

南海上层海流的数值模拟*

李荣凤

黄企洲 王文质

(中国科学院大气物理研究所, 北京) (中国科学院南海海洋研究所, 广州)

摘要 用一个水平分辨率较高的太平洋区域海洋模式计算了太平洋的上层海流。太平洋海域大的海流流系, 如黑潮、亲潮、北(南)赤道流、北赤道逆流、加利福尼亚海流和东澳大利亚海流等都再现在模拟结果之中了。本文只给出了南海四季代表性月份的上层环流的数值模拟结果。结果表明: 南海黑潮分支是南海北部最重要的一支海流, 它不仅是南海暖流的水体来源, 而且构成了南海环流重要的一翼。除了个别月份外, 终年都有一支较强的NE向海流穿过台湾海峡进入东海。这些计算结果有的已被观测结果所证实。

关键词 南海上层海流 数值模拟 黑潮南海分支 海面坡度

前言

南海是北太平洋西部的一个最大的边缘海, 资源十分丰富, 是石油勘探开采的重要海区。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, 由于调查区域的局限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^[1, 2]用数值模拟方法研究了整个南海12个月的海流, 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文献报道过的结果比较一致, 这在秋(10月)、冬(1月)季反映得尤其明显。但是春(4月)、夏(7月)季的计算结果的符合程度不如秋、冬季那么好, 特别是南海北部。究其原因, 除了秋、冬季的风力比较强而稳定外, 可能还与把台湾海峡和吕宋海峡(这里指台湾岛和吕宋岛之间的总水域)作为闭边界处理影响了计算结果的准确性有关。

本文所给的结果是用一个水平分辨率较高的太平洋区域模式计算所得结果的一部分(对整个太平洋区域的计算结果将另文叙述), 即南海海域上层海流的计算结果。在计算中, 通过台湾海峡、吕宋海峡、民都洛海峡、巴拉巴克海峡、加斯帕海峡和卡里马塔海峡, 南海水可以与其周围海区的水自由进行交换。计算结果表明, 四季南海北部上层海流的计算结果都得到了

本文于1992-02-19收到, 修改稿于1992-12-25收到。

* 本工作得到国家自然科学基金部分资助(编号: 48970268)。

明显的改进, 它所显示的南海黑潮分支, 不仅与南海暖流关系密切, 而且它一直向西流至海南岛东部, 是构成南海总环流的重要因素.

1 模式

本文给出的太平洋区域模式源自于曾庆存^[3]提出的大气-海洋耦合模式中最简单的海洋模式, 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大气环流模式和海洋环流模式的过程中发展起来的一些理论和技术以及节省机时的一些好的处理方法和经验^[1, 4~6].

1.1 控制方程和变量替换

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:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\nabla\phi - f^* \bar{k}^0 \times \bar{v} - r_b \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h} \bar{v} + \frac{\bar{\tau}}{\rho_0 h} + A_m \left[\Delta\bar{v} + \frac{1 - \text{ctg}^2\theta}{a^2} \bar{v} + \frac{2\text{ctg}\theta}{a^2 \sin\theta} \bar{k}^0 \times \frac{\partial\bar{v}}{\partial\lambda} \right], \quad (1)$$

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

其中, $\Delta \equiv \frac{1}{a^2 \sin\theta} \left[\frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial^2}{\partial\lambda^2} \right]$ 为球面上的拉普拉斯算子; $\bar{v} = (u, v)$ 为深度平均的水平流速矢量; $h = h_0 + \xi$ 为水层厚度, 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; $f^* = \left(2\omega \cos\theta + \frac{\text{ctg}\theta}{a} u \right)$ 为折合科氏参数, a 为地球半径, ω 为地球旋转角速度; $A_m = 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ 为侧向涡动粘性系数; $r_b = 3.3 \times 10^{-3}$ 为海底摩擦项的系数; ρ_0 为海水密度(取 $\rho_0 = 1.024 \text{g/cm}^3$); $\bar{\tau}$ 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:

$$\bar{V} = \Phi \bar{v}, \quad \Phi = \sqrt{gh_0 + \varphi},$$

用 $\bar{V} = \theta^0 V + \lambda^0 U$ 代替 $\bar{v} = \theta^0 v + \lambda^0 u$, 则方程(1)和(2)变为:

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

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

其中,

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

1.2 侧边界条件和方程组的性质

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.

