

南海月平均流的计算

曾庆存 李荣凤 季仲贞 甘子钧 柯佩辉

(LASG, 中国科学院大气物理研究所)

(LASG, 中国科学院南海海洋研究所)

提 要

本文用一个二维全流方程模式, 计算了南海1—12月的逐月平均流, 所得的南海逐月环流的总趋势以及一些中小尺度的涡旋现象不仅与海洋观测相一致, 也与已有的一些研究结果相吻合, 而且, 计算所得的海洋场和海面起伏场均很好地反映出南海的季节性变化特征, 特别是高海暖流的存在在计算中又进一步得到了证实, 文中对南海海流的机理也作了一些初步探讨。

关键词: 月平均流, 南海暖流, 海面起伏。

一、引 言

近年来随着海上石油开发和海洋工程建筑的迅猛发展, 对海洋环境的了解提出了更高的要求。在诸多的海洋环境因素中, 海流是海洋水文状况的一个重要因素, 加强对海流的观测无疑是必要的, 但是目前无论就资金和技术设备来看, 组织大范围的海流观测, 仍然有很大的困难。

我国最大的海——南海, 不仅是世界海上往来的重要航道, 而且资源丰富, 是我国石油勘深、开发的重要海区, 所以这一海区的海流状况早就引起国内外各方面人士的关注, 已有不少中外学者对南海海流进行过研究^[1-27], 但是到目前为止, 对南海某些海域的海流无论观测和研究都仍属空白。设计我国的海流计算模型, 并用数值计算研究海流就愈加显得紧迫和必要。我国的海洋科学工作者用几种海流数值模型对渤海、黄海和东海的海流进行了研究^[28-32], 文献[15]和[5]用数值计算研究了南海局部区域或个别季节的环流。曾庆存等设计了一个适用于近岸海区的数值计算模型^[1], 我们用这一个模型计算了南海冬季环流^[2], 同时也计算了南海全年各月的风生全流。由于篇幅所限, 本文不拟深入讨论南海环流的动力学问题, 只将此项计算得到的南海12个月的全流图和海面高度图中的一部分结果作一简要报道, 并附上文献[3]的研究结果以作对比(图2—5c), 以及作一些初步的机理探讨。

二、控制方程和计算区域

取局地 (x, y, t) 笛卡尔坐标系, x, y 轴分别指向东和北, 二维全流方程为:

$$\left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial \phi}{\partial x} + f v + k_1 \Delta u - k_2 u + \frac{\tau_x}{h}, \quad (1)$$

1988年10月6日收到, 11月12日收到修改稿。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial \phi}{\partial x} - fu + k_1 \Delta v - k_2 v + \frac{\tau_a^y}{h}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = k_3 \Delta h, \end{array} \right. \quad (3)$$

其中 u, v 为全流流速的两个分量, $\phi = g(h + h_s)$ 为自由面位势, h 为水层厚度, h_s 为海底地形高度, k_1 为侧向摩擦系数或即水平涡动粘性系数, k_2 为海底摩擦系数, k_3 为分子迁移系数; τ_a^x 和 τ_a^y 为海面风应力两分量, g 为重力加速度, $f = 2\omega \sin\theta$ 为科氏参数, 而

$$\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

为便于构造保持能量守恒性质的差分方程, 引入以下变数变换:

$$U = \sqrt{gh}u, \quad V = \sqrt{gh}v, \quad \Phi = \sqrt{gh} = \sqrt{\phi - gh_s},$$

于是方程 (1) - (3) 变为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(u \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial uU}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left(v \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial vU}{\partial y} \right) = - \Phi \frac{\partial \phi}{\partial x} + fV \\ \quad + k_1 \Phi \Delta \left(\frac{U}{\Phi} \right) - k_2 U + \Phi \frac{\tau_a^x}{h}, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(u \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial uV}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(v \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial vV}{\partial y} \right) = - \Phi \frac{\partial \phi}{\partial y} - fU \\ \quad + k_1 \Phi \Delta \left(\frac{V}{\Phi} \right) - k_2 V + \Phi \frac{\tau_a^y}{h}, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial U\Phi}{\partial x} + \frac{\partial V\Phi}{\partial y} = k_3 \Phi \Delta \Phi, \end{array} \right. \quad (6)$$

在计算中, 我们采用变量呈交错分布的 c - 网格系统, 因为 c - 网格系统对不规则的海洋边界的处理比较方便. 详细的差分格式可参见文献 [1], 在我们的这项计算中, 取网格 $\Delta x = \Delta y = 50 \text{ Km}$, $K_1 = 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$, $K_2 = 1.63 \times 10^{-6}/\text{s} + 0.5 \times 10^{-2}/h \text{ cm}/\text{s}$, $K_3 = 0$, $\Delta t_1 = 4 \text{ min}$ 为适应过程的积分时间步长, $\Delta t_2 = \Delta t_3 = 20 \text{ min}$ 为演变过程和耗散过程的积分时间步长.

