

南海夏季海流的数值模拟*

李荣凤

王文质

黄企洲

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

(中国科学院南海海洋所, 广州 510301)

提 要

用一个水平分辨率较高的区域海洋模式计算了中国海的海流。本文给出了南海7月份的上层环流的数值模拟结果。结果表明: 在南海北部的陆架区, 一支较强的东北向海流穿过台湾海峡流入东海; 在海南岛东南和越南沿岸以东海域有一个气旋式的涡旋; 南海南部被一个反气旋式的大涡旋所占据。计算得到的这些环流特征与观测结果十分一致。另外, 数值模拟结果还显示出, 黑潮的一个分支通过巴士海峡的南部进入南海, 虽然一部分海水不断被陆架诱导流向东北, 但是仍有一部分海水可以一直向西流到海南岛以东海域。

关键词: 海流; 南海; 夏季; 黑潮; 海面坡度。

一、引 言

南海是北太平洋西部的一个最大的陆缘海, 资源十分丰富, 是石油勘探开发的重要海区。因此, 对南海海流状况的研究就显得格外重要。1958—1960年在中国近海开展的大规模的全国海洋综合调查以及后来由中国科学院、国家海洋局和水产部等单位相继在南海进行的一系列海洋调查为了解南海局部海域的海流状况奠定了基础。但是, 由于调查区域的局部性和观测数据的非同步性, 仅靠这些观测数据, 仍不足以了解整个南海的海流状况。曾庆存等用数值模拟方法研究了整个南海12个月的海流^[1, 2], 并在文献[2]中给出了代表四个季度的南海月平均环流图。其中, 大部分的计算结果与观测十分一致, 但是在夏季(7月份)的计算结果中, 南海北部的海流方向与观测并不相符, 原因可能是因为封闭的台湾海峡和巴士海峡大大影响了计算的准确性。

本文所给的结果是用一个太平洋区域模式计算得到的。在计算中, 通过台湾海峡、巴士海峡、加斯帕海峡、卡里马塔海峡、民都洛海峡和巴拉巴克海峡, 南海可以与其周围海区自由进行水体交换。因此夏季南海北部的计算海流得到了明显的改进, 计算结果与观测结果颇为一致。

二、模式概况

本文给出的太平洋区域模式源自于曾庆存1983年提出的大气-海洋耦合模式中最

1991年11月22日收到, 1992年1月18日收到修改稿。

本工作得到国家自然科学基金部分资助 (No.48970268)。

简单的海洋模式^[3], 并借鉴和吸收了中国科学院大气物理研究所多年来在建立自己的数值天气预报和大气环流模式的过程中发展起来的一些理论和技术^[4], 同时也把曾庆存和张学洪等在设计大洋环流模式^[5]和曾庆存等在设计近海环流模式中所使用的一些好的经验和节省时间的处理技术也应用于本模式^[1]。

在球坐标 (θ, λ, Z, t) 中, (θ, λ) 代表余纬和经度, 分别指向南和东, Z 轴向上为正, t 代表时间。相对于这个坐标系的深度平均的运动方程和连续方程为

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla\varphi - f^* \vec{\kappa}^0 \times \vec{v} - \kappa_2 \vec{v} + \frac{\vec{\tau}}{\rho_0 h} + A_m \left[\Delta \vec{v} + \frac{1 - \text{ctg}^2 \theta}{a^2} \vec{v} + \frac{2 \text{ctg} \theta}{a^2 \sin \theta} \vec{\kappa}^0 \times \frac{\partial \vec{v}}{\partial \lambda} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{a \sin \theta} \left(\frac{\partial h v \sin \theta}{\partial \theta} + \frac{\partial h u}{\partial \lambda} \right) = 0, \quad (2)$$

