕宋海峡时, 能通过吕宋海峡影响南海北部环流, 使其加强。本文并未模拟出明显的冬季南海暖流。这可能是由于冬季风应力较大, 表层漂流强度也较大, 南海暖流被暂时掩盖。管秉贤^[12]认为该暖流在表层以下仍是明显的, 在东北季风减弱的间歇还会显示在表层。

从太阳辐射的角度来说, 南海北部温度应比南部低。但从冬季温度场(图 2a)可见, 冬季南海的海表温度较均匀。北部海表温度并不会明显比南部低。这主要是由于黑潮暖流入侵, 将高温的海水带到南海的北部, 使得南海南北的海表温度不存在明显的差别。

春季是南海的季风转换期。冬季盛行的东北季风开始减弱, 夏季风逐渐建立。海面多为风力较弱的偏东风。随着东北季风的衰退, 冬季流型开始逐渐分裂和转化。由图 1b 可以看到, 春季南海南部开始出现较明显的冬季反向流, 中南半岛附近海域

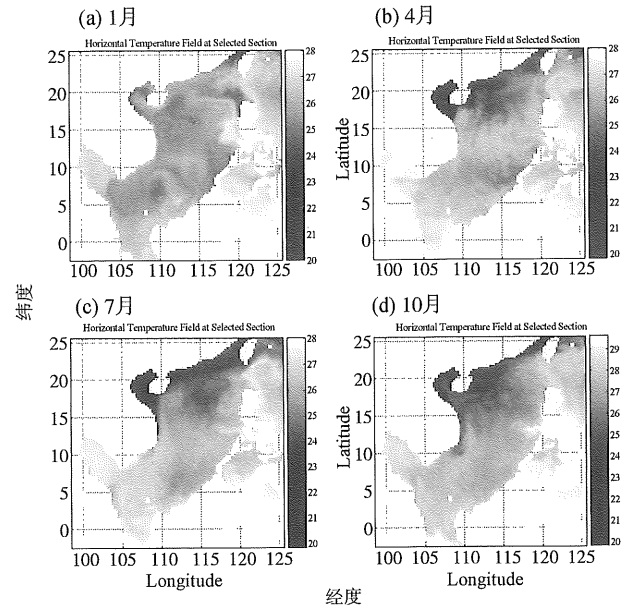


图 2 四季代表月的温度场图

Fig. 2 Representative temperature fields of four seasons

的小涡旋开始增多, 冬季流型开始瓦解。东北季风的减弱, 使得广东外海表层出现了较弱的南海暖流。另外, 结合温度图和流场图可知, 沿吕宋岛西北岸有一支较明显的暖水北上。李培良等^[13]也曾经模拟出这种现象, 并将其称之为吕宋沿岸流。西边界流此时已基本与冬季流向相反。吕宋沿岸流开始略显杂乱。春末, 随着季风更替的完成, 总的环流形势已经比较接近夏季流态。

从春季的温度场图(图 2b)可以看到, 南海海域的表层海温开始上升。尤其是南海南部海域, 整体水温明显比冬季升高。但在加里曼丹岛北部海域, 还存在着一个低温水域。这是因为春季黑潮入侵减弱, 失去了黑潮暖流的支撑, 南海北部海域的温度明显比冬季偏低。这也部分验证了 Shaw^[14]“黑潮南海分支始于夏末, 冬季加强, 终于春末”的论点。

南海的夏季为西南季风盛行期。从图 1c 可以看到, 南海夏季海流已经形成, 总体上呈现出大而较明显的反气旋式环流。南海西侧沿岸的西边界流强化现象已经非常明显。西边界流的北上, 在海南岛沿岸形成了较明显的顺时针涡流。对比温度图可知, 其涡中心处温度较高, 属于暖涡。另外, 整个夏季南海北部没有明显的黑潮入侵现象。

从温度图(图 2c)可知, 由于没有黑潮暖流的支撑, 北部海域的低温区有所扩大。中部和西南部海域, 温度整体较高。这个季节南海最重要且明显的温度结构就是存在于海南岛东南侧的暖涡。

