第 22 卷第 1 期 1999 年 3 月

## 南京气象学院学报

Journal of Nanjing Institute of Meteorology

Vol. 22 No. 1 Mar. 1999

文章编号: 1000-2022(1999) 01-0026-06

# 温度、盐度和风应力对南海海流模拟的影响

钱永甫1,朱伯承2,王谦谦3

(1. 南京大学大气科学系, 南京 210093; 2. 美国海军研究生院; 3. 南京气象学院大气科学系, 南京 210044)

摘要: 用美国普林斯顿大学海洋模式 (POM) 对南中国海的年平均海流进行了数值模拟,对温盐结构和风应力在海流形成中的作用进行了较详细的讨论。结果表明,仅有温盐水平不均匀分布也可以驱动海水而生成南海海流,但此种海流的结构较乱,最大流速只有  $30 \sim 40$  cm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>。若温盐无水平结构,则在风应力驱动下,南海海流的结构较为有序,且最大流速可增至  $60 \sim 70$  cm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>。在温盐水平分布不均匀并有风应力的作用时,生成的南海海流与仅有风应力作用时的海流场较相似,说明在南海海流的形成中.风应力的作用更为重要。海面自由高度的分析也证明了上述结论。

关键词: 南海: 海流数值模拟: 温度: 盐度: 风应力

中图分类号: P731.21 文献标识码: A

由于南海的特殊地位, 南海季风在东亚季风的爆发、活跃、中断乃至年际变化中, 扮演了极为重要的角色。研究表明, 东亚季风最早在南海爆发, 南海及其周围地区对流活动约在 5 月中旬即建立。此后, 季风的爆发向其他地区不断推进<sup>11</sup>。为何东亚季风会在南海首先爆发呢? 有关这个问题已有种种假设。其中之一认为, 南海地区特殊的海气相互作用是一种触发机制。从南海的几何形状看, 它是热带地区最大的一个半封闭海区, 虽然它有台湾海峡、吕宋海峡、卡里马塔海峡和马六甲海峡与热带太平洋和印度洋相连通, 但通过这些海峡的海水质量输送并不大<sup>[2]</sup>。 从海底地形看, 南海的中部和北部是深水区, 海深最大可达 4~5 km, 形成了一个'碗'"状区, 其西部和南部则是浅水区, 即所谓"大陆架"地区, 其东部虽有一些岛屿, 但几乎没有陆架。这种复杂的海岸线和特殊地形分布, 使南海的海流、温度和盐度都具有明显的年变化。但是, 由于种种原因, 长期以来南海地区海洋观测资料稀少, 尤其是海流资料更为缺乏。

要研究南海地区海气相互作用的特点,除了气象观测资料外,还必须对南海海洋要素场的分布有较多了解。海流在海洋要素场结构的形成中,起着主动的作用。因此,对南海海流场进行数值模拟有重要意义。国内外对南海海流的模拟研究早已开始,如国内大气物理所曾庆存和李荣凤已用正压模式研究过南海海流,得到了有意义的结果;在国外,朱伯承和符二选等也作过一些尝试 $^{(3)}$ 。尽管如此,南海海流的数值模拟研究相对尚少,且正压模式和 z 坐标系海洋模式对南海大陆架海域的模拟往往有一定的局限性。美国普林斯顿大学海洋模式(POM) 是  $\sigma$  坐标系海洋模式,在海底地形的处理方面有较多特色,而且多年的应用表明,POM 对于湾流等近

收稿日期: 1998-05-12; 改回日期: 1998-12-28

基金项目: 国家基础性研究重大关键项目 '南海季风试验 '; 教育部博士点基金 '南海季风区海气相互作用机制研究 "