在式 (5) 边界条件下, 方程 (3) 和 (4) 有以下整体性质:

1.2.1 总质量守恒

$$\iint_S \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 g \xi) ds = 0, \quad (6)$$

S 为模式区域, $ds = a^2 \sin\theta d\theta d\lambda$ 为面积元.

1.2.2 如果忽略耗散项和强迫项, 则有能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S (U^2 + V^2 + \varphi^2) ds = 0. \quad (7)$$

1.2.3 非线性算子 L_1 和 L_2 为反对称算子, 即有

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} F \cdot L_1(F) \cdot a \sin\theta d\theta = 0, \quad (8)$$

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F \cdot L_2(F) \cdot a \sin\theta d\lambda = 0, \quad (9)$$

其中, θ_1 和 θ_2 分别表示模式的北边界和南边界; λ_1 和 λ_2 分别表示模式的西边界和东边界. 式 (8) 和 (9) 表示非线性平流项可以使能量在水平方向传递但是不改变总能量.

1.2.4 科氏力和曲率项不改变动能密度

$$V \cdot f^* U - U \cdot f^* V = 0. \quad (10)$$

1.3 差分方程和计算区域

采用变量 V 、 U 和 φ 呈交错分布的 C-网格系统, 且 V 、 U 和 φ 分别安排在 $(i + \frac{1}{2}, j)$,

$(i, j + \frac{1}{2})$ 和 $(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2})$ 格点上, 按文献 [6] 所做的那样, 我们可以定义一些基本的

有限差分算子和平均算子:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial F}{\partial \lambda} \right)_{i+\frac{1}{2}} \approx \frac{F_{i+1} - F_i}{\Delta \lambda} \equiv \frac{1}{\Delta \lambda} (\delta_\lambda F)_{i+\frac{1}{2}}, \\ F_{i+\frac{1}{2}} \approx \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \equiv (\bar{F}^\lambda)_{i+\frac{1}{2}}, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial G}{\partial \lambda}\right)_i \approx \frac{G_{i+\frac{1}{2}} - G_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta \lambda} \equiv \frac{1}{\Delta \lambda} (\delta_\lambda G)_i, \\ G_i \approx \frac{G_{i+\frac{1}{2}} + G_{i-\frac{1}{2}}}{2} \equiv (\tilde{G}^\lambda)_i, \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\{F_i\}$ 和 $\{G_{i+\frac{1}{2}}\}$ 是定义在 $\{\lambda_i = (i-1)\Delta\lambda\}$ 和 $\{\lambda_{i+\frac{1}{2}} = (i-\frac{1}{2})\Delta\lambda\}$ 上的离散变量, 同样可以定义沿 θ 方向的那些算子, 利用这些基本的离散算子, 不难把方程 (3) 和 (4) 的每一项都离散化, 例如:

$$\begin{aligned} [L_2(V)]_{i+\frac{1}{2}, i} &= \left[\frac{1}{2a \sin \theta} \left(\frac{\partial u V}{\partial \lambda} + u \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) \right]_{i+\frac{1}{2}, i} \\ &\approx \frac{1}{2a \sin \theta_j \Delta \lambda} \left[\delta_\lambda (\tilde{u} \tilde{V}^\theta) + \tilde{u} \overline{\delta_\lambda V}^\lambda \right]_{i+\frac{1}{2}, i} \\ &= \frac{1}{4a \sin \theta_j \Delta \lambda} \left[(u_{i+1, i+\frac{1}{2}} + u_{i+1, i-\frac{1}{2}}) V_{i+\frac{3}{2}, i} \right. \\ &\quad \left. - (u_{i, i+\frac{1}{2}} + u_{i, i-\frac{1}{2}}) V_{i-\frac{1}{2}, i} \right], \\ &\quad i=1, 2, \dots, I-2; \quad j=2, \dots, J-1. \end{aligned} \quad (13)$$

引进几何平均 \overline{F}

$$(\overline{F^2})_{i+\frac{1}{2}} = F_{i+1} \cdot F_i,$$

则有

$$F^2 \delta_\lambda G + 2F \cdot \tilde{G} F^\lambda = \delta_\lambda (G \overline{F^2}),$$

这正是微分算子

$$F^2 \frac{\partial G}{\partial \lambda} + 2FG \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} (GF^2)$$

的离散形式.