秋季跟春季一样，也是季风的转换期。但由于秋季风力强于春季，所以其流场结构比春季有序。随着西南季风自北向南迅速撤退，南海北部的气旋式环流开始发展，反气旋环流减弱并开始瓦解。由秋季流场图（图 1d）可见，此时冬季流态开始出现，气旋式大环流逐渐明显起来。在越南东海岸，东北向漂流被西南向漂流所替代。这个月份冬季流向（即西南流向）的西边界流已经非常明显。秋末，随着冬季风的形成，南海环流逐渐由秋季流态转变成冬季流态。

从温度场图（图 2d）可以看到，总体上，秋季海表温度相对较低。但是，由于黑潮在夏末秋初开始经由吕宋海峡入侵南海，南海北部的冷水区内，受黑潮暖流的影响重新出现了暖水区。南部海域（西部沿岸）开始出现较明显的低温冷水区，并开始形成冷涡。这是由南下的西边界流引起的。

3 气候和环境因素对南海动力结构的影响分析

太阳辐射和季风是影响南海环流和热结构最重要的两个气候因素。其中太阳辐射造成温度和盐度南北分布不均匀，因而导致了压力梯度与科氏力共同作用形成的密度流。温盐的分布不均也是一个非常重要的海洋环境因素。季风则是南海表层环流的最直接强迫，也在很大程度上改变了海水的上层水温分布。我们设计如下 3 个算例：

算例 1 既有太阳辐射造成的温度和盐度水平不均匀分布，又有风应力作用，称为“TSW”试验；

算例 2 只有温度和盐度的水平不均匀分布而无风应力作用，称为“TS”试验；

算例 3 只有风应力作用，温度和盐度都设置为均匀场（温度和盐度分别设置为 25 °C 和 34 以消除温盐不均匀所产生的密度流），称为“W”试验。本文以冬季 1 月份的海表流场和温度场为例比较 3 个算例的模拟结果。

图 3a 和 b 分别为 TS 算例和 W 算例的模拟结果。TSW 算例的模拟结果见图 1a 及图 2a。对比 3 个流场图可以发现，W 算例流场的总体流型与 TSW 算例的基本一致。TS 算例除了暹罗湾中的顺时针环流和吕宋海峡以东的黑潮比较明显外，其余海域的流场基本处于无序的状态。并且由于仅有温盐水平梯度的作用，流速较其它两个算例的小。当 TS 算例加入风场的作用后（即 TSW 算例），原来基本无序的表层流场变得明显有序，见图 3（b）。在单一影响因素的作用下，W 算例的表层流场比

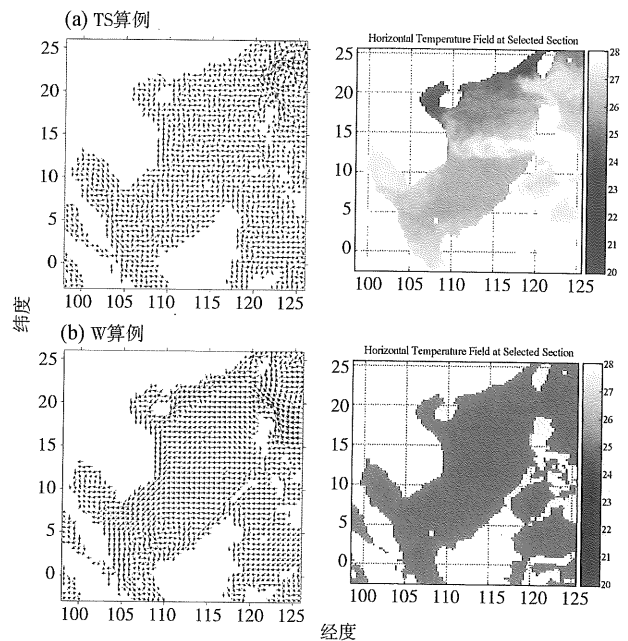


图 3 不同气候条件下冬季（1 月份）表层流场图和温度场图

Fig. 3 The surface flow and temperature fields of the SCS in January under different climatic conditions: (a) TS Case; (b) W Case

TSW 算例的更加有序；越南东南侧的涡旋数量也比 TSW 算例的少。总的来说，太阳辐射造成的温盐水平不均匀的影响比风场的影响要小很多，但不能完全忽略。风场的作用决定了南海表层流场的基本流型，但温盐的水平分布对于流场的细微结构也是有一定影响的。另外，在仅有风场作用的 W 试验中，仍然可以看见清晰的南部逆时针涡旋。这说明风场的作用能够激发出与风应力旋转方向相同的直接涡旋。钱永甫等^[15]也曾得出类似的结论。