第一作者简介: 钱永甫, 男, 1938 年 10 月生, 教授

海海流的模拟相当成功,它已成为国际上广为应用的海洋模式之一。

本文将 POM 模式改造成为一个南海模式(SCS - POM)后,用来模拟南海年平均海流的形成机制。目的是比较温盐场水平结构和风应力作用在南海海流形成中的相对重要性。其他海洋要素场的数值模拟研究结果,将陆续另文发表。

## 1 模式

POM 模式在垂直方向采用  $\sigma$  坐标系,  $\sigma$  定义为

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} = \frac{z - \eta}{D} \tag{1}$$

式中,z 为距平均海平面的垂直距离,向上为正; $\eta$  为海面的自由高度;H 为海深,即平均海平面到海底的距离; $D = H + \eta$  是海水的总厚度。可见, $\sigma$ 的值在0 和-1 之间。

将z 坐标系中的海洋动力学方程组进行坐标变换后,可以得到 $\sigma$  坐标系中的POM 控制方程组。由于方程组中各个方程的形式及所用变量的物理意义,在Blumberg 和Mellor 的论文<sup>[4]</sup>中已有详细描述,故在本文中略去。

为了节省计算时间和增加模式的计算稳定性, POM 将海流的正压模和斜压模分离, 采用不同的时间步长。在垂直湍流交换系数的计算中, POM 采用了二阶湍能(TKE) 闭合方案[ $^{5}$ ]。 在水平方向, POM 采用 Arakawa C 型交错网格系统。在垂直方向, 湍流能量方程、垂直扩散交换系数和垂直速度  $\omega$ 与温度、盐度和海流场交错设置。水平坐标系统可任选,既可为曲线正交坐标, 也可为经纬度坐标。我们在 SCS-POM 中采用经纬度坐标,网格距设为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,在控制方程组中只要将相应的导数改为经纬度坐标中的形式即可。根据水平格距的大小,本文取正压模的时间步长为 60  $_{S}$ ,斜压模时间步长为 2  $_{400}$   $_{S}$ ,可稳定地进行时间积分。在水平压力梯度的计算中采用了作者等改进后的方案[ $^{6}$ ]。

## 2 试验方案及结果讨论

众所周知,海流主要可分为风生流、密度流和梯度流。风生流由大气和海水间的动量交换引起,密度流由海水盐度和温度的水平不均匀分布产生,而梯度流则由海面自由高度的水平不均匀性所趋动。这三种流之间既有联系又有差异。尤其是梯度流,受风生流和密度流的影响很大。密度流也受风生流的影响,因为即使初始时刻温盐水平分布是均匀的,密度流为零,但若有风生流,则可改变温盐场的水平和垂直结构,使其不再是水平均匀的,从而产生密度流。尽管如此,密度流受风生流的影响较梯度流小。因此,我们将它们分开来研究。

本文设计了三种试验方案,即(1)只有温度和盐度的水平不均匀分布而无风应力作用,以 "TS"表示。(2)既有温度和盐度的水平不均匀分布,又有风应力作用,称为"TSW"试验。(3)只有风应力作用,温度和盐度只有垂直结构而无水平不均匀,表示为"W"试验。以上三种方案中,初始时刻的温度、盐度和风应力均用年平均值,分别由 Levitus 1982年(温、盐)和 Hellerman (风应力)的气候平均资料给出,海流的初始分量均设为零。三种方案均积分一年(360 d),此时,模式的海流场已基本处于平衡态了。为了排除开放海洋边界对模拟结果的影响,本文中将海域完全封闭。图 1a 是 SCS-POM 所用的海底地形等深线(单位 m)。图 1b 是 TSW 和 W 试验中所用的年均风应力场分布。可见,尽管在南海地区冬夏季风向有相反的趋势,但由于风速不同,年均风应力并非为零,而是与冬季的风应力场比较类似,尤其是在南海的北部,最大值约为 0.14 Pa,在南海南部浅水区中,风应力数值很小。