其中, $\Delta \equiv \frac{1}{a^2 \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta}) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \right]$ 为球面上的拉普拉斯算子; $\vec{v}$ 为深度平均的水平流速矢量; $h = h_0 + \xi$ 为水深厚度, h_0 为无扰动水深 (取 $(h_0)_{\max} = 200 \text{ m}$), ξ 为海面高度; $\varphi = g\xi$ 为海面扰动位势, g 为重力加速度; $f^* = (2\omega \cos \theta + \frac{\text{ctg} \theta}{a} u)$ 为折合柯利奥里参数, a 为地球半径, ω 为地球旋转角速度; $A_m = 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 为侧向涡旋粘性系数; $\kappa_2 = 3.3 \times 10^{-3} \times \frac{(u^2 + v^2)^{1/2}}{h}$ 为海底摩擦系数; ρ_0 为海水密度 (取 $\rho_0 = 1.024 \text{ g/cm}^3$); $\vec{\tau}$ 为海面风应力矢量。

为了设计完全保持能量守恒的时间-空间差分格式, 引入以下变量替换:

$$\vec{V} \equiv \Phi \vec{v}, \quad \Phi \equiv \sqrt{gh_0 + \varphi},$$

用 $\vec{V} = \theta^\circ V + \lambda^\circ U$ 代替 $\vec{v} = \theta^\circ v + \lambda^\circ u$, 则方程 (1) 和 (2) 变为

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -L_1(\vec{V}) - L_2(\vec{V}) - \Phi \nabla \varphi - f^* \vec{\kappa}^0 \times \vec{V} - \kappa_2 \vec{V} + g \frac{\vec{\tau}}{\rho_0 \Phi} + A_m \Phi \left[\Delta \vec{v} + \frac{1 - \text{ctg}^2 \theta}{a^2} \vec{v} + \frac{2 \text{ctg} \theta}{a^2 \sin \theta} \vec{\kappa}^0 \times \frac{\partial \vec{V}}{\partial \lambda} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1}{a \sin \theta} \left(\frac{\partial \Phi V \sin \theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \Phi U}{\partial \lambda} \right). \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} L_1(F) \equiv \frac{1}{2a \sin \theta} \left(\frac{\partial F v \sin \theta}{\partial \theta} + v \sin \theta \frac{\partial F}{\partial \theta} \right) \\ L_2(F) \equiv \frac{1}{2a \sin \theta} \left(\frac{\partial F u}{\partial \lambda} + u \frac{\partial F}{\partial \lambda} \right) \end{cases} \quad (F = V \text{ 或 } U)$$

侧边界条件是

$$\vec{V}_n|_{\Gamma} = 0, \quad (5)$$

其中 Γ 是模式的水平边界, 下标 n 代表 Γ 的外法向。

在边界条件 (5) 式下, 方程组 (3) 和 (4) 有以下整体性质:

(1) 总质量守恒, (2) 如果忽略耗散项和强迫项, 则有能量守恒方程, (3) 非线性算子 L 为反对称算子, 以及 (4) 柯利奥里力和曲率项不改变动能密度。

今利用我们以前已设计出的保持上述整体性质的差分方程^[6], 取计算区域为 $98.75^{\circ}\text{E}-69.75^{\circ}\text{W}$ 和 $60.25^{\circ}\text{N}-60.25^{\circ}\text{S}$; 网格距为 $\Delta\theta=\Delta\lambda=0.5^{\circ}$ 。

初条件为

$$V=0, \quad U=0, \quad \varphi=0 \quad (\text{即 } \xi=0). \quad (6)$$

风应力 $\vec{\tau}$ 为 Hellermen 和 Rosenstein 提供的气候平均的月平均风应力^[7]。

本模式去掉了“刚盖近似”, 海面高度也是一个预报量。因此由于表面重力波的存在就大大限制了积分的时间步长。为了节省计算时间, 我们仍采用了文献[1]所使用的分解算法。积分过程中取 $\Delta t_1=6 \text{ min}$ 作为适应过程的积分时间步长, 取 $\Delta t_2=60 \text{ min}$ 作为平流和耗散过程的积分时间步长。

从静止状态开始, 把模式积分了 80 d。从能量变化曲线可知, 大约在 40 d 左右, 总有效位能和总动能就都趋于常数, 再计算下去各点上的流速和海面高度也都不再变化, 这表明整个太平洋的环流系统 (包括南海环流) 已经达到了定常状态。