容易证明, 这样构造的离散系统保持了原微分方程 (6) ~ (10) 的积分性质.

模式计算区域为从 60.25°N 到 60.25°S 和从 98.75°E 到 69.75°W . 空间分辨率为: $\Delta\theta = \Delta\lambda = 0.5^\circ$.

初条件为:

$$V=0, \quad U=0, \quad \varphi=0 \quad (\text{即 } \xi=0). \quad (14)$$

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

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 $\Delta t_1 = 6$ 分钟作为适应过程的积分时间步长, 取 $\Delta t_2 = 60$ 分钟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 天. 从能量变化曲线 (图略) 可知, 大约在 40 天左右

右,总有效位能和总动能就不再变化了,这表明了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。

2 南海上层流场的季节性特征

南海处于季风控制之下,已有的研究成果所反映的南海海流和海面起伏均具有明显的季节变化。与文献[2]一样,本文也只分析四季代表性月份的海流。

2.1 冬季(1月)海流

图1a是本模式的计算结果,图1b引自文献[2],可见两者的海流形势差不多是一样的,即在冬季,整个南海被一个气旋型大环流所控制,其中又包含着若干个闭合式环流,此外南海暖流⁽⁹⁾也得到了很好的反映,它的水源部分源于南海黑潮分支,南海暖流一部分从台湾海峡中流出,一部分又在台湾西南折向东南流入太平洋。黑潮没有分支穿过台湾海峡。图1a和b的差异主要出现于南海北部海区,以海南岛以东海域最明显。

2.2 春季(4月)海流

春季海流流速(图2)虽然比冬季明显减小,但在 18°N 以南基本上仍然为一个大的气旋型环流,因此总的环流形势与冬季相似,仅吕宋岛西部和南沙群岛以南海域气旋式环流的中