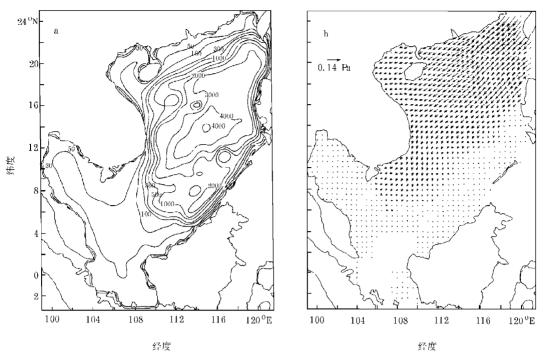


图 1 SCS-POM 海底地形(a) 和年平均风应力(b)

Fig. 1 SCS - POM bottom topography (a, in m) and the annual mean wind stressws (b, in Pa)

图 2a, b 分别是第 360 天 TS 和TSW 试验中的整层平均海流(即全流)流矢图。由图 2a 可 见, 尽管在 TS 试验中只有温盐水平不均匀性而无风应力的作用, 但在南海西部沿岸区和南部 浅水区中,仍有较大的海流。其中,在暹罗湾内有顺时针环流,在海南岛南面海区有自北向南的 沿岸流和辐合流,在中南半岛东南沿岸,海流也较大,且南向和北向海流在此交汇。最大平均海 流约为 12 cm·s<sup>-1</sup>。显然、这种海流分布是温盐场水平不均匀性、海岸线和海底地形共同作用 的结果。将图 2b 与 2a 比较,可以看出,在温盐场水平不均匀性和风应力的共同作用下,流场表 现出与 TS 试验中的既相似又有差别的特点。加入风应力后,海流场有序性明显增加,在南海 北部沿西边界的海流明显增强,如海南岛南面的向南沿岸流可一直到达 13°N 附近,且强度增 强, 暹罗湾中的顺时针环流依然存在, 但更为清晰和完整。在  $4\,^{\circ}N$  附近海域内, 出现了尺度较 小的涡旋流,且有向东流向加里曼丹岛的海流,此处的海流与图 2a 中基本反向。平均流的最大 流速也增加至  $19 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。W 试验中(图略)的流场间于图 2a 和 2b 之间,但整体上与图 2b 中 的更为相象。例如,在南海北部和南部两者基本相同,且最大流速也是  $19 \, \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$ 。但在海南 岛以西的北部湾中,海流方向相反,在暹罗湾中,海流不如图 2a 和 2b 中的强。看来,在南海北 部,由于风应力大(见图 1b),风应力的作用超过了温盐场水平不均匀性的作用,至使北部湾的 海流改变了方向。在南海南部、虽然风应力不大、但由于海水的连续性、诱发出的海流也由北部 的风应力主要决定。只有在暹罗湾中,风应力比较小,而且由于湾口不宽,北部海流不易影响湾 中海水流动, 温盐场的水平不均匀性相对地显得重要了。

整层平均流场代表海洋中的海水质量输送,只表示各层海流的综合输送效应。下面我们比较各层海流的情况。由于 SCS-POM 采用  $\sigma$  坐标系,我们将  $\sigma$  面上算得的海流线性插值到同一深度上,但表层流直接用模式第一层上的海流代替。

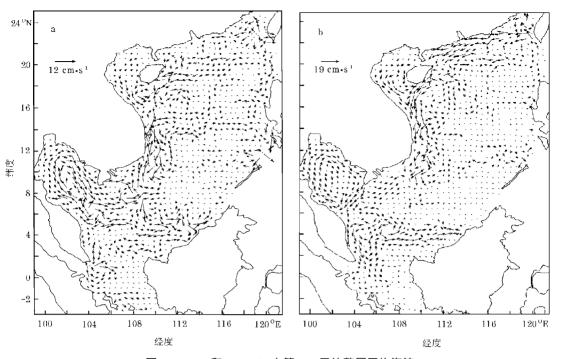


图 2 TS(a) 和 TSW(b) 中第 360 天的整层平均海流

Fig. 2 Whole- layer mean currents (cm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>) on day 360 in experiments TS(a) and TSW(b)