三、模拟结果

7 月份, 大约 18°N 以南的南海海面吹西南风, 西部风力强, 东部风力弱; 在 18°N 以北, 西南风逐渐转成南风, 风力渐弱。图 1 为计算得到的南海 7 月份的上层月平均流。可以看到, 18°N 以南一些显著的海流特征是: 一支来自爪哇海的海流经加斯帕海峡流入南海, 沿马来半岛的北岸向西北流, 其中大部分海水在沿马来亚海岸的流动过程中不断向东北转向并加入了在中南半岛东南沿海形成的一支东北向漂流, 另外一部分海水在泰国湾做一反气旋流动后也汇入那支东北向漂流。因此, 在越南南部沿岸的漂流显著强化。大约 11°N 左右, 这支漂流与越南东岸向南的一支沿岸流汇合后一起向东北流, 于是在南海中部形成一支较强的东北向海流。其中一小部分海水在大约 11°N , 114°E 的地方从东北向海流分离出来逐渐转向南流, 然后通过南沙海槽向西南流, 在纳土纳群岛由于受到地形的阻挡又逐渐转向西流, 并汇入来自爪哇海的那支海流, 于是在南海南部形成一个反气旋式的大涡旋。在大约 15°N , 117°E 地方, 一部分海水又从南海中部的那支东北向海流分离出来向东流, 在菲律宾西岸又向西南转向, 然后从民都洛海峡和巴拉巴克海峡流出南海进入了苏禄海。如果仔细观察还可以看到, 在加里曼丹和巴拉望岛海岸还有弱的东北向漂流; 南海中部的那支东北向海流在 15°N , 117° 地方分支后, 就转向北流, 当受到南海北部的一支向西的海流阻挡后又转向西流, 在海南岛东南逐渐向南转, 然后在越南东岸形成一个较强的向南的沿岸流, 于是围绕西沙和中沙群岛形成一个气旋式的大涡旋。可能是由于复杂的海底地形的影响, 在这个大涡旋里面又似乎存在几个小的涡旋, 海流状况十分复杂。

图 2 所给出的南海表层流的水平结构是汇总了许多国家多年的观测结果, 与 Wyrski^[10]所给的南海夏季表层海流图十分相似。迄今为止, 人们对整个南海表层流的

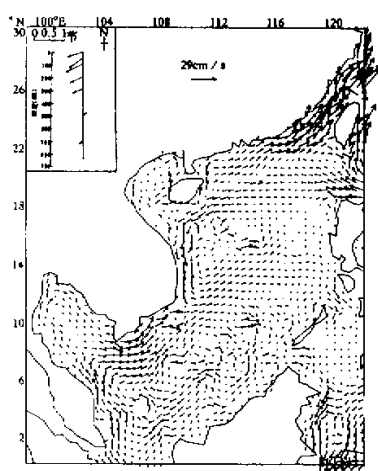


图1 计算的7月份南海上层平均流^[8]
为测流站, 小插图为实测余流

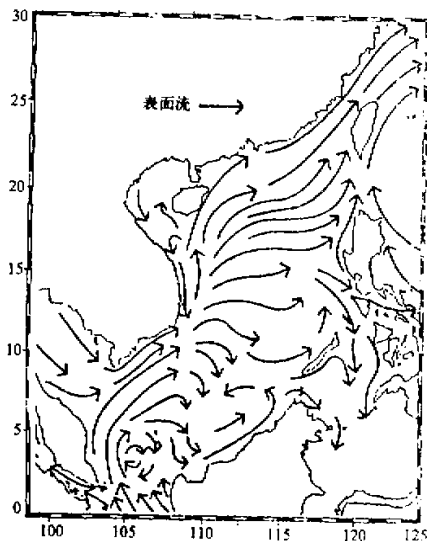


图2 观测的南海7月份表层流^[9]

认识, 主要都是参照了 Dale (1956) 和 Wyrski (1961) 的工作。把图1与图2比较后可以看到, 在 18°N 以南, 计算海流结果与观测结果不仅流型颇为相似, 而且也都是从爪哇海流入, 从民都洛海峡和巴拉巴克海峡流出。另外, 在图2所给的观测结果中, 在海南岛以南和越南海岸以东海域, 也存在一个气旋式的涡旋, 只不过涡旋的范围比计算结果要小得多, 可能是由于观测数据较少还不能充分反映这个涡旋。