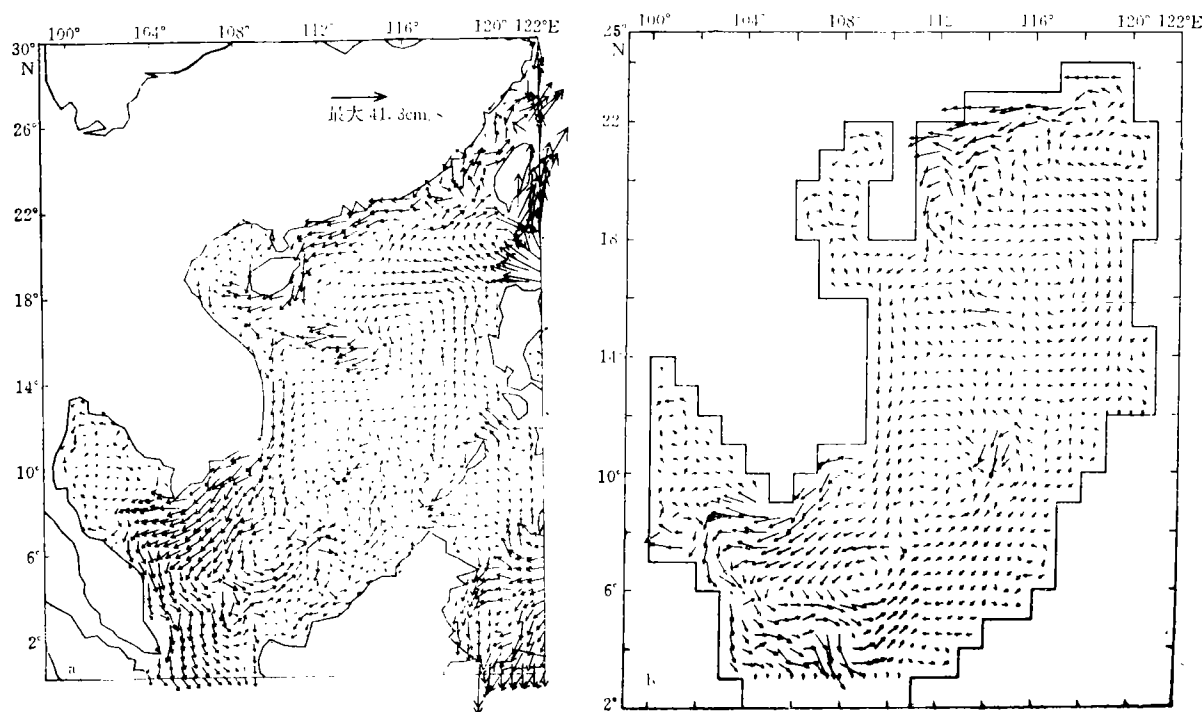


图1 冬季(1月)平均海流
(a) 本文结果 (b) 引自文献[2]

心位置稍有差异. 与文献 [2] 中春季计算结果相比, 18°N 以北的差异比较明显, 特别在珠江口以东的广东近海, 两者的流态恰好相反.

2.3 夏季 (7月) 海流

本文的计算结果 (图3a) 所反映的流态, 在 18°N 以南海区, 总的说来与文献 [2] 的计算结果 (图3b) 相当一致, 也与过去报道的许多调查研究结果相差不大, 即一支来自爪哇海的海流经加斯帕海峡流入南海; 大约在 12°N 以南存在着一个大而稳定的反气旋式环流; 在 $12^{\circ}\sim 16^{\circ}\text{N}$ 的越南中部外海存在着一个气旋式涡旋, 等等. 但在 18°N 以北海区, 两者差异明显. 图3a表明在南海北部陆架区有一支偏NE向的海流通过台湾海峡流入东海, 并算得这支海流向东海