图 3a, b 分别是第 360 天 TS 和 TSW 试验的表层流分布。由图 3a 可见,虽然图 2a 中的平均流有一定的有序性,海洋中的环流和涡旋清晰可见,但除了暹罗湾中的表层流的顺时针环流比较明显外,其余海域的表层流基本无序。这种情况,可一直延续至 30~m 层(图略)。最大表层流速为  $38~em\cdot s^{-1}$ 。加入风应力场后(图 3b),情况发生了很大变化,原来无序的海流表现出明显的有序性,在南海北部深水区以及中南半岛以东海面,流速均较大,暹罗湾中的顺时针环流也更为清晰,海域内可分辨出一些涡旋,最大流速为  $60~em\cdot s^{-1}$ 。在只有风应力作用的W 试验中(图略),表层流的最大流速增至  $76~em\cdot s^{-1}$ ,南海北部的形势与图 3b 中的基本相似。但在中南半岛东侧出现了离岸流,南部海域的海流不如图 3b 中的明显,整个海域中的涡旋环流也比图 3b 中的要少。由此可见,对于表层流来说,虽然温盐水平不均匀分布产生的海流相对要小,但温盐流不能完全被忽略掉。

进一步分析T SW 和W 试验中30 m海深处的海流分布后发现,除了南海中部 $10^{\circ}$ N ~  $15^{\circ}$ N 区域内的海流差异较大外,其余海区的海流基本相似,而且最大流速都是  $58^{\circ}$  cm·s<sup>-1</sup>。这进一步说明了风应力在海流形成中的相对重要性。

为了检验模拟海流与实况的符合程度,我们比较了 TSW 试验中的表层流和 Wyrtki 所给出的冬季南海观测海流<sup>2]</sup>。由于海流观测资料少, Wyrtki 的海流图只能代表大的流型。比较表明, TSW 的表层流除了在大的流型方面与 Wyrtki 海流图十分相似外,还增添了许多细节。这表明,利用海洋环流模式来模拟海流是十分必要的,可以弥补观测资料的缺陷。

我们还分析了三种试验第 360 天的海面自由高度模拟结果,发现,三种试验都在南海深水区("碗"状区)产生负的海面高度,这是因为该区的大尺度海流流型是气旋性的,在柯氏力作用下,产生辐散,海面高度必然下降。但三个试验中,海面高度下降的数值很不一样。在 TS 试验中,最大下降仅约 3 cm 左右,而在 TSW 和 W 试验中,都达到 12 cm 以上,而且 TSW 与 W

#### 试验海面下降高度的分布很相似。

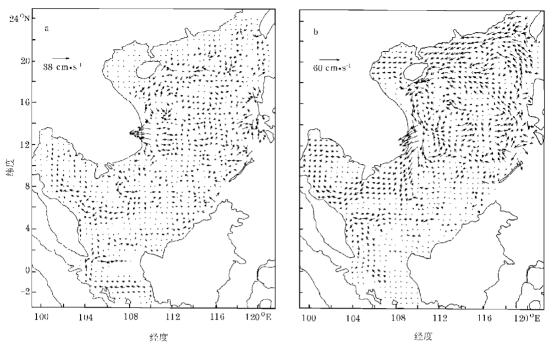


图 3 TS(a)和TSW(b)中第360天的表层流分布

Fig. 3 Surface currents(cm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>) on day 360 in experiments TS(a) and TSW(b)