图2所给的观测结果中, 在南海北部陆架区有一支东北向的沿岸流通过台湾海峡流入东海。从图1可以看到, 夏季, 这支观测到的东北向沿岸流在模拟结果中得到了很好地再现。7月份, 计算得到的这支海流通过台湾海峡向东海的输送量有 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在文献[2]所给的7月份结果中, 在 18°N 以南的流型与图1的计算结果差别不大, 但是广东近海的流动形势, 文献[2]的计算结果与观测结果并不一致, 主要原因可能是由于在文献[2]的计算中取封闭的台湾海峡, 忽略了南海与东海的水交换, 因此就大大限制了北部漂流的发展。

从图1还可以看到, 通过巴士海峡的南部, 黑潮的一个分支流入了南海, 虽然部分海水不断被陆架诱导流向东北, 但是仍有一部海水一直向西流到了海南岛以东海域。近年来, 关于黑潮在巴士海峡是否有一个分支流入南海的问题, 引起了许多海洋学家的广泛注意, 并且也进行了许多观测和分析研究, 但是到目前为止, 仍没有得到一致的结论。图1中计算得到的黑潮进入南海的分支, 从仇德忠等所给的实测余流结果得到了证实^[8]。图1中的大黑点表明浮标测流站的位置, 小插图为1982年6月西南季风时在该站所测到的余流的垂直分布, 可以看到从表层到300 m深均是较强的西南向海流, 与计算结果颇为一致。范立群等所做的南海北部海区的水团分析结果中清楚地表明了南海北部的表层水团和次表层混合水团在夏季都含有西太平洋表层和西太平洋亚热带次层

水的成分, 反映了黑潮水对南海水的影响^[11]。肖屏东用温盐历史数据分析结果表明, 从5月到9月黑潮锋向吕宋海峡弯曲, 但并不存在入侵海流^[12]。黄企洲计算的地转流结果表明, 的确存在一个黑潮的分支流入南海^[13]。如图1所示, 在巴士海峡南部, 一部分黑潮水流入南海, 北部陆架上那支东北向海流的外海侧部分北上到台湾西南海域时由于受到海岸的阻挡和海底地形的诱导而转向东南, 在巴士海峡的北端流入太平洋。但这个流量远小于在巴士海峡南部的流入量。在我们的计算结果中, 7月份黑潮通过巴士海峡向南海的纯输入量达 $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

图3表明了7月份南海的海面起伏分布, 可以看到, 巴士海峡和海南岛以东海域的海面高度差达12 cm, 可推得自东向西下降的海面坡度为 -1.2×10^{-7} 。可能黑潮在巴士海峡的南海分支就是由这个海面坡度驱动的。另外还可以看到, 18°N 以北的海域不仅存在沿台湾海峡方向的海面坡度也存在横穿海峡方向的海面坡度, 海面高度的这种分布与文献[2]所给的结果有很大的区别, 这表明了西太平洋的大尺度环流系统对南海北部和台湾海峡海流的影响是相当显著的。看来文献[2]不能很好地再现夏季南海北部海流的观测特征其主要原因是取封闭的台湾海峡和巴士海峡就略掉了太平洋大尺度环流系统对南海海流的影响。

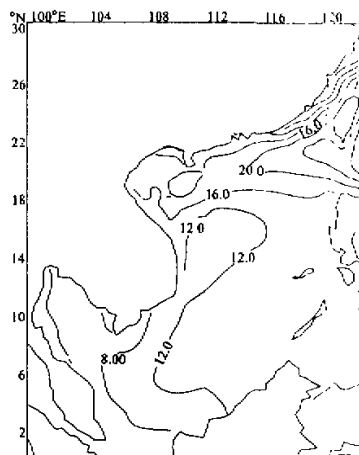


图3 计算的7月份南海海面高度分布

四、结 论

(1) 由观测所得到的夏季南海海流的主要特征: 在南海南部存在一个反气旋式的大涡旋; 在海南岛以南越南以东存在一个气旋式的环流; 在南海中部和广东近海都存在较强的东北向流。这些都在数值模拟结果中得到了很好地再现。