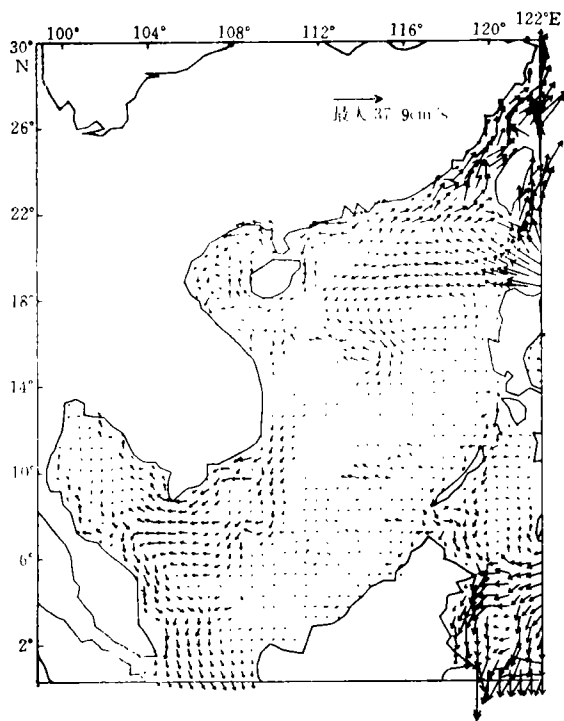


图2 春季 (4月) 平均海流

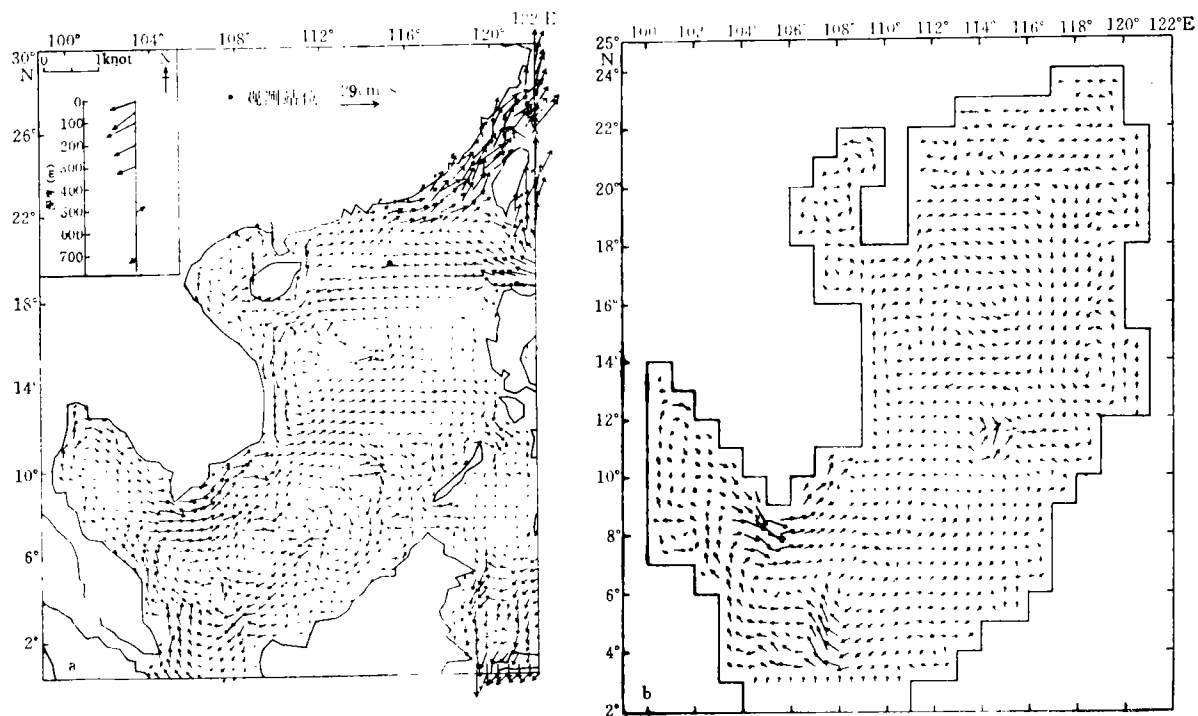


图3 夏季 (7月) 平均海流

(a) 本文结果 (b) 引自文献 [2] · 观潮站位

的水量输送为 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，这些结果与文献[9, 10]的研究结果都颇为一致。说明本文的计算结果确实使文献[2]中夏季的计算结果得到了明显的改善。

2.4 秋季(10月)海流

总的说来, 18°N 以南秋季南海的环流形势(图4)与冬季十分相似, 均被一个大的气旋型环流所控制, 其中又包含若干个小的涡旋。但在 18°N 以北, 图4显示出一派SW向或偏S向的海流, 与文献[2]中秋季的计算结果中在南海北部出现多个较小尺度的气旋式环流有着明显的差异。图4的结果与文献[11, 12]报道的结果非常接近, 特别在南海北部的广东近海, 海流趋势与实测资料较为一致。但图4中没有出现南海暖流, 这与文献[13]的数值计算结果不完全一样。

图5a~d给出了上述四季典型月份的海面起伏计算值。与文献[2]对应的海面起伏图相比较, 虽然在起伏的量值上两者差异明显, 但是两者等高线的分布趋势, 在 18°N 以南的南海广大海域还是基本相似的, 仅在南海北部海区彼此的差异比较大。这是本模式去掉“刚盖近似”, 并将台湾海峡、吕宋海峡等全部开通以后的计算结果。它们与相应月份的计算流场之间存在着很好的对应关系。这表明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, 台湾海峡和吕宋海峡对南海, 特别是南海北部流态的影响不能忽视。