从 3 个温度图可以看到，W 试验由于摒除了温盐水平不均匀分布的影响，温度是初始设置的 25 °C 均匀场。TS 算例虽然没有风场的作用，但由于采用了真实的初始温盐数据，在密度流、地转流、黑潮入侵的影响下，温度场有明显的空间结构变化。另外，黑潮入侵由于没有风场的推动，南海北部的高温海域面积缩小，并存在一个明显的低温冷水区。并且由于没有了南下的西边界流，越南东南侧的冷涡中心也不复存在。由此可见，对于温度场来说，太阳辐射有重要的影响，但是风场也可以起到辅助的作用。

4 结论

季风是造成南海上层环流季节变化的主要因素。冬夏两季为季风盛行期，两种不同的季风导致

了运动方向截然相反的环流系统。南海冬季主要被一个大的气旋式环流占据;夏季主要呈大的反气旋式环流。春秋两季是季风转换季节,南海环流在受到上一个季节影响的同时也向下一个季节的典型流态转换,并由多个涡旋组成。季风的更叠使环流不断演变,而黑潮经吕宋海峡的作用则使之更趋复杂。冬夏两季,南海环流都有十分明显的西向强化趋势。与之相比,南海东侧的环流结构强度较弱并稍显凌乱。季节变化和西向强化是南海环流的两个主要特征。黑潮入侵南海始于夏末秋初,冬季势力最强,终于春末。由于冬季表层海流流速较大,南海暖流在4月份开始能够在表层观察到。冷暖涡旋结构在四个季节都存在。温度和盐度的水平变化对于流场的影响很小,而风场则是南海上层流场的主要驱动力。

参考文献:

- [1] 高荣珍,王东晓,王卫强,等. 南海上层海洋热结构的年循环与半年循环[J]. 大气科学,2003,27(3):345-352.
- [2] POHLMANN T A. Three-dimensional circulation model of the South China Sea[M]//NIHOUL J J,JAMART B M, eds. Three-dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics[M]. New York:Elsevier,1987:245-268.
- [3] WYRTKI K. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961, Naga Report 2[M]. California:Scripps Institution of Oceanography,1961.
- [4] 曾庆存,李荣凤,季仲贞,等. 南海月平均流的计算[J]. 大气科学,1989,13(2):127-138.
- [5] 柯佩辉,李荣凤. 南海海流数值模拟Ⅱ. 南沙邻近海域春季典型月平均流[J]. 热带海洋,1989,8(4):1-6.
- [6] 王东晓,周发琇,秦曾灏. 南海上层海洋环流两层半模式的数值模拟1. 闭边界海盆季节性环流[J]. 海洋学报,1996,18(5):30-40.
- [7] 钱永甫,朱伯承,王谦谦. 温度、盐度和风应力对南海海流模拟的影响[J]. 南京气象学院学报,1999,22(1):27-31.
- [8] 薛惠洁,柴扉,徐丹亚,等. 南海海流数值计算[J]. 中国海洋学文集,2001,13:1-14.
- [9] 杨波,赵进平,曹勇,等. 区域性海洋环流数值模式研究及对南海环流与海峡流量的模拟[J]. 海洋科学进展,2004,22(4):405-416.
- [10] 詹杰民,严晓海. 基于大涡模拟和局部滤波同化方法的海洋环流模式[J]. 海洋学报,2004,26(3):7-15.
- [11] 李荣凤,曾庆存. 冬季中国海及其邻近海域海流系统的数值模拟[J]. 中国科学:B辑,1993,23(12):1329-1338.
- [12] 管秉贤. 南海暖流——广东外海一支冬季逆风流动的海流[J]. 海洋与湖沼,1978,9(2):117-127.
- [13] 李培良,左军成,李磊,等. 南海 TOPEX/POSEIDON 高度计资料的正交响应法潮汐分析[J]. 海洋与湖沼,2002,33(3):287-295.
- [14] SHAW P T. The Seasonal Variation of the Intrusion of the Philippine Sea Water Into the South China Sea [J]. J Geophys Res,1991,96(C1):821-827.
- [15] 钱永甫,王谦谦,朱伯承. 南海风生冷暖涡的数值模拟[J]. 大气科学,2000,24(5):625-633.