(2) 数值模拟结果表明, 夏季在巴士海峡黑潮的一个直接分支进入了南海, 这支海流可能是由从东向西下降的海面坡度驱动的。虽然, 目前只有少量的直接海流观测结果可以证实这个黑潮分支的存在性。但是, 水团分析结果和地转流计算结果却都表明了这个分支存在的可能性。我们期望今后能有足够多的观测资料以进一步证实这个分支的存在。

(3) 夏季, 通过加斯帕海峡爪哇海向南海输送水; 通过民都洛海峡和巴拉巴克海峡, 南海向苏禄海输送水。可能是由于输送量较小的缘故, 这些入流和出流对南海南部的海流状况几乎没有什么影响。因为本文的开口计算结果与文献[2]的闭口计算结果在南海南部几乎一样。南海通过台湾海峡向东海输送水, 而通过巴士海峡, 太平洋向南海输送水, 这些流出和流入, 对南海北部的海流形势有着重要的影响。这表明了西太平洋

大洋环流与南海北部的环流存在着密切的关系。因而,在南海海流的数值模拟当中,切不可忽视通过台湾海峡和巴士海峡的南海与东海以及南海与太平洋的水交换。

致 谢: 本工作得到曾庆存院士的关心和支持,张学洪、袁重光和季仲贞等教授给以很多帮助,孙燕斌打印本文手稿,作者一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 曾庆存,季仲贞,李荣凤,1985,一个近岸海流数值计算模式及其检验,南海石油开发环境国际研讨会论文集,15—21.
- [2] 曾庆存,李荣凤,季仲贞,甘子钧,柯佩辉,1989,南海月平均流的计算,大气科学,13 (2),127—138.
- [3] Zeng Qingcun, 1983, Some numerical ocean-atmosphere coupling models, *Proceedings of the First International Symposium on Integrated Global Ocean Modelling*, Tallin, USSR.
- [4] 曾庆存,张学洪,1981,完全保持能量守恒的可压缩时-空差分格式和协调的分解算法,中国科学,第11期,1355—1366.
- [5] Zeng Qingcun, Zhang Xunhong et al., 1990: IAP oceanic general circulation models, *Proceedings of the Third International Summer Colloquium on Climate Change Dynamics and Modelling*, Aug. 14—20, 1990, Beijing, China.
- [6] 曾庆存,季仲贞,李荣凤,1988: 发展方程差分格式的构造与近岸海流数值模拟,大气科学 (特刊),大气物理研究所建所 60 周年纪念刊,166—175.
- [7] Hellerman, S. and M. Rosenstein, 1983, Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates, *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1093—1104.
- [8] 仇德忠,杨天鸿,郭忠信,1984,夏季南海北部一支向西流动的海流,热带海洋,3 (4),65—73.
- [9] Dale, W.L., 1956, Wind and drift currents in the South China Sea, *The Malayan Journal of Tropical Geography*, 8, 1—31.
- [10] Wyrtki, K., 1961, Physical oceanography of the southeast Asian waters, Naga Report, 2.
- [11] 范立群,苏育嵩,李凤岐,1988,南海北部海区水团分析,海洋学报,10 (2),136—145.
- [12] Shaw Pingtung, 1991, The Seasonal Variation of the Intrusion of the Philippine Sea Water Into the South China Sea, *J. Geophys. Res.*, 96, C1, 821—827.
- [13] 黄企洲,1983,巴士海峡黑潮流速和流量的变化,热带海洋,2 (1),35—41.

Simulated Results of the Current in the South China Sea in Summer

Li Rongfeng

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Wang Wenzhi and Huang Qizhou

(South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301)

Abstract

Simulated results of the upper layer current in the South China Sea in summer are given which show that: there is a strong coastal current flowing Northeastward along the north continental shelf of the South China Sea and entering the East China Sea through the Taiwan Strait; in the area southeast to Hainan Island and east to Vietnam a cyclonic eddy occurs around Xisha and Zhongsha archipelagos; an anticyclonic eddy occupies the southern South China Sea. These features are in good agreement with observations. However, simulated results also display a branch of the Kuroshio entering the South China Sea through the southern part of the Bashi Strait, the existence of which could be confirmed by very few observations.

Key words: current; summer; South China Sea; Kuroshio; sea surface slope.