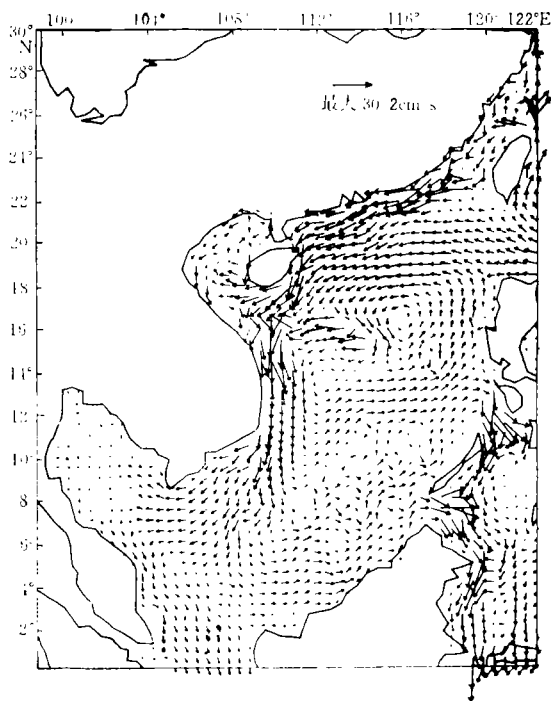


图4 秋季(10月)平均海流

3 黑潮南海分支和南海暖流

根据文献[14, 15]报道, 在南海北部陆坡区终年存在着一支偏西向海流。由于它是黑潮从源地往北流动过程中经过吕宋海峡时进入南海的一个分支, 故称其为黑潮南海分支。它几乎横贯南海北部陆坡区。在我们的模拟结果中(参见图1a、图2、图3a和图4, 其他各月的图略), 黑潮南海分支得到了很好的再现。这一不因季风风场变化而改变其流向的南海黑潮分支, 虽然其流量约为台湾以东黑潮的 $1/3$ ^[15], 但它在南海总环流中却起着十分重要的作用。由图1a、图2、图3a和图4可知, 它是南海环流(夏季仅为南海中部环流)北翼的基本组成部分之一。虽然目前关于南海黑潮分支的存在还有争议^[16], 但是文献[14]中的实测余流分布(图6)至少为春、夏季存在南海黑潮分支提供了有力证据。本文的计算结果表明, 黑潮