## 3 结论和讨论

通过对三种试验结果的分析和比较,可以看出,在南海环流的形成中,海温和盐度水平分布的不均匀起到一定的作用。在没有风应力作用时,温盐水平不均匀性产生的海流较小,各层海流的有序性较差。尽管如此,整层平均流的流向却仍较有序,质量输送主要沿西海岸进行。之所以有此情况,其原因主要是我们所使用的温盐场本身是海流作用的结果。因此,用这样的温盐场,必然可以部分地反演出海流的观测特征来。风应力却是驱动海流的主动因子,在风应力作用下,海水首先沿风应力方向运动,随着海水的运动,柯氏力开始产生作用,使海流偏离风应力方向达一定的角度, $\beta$ 效应以及非线性相互作用在海流的形成中也占有一席之地。因此,从海流的生成原因看。最重要的因子应当是风应力,我们的试验结果也证明了这一点。

海洋的陆地边界在海流的生成中也是极为重要的因子,这一点可从暹罗湾的模拟海流场中看到。由于该海湾的东部开口小而浅,使湾内外海水的交换受阻,因而湾内的顺时针环流在三个试验中都存在,这是温盐场和风应力场共同作用的结果。相反,在南海南部浅水区,由于海面开阔,北部风应力产生的海流可直接影响此处的海流状态,致使该区内的海流在有风应力时有很大变化,甚至流向相反,尽管该浅水区上方并没有明显的直接风应力作用。因而,南海南部浅水区的海流是一种被动的补偿流。

海底地形的作用在许多研究中都被广泛地强调,因为海底地形愈复杂,就愈可能产生多种尺度的涡旋流。非均匀的海底地形可以产生非均匀的海底摩擦,从而在地形侧壁产生正或负的切变涡度,影响流体的流型。有关地形的作用,将在另文中讨论。

#### 参考文献

- [1] MA He- nian, DING Yi- hui. The present status and feature of research of the east asian monsoon[J]. Adv Atmos Sci, 1997, 14(2): 125- 140
- [2] WYRTKI K. Scientific result of marine investigation of the South China Sea and gulf of Thailand 1951-1961. NAGA Report 2, 1961
- [3] CHU P, CHANG C P. South China Sea warm pool in boreal spring[J]. Adv Atmos Sci, 1997, 14(2): 195-206
- [4] BLUMBERG AF, MELLORG L. A description of a three-demensional coastal ocean circulation model. In: HEAPS Ned. Three demensional coastal ocean models. Vol. 4[C]. Washington DC: American Geophysical Union, 1987
- [5] MELLOR G L, YAM ADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Rev Geophys Space Physi, 1982, 20: 851-875
- [6] 钱永甫,朱伯承,王谦谦. σ坐标系海洋模式中压力梯度的一种计算方案[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1998, 34(6): 691-700

# INFLUENCES OF SEA TEMPERATURE, SOLINITY AND WIND STRESS ON SIMULATIONS OF OCEANIC CURRENTS IN THE SOUTH CHINA SEA

## QIAN Yong-fu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

### ZHU Bo-cheng

(The Naval Postgraduate School in Monterey, USA)

## WANG Qian-qian

(Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: Numerical simulations of the annual mean oceanic currents in the South China Sea (SCS) are carried out by use of the USA. Princeton University Ocean Model(POM). The effects of the structures of sea temperature (ST) and salinity (S) and the wind stress on the formation of the oceanic currents are discussed in this paper in some detail. Results show that the SCS oceanic currents can be driven by the horizontally non– uniform distribution of ST and S alone, however, the structure of such currents is in somewhat disorder, and the maximum speed is only  $30 \sim 40~{\rm cm}\cdot{\rm s}^{-1}$ . If the ST and S have no horizontal structure, the only wind stress drives the ocean to form orderly currents, and the maximum speed increases to  $60 \sim 70~{\rm cm}\cdot{\rm s}^{-1}$ . With both the non– uniform structures of ST and S and the wind stress, the currents formed are more similar to those driven only by the wind stress. It means that the wind stress is more important in the formation of ocean currents. The analysis of the free sea surface height also proves the above conclusions.

**Keywords**: South China Sea; numerical simulation of ocean currents; sea temperature; salinity; sea surface wind stress