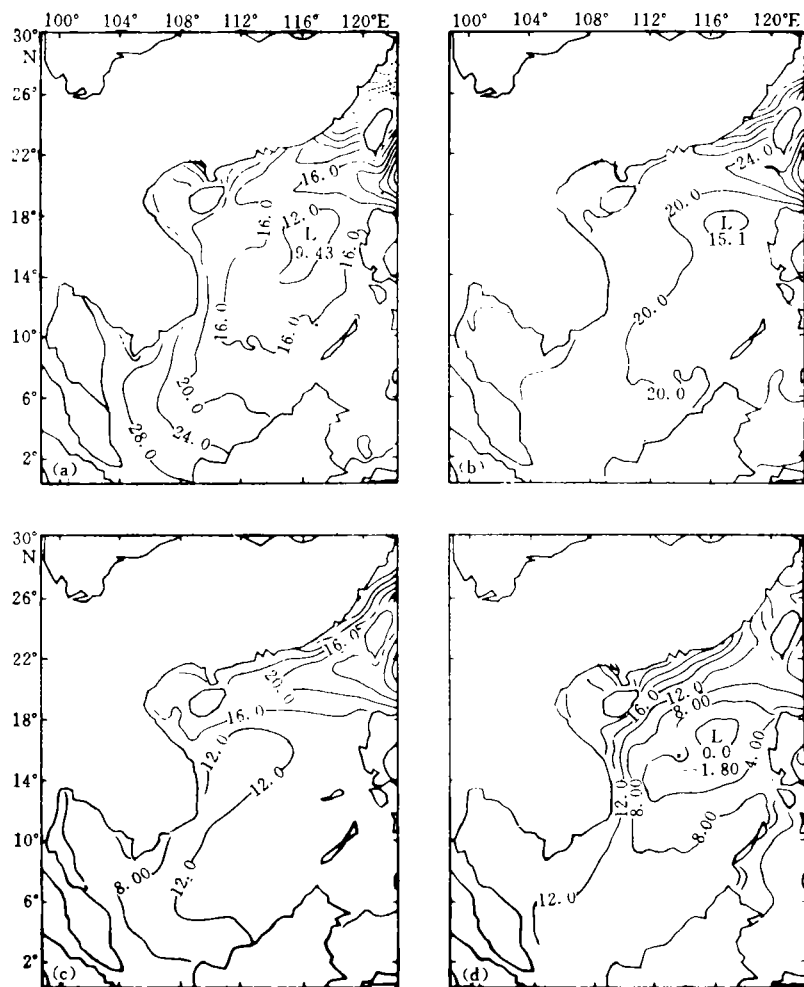


图5 海面起伏

(a) 1月 (b) 4月 (c) 7月 (d) 10月

南海分支是终年存在的，只是在不同月份它向西深入南海的程度不同。

这里顺便指出，在1958~1960年间全国海洋综合调查中，对位于珠江口正南方外海的6067和6078两站在春季南风或东南风情况下所测余流流向为W或SW，当时觉得难于理解¹⁾。现在看来，这是因为这些测站（至少是6067站，其位置标在图3a中）当时正位于黑潮南海分支的范围内的缘故。

在南海北部沿岸流的外缘，终年存在着一支沿着等深线自SW流向NE的海流，它被称为南海暖流。这支海流早在1958~1960年间全国海洋综合调查中已被发现和命名。但由于它在冬季处于逆风流动状态，往往被表层风海流所掩盖而难于辨识，因而后来管秉贤等多次对它进行了专门的论述^[8, 9, 15]。但关于南海暖流的成因，看法不一^[2, 9]。根据本文的数值模拟结果，显见南海暖流的水主要源于黑潮南海分支，这与南海北部陆架邻近水域断面调查的分

1) 管秉贤，陈上及。全国海洋综合调查报告，第五册，第6章，1964，80。

析结果的看法^[9]一致。

4 吕宋海峡和台湾海峡中的流动

关于台湾海峡中的流动, 近几年来比较一致的看法是: 除了海峡西岸存在着季节性变化的沿岸流外, 一般终年都是以 NE 向流动为主, 仅在强烈持续的 NE 风期间, 海峡上层会出现短暂的 SW 向海流^[17, 18]。我们的数值模拟结果, 除 10 月份外, 都很好地再现了这种流态(图 1a、图 2 和图 3a)。

目前在对台湾海峡和吕宋海峡中流动的看法上一个主要分歧是黑潮有没有一个支流穿过台湾海峡东部进入东海^[19]? 本文的数值模拟结果表明, 黑潮南海分支通过吕宋海峡南部进入南海后, 由于它在向西流动的过程中不断有一部分海水转向, 从而构成其北侧的南海暖流。南海暖流向东北流至台湾海峡南端时, 除一部分穿过台湾海峡进入东海外, 另一部分因受到台湾浅滩的阻挡和海底地形不断变浅的影响而转向东南, 最后从吕宋海峡北部流出进入太平洋。似乎不存在一个黑潮分支经吕宋海峡北部进入台湾岛西侧流入东海。因此我们初步认为, 通过台湾海峡流入东海的海流是南海暖流的一部分而非直入的黑潮分支, 1976~1977 年台湾学者在台湾南部南海区域的实测海流具有 SE 向流动趋势²⁾, 在某种程度上支持了本文在吕宋海峡北部海流流入太平洋的计算结果。

5 结论

1. 本文的“开口”模拟结果与文献 [2] 的“闭口”模拟结果在 18°N 以南的南海海域几乎一样, 但对南海北部的海流流态却产生了重要的影响, 使南海北部流场的模拟结果得到了明显的改善。这表明南海北部的海流与西太平洋的大洋环流之间存在着密切的关系。沟通南海与太平洋和东海的吕宋海峡和台湾海峡, 对整个南海环流的形成, 以及南海北部的流态都具有决定性的影响。相比之下, 南海南部的巴拉巴克海峡、加斯帕海峡和卡里马塔海峡等, 对南海环流影响是很小的。

2. 黑潮南海分支构成了南海环流重要的一翼(北翼), 同时它是南海暖流最重要的水体来源。目前已有少量的实测海流结果证实了黑潮南海分支和南海暖流的存在, 今后可望有更多的观测资料予以检验。

3. 通过台湾海峡流入东海的是南海暖流的一部分。黑潮似乎没有分支直接进入台湾海峡而流入东海。

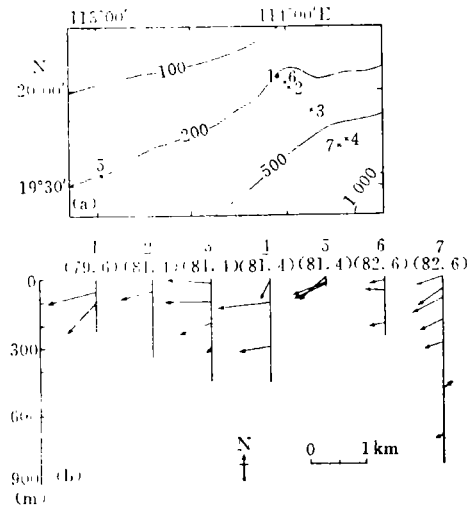


图6 春、夏季南海北部实测余流
(a) 测流站位 (b) 余流分布(引自文献[14])

2) 陈特固. 近十年来台湾省海洋水文调查研究若干进展, 南海研究与开发, 1989, (1): 59~67.

4. 在秋季的模拟结果中, 唯有10月份没有出现南海暖流, 即台湾海峡中也一派SW向流动. 这颇为耐人寻味, 值得今后进一步研究.

本工作得到曾庆存所长和甘子钧副所长的关心和支持, 张学洪、袁重光和季仲贞教授给予很多帮助, 在此表示衷心感谢.

参考文献

- 1 曾庆存, 季仲贞, 李荣凤. 一个近岸海流数值模式及其检验. 南海石油开发环境国际研讨会论文集, 广州: 中国科学院南海海洋研究所编辑室, 1985, 15~21
- 2 曾庆存, 李荣凤, 季仲贞, 甘子钧, 柯佩辉. 南海月平均流的计算. 大气科学, 1989, 13(2): 127~138
- 3 Zeng Qingcun. Some numerical ocean-atmosphere coupling models. In: Proceedings of the First International Symposium on Integrated Global Ocean Modelling, Tullin, SSSR, 1983, China Meteorological Press, Beijing
- 4 曾庆存, 张学洪. 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, 1981, (11): 1355~1366
- 5 曾庆存, 张学洪. 球面上斜压原始方程组保持总有效能量守恒的差分格式. 大气科学, 1986, 11(2): 113~127
- 6 Zeng Qingcun *et al.* IAP Oceanic general circulation models. In: Proceedings of Third International Summer Colloquium on Climate Change Dynamics and Modelling, Aug. 14~20, 1990, China Meteorological Press, Beijing, 331~350
- 7 Hellerman S and M Rosenstein. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. J. Phys. Oceanogr., 1983, 13, 1093~1104
- 8 管秉贤. 南海暖流——广东外海一支冬季逆风流动的海流. 海洋与湖沼, 1978, 9(2): 117~127
- 9 马应良等. 南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告. 北京: 海洋出版社, 1990, 215~241
- 10 赵保仁等. 东海主要水道的流量估算. 海洋学报, 1991, 13(2): 169~178
- 11 Dale W L. Wind and drift currents in the South China Sea. The Malayan Journal of Tropical Geography, 1956, (8): 1~31
- 12 Wyrki K. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. Naga Report, 2, 1961
- 13 曾庆存等. 南海数值模拟月平均水平环流图. 海洋环流研讨会论文集, 北京: 海洋出版社, 1992, 127~168
- 14 仇德忠等. 夏季南海北部一支向西流动的海流. 热带海洋, 1984, 3(4): 65~73
- 15 郭忠信等. 冬季南海暖流及其右侧的西南向海流. 热带海洋, 1985, 4(1): 1~9
- 16 Shaw Pingtung. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea water into the South China Sea. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(C1): 821~827
- 17 福建省海洋研究所. 台湾海峡中北部海洋综合调查研究报告. 北京: 科学出版社, 1989, 180~188
- 18 张以恩等. 台湾海峡的底层流. 海洋与湖沼, 1991, 22(2): 124~131
- 19 伍伯瑜. 台湾海峡环流研究中的若干问题. 台湾海峡, 1982, 1(1): 1~7