我们的目的是计算各月的平均流——平衡态, 因此可以用任意的初值开始计算, 达到满足平衡要求时为止, 为简单计, 我们取初条件:

$$U = 0, \quad V = 0, \quad h = \bar{h}(x, y)$$

即无水深扰动. 至于侧边界条件, 则有许多尚需研究的问题, 主要是水域的开边界条件问题. 在本工作中, 我们取作:

a. 在海岸线上取固体边条件: 取法向速度为零.

b. 在水域边界上取开边条件: 在计算中给定流速 (但在某些对比计算中, 也取作固体边条件, 即法向速度为零——在文中会具体说明).

模式覆盖区域如图 1 所示, 大体介于 100°E — 121°E , 2°N — 24°N 之间, 这一区域包括了整个南海和泰国湾。从图 1 可以看到, 在模式分辨能力的范围内保持了真实海岸线的形状。由于模式空间分辨率的限制, 把琼州海峡忽略了。本计算海域的西边界和北边界(除台湾海峡一段以外)都是海岸线, 无疑可取作固体边界; 而东边界的大部分位于台湾、吕宋、巴拉望岛和加里曼丹一带的海岸线上, 自然也可取作固体边界(除吕宋岛北边巴士海峡为在水域上)。在水域上的边界有与爪哇海相连的南边界以及台湾海峡和巴士海峡: 在对年平均流的计算中, 我们也取为固体边界条件, 即相当于计算的海域有闭合边界; 但在可代表冬季和夏季的 1 月和 7 月份的海流计算中, 由于季风的影响, 我们就取开边界条件。南海里面的岛屿用 1 米到 5 米的浅滩代替, 且模式中最大无扰动水深取为 200 m。

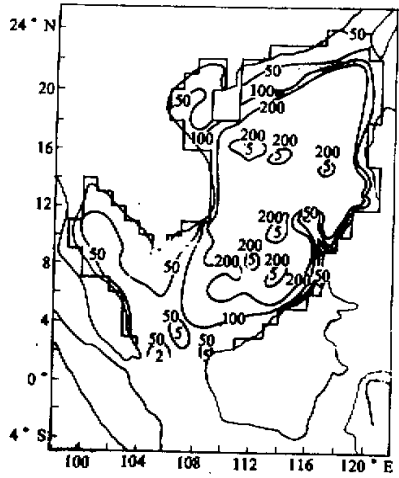


图1 模型水深和计算区域

三、风应力资料及其分析

风应力取自美国 S. HELLERMAN 和 M. ROSENSTEIN 提供的资料。他们使用了从 1870 到 1976 年 106 年里世界海洋上 3 千 5 百万个观测数据, 经过严格的数据质量控制计算得到了全球各月 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 网格的 τ_x^0 和 τ_y^0 , 是认为比较全和比较可靠的资料, 为了本工作计算的需要, 我们用线性插值法再将此项资料内插到本项计算的网格点上。经过检验, 我们发现它能较好地反映南海海面风场和风应力场演变的季节性特征, 与文献 [3] 所提供的 12 个月南海海面风矢量图也颇为一致, 与已有观测和经验无显著的矛盾, 看来是比较可靠的。

总的来说, 南海的海面风应力场大致可分为以下四种类型:

1. 冬季型 (11 月—翌年 3 月)

这段时间盛行东北风, 1 月份最为典型 (图 2a), 风向与南海的斜菱形长轴向大致平行; 北部和西部风力较强且风向稳定, 南部和东部风力较弱。一般地说, 11 月、12 月和 1 月风力最强, 2 月和 3 月风力逐渐减弱。

2. 冬夏过渡型 (4—5 月)

4 月和 5 月为南海的季风转换时期, 4 月东北风显著减弱, 在菱形长轴以西转为东风和东南风 (图 3a); 5 月 (图略) 西南气流向北推进, 只在 22°N 以北还残存着微弱的东北风。

3. 夏季型 (6—8 月)

6—8 月, 整个南海上空被西南或南风所控制, 7 月最为典型 (图 4a), 但风力弱于冬季盛行的东北风。

4. 夏冬过渡型 (9—10月)

9月西南风开始减弱并南退, 21°N 以北海上重新出现了东北风, 10月东北风继续加强并向南推进, 仅在 12°N 以南的东南角上仍有局部微弱的西南风, 如图 5a.

四、计算结果的分析

由于吕宋岛和巴拉望岛的阻隔使得南海环流与西太平洋中的赤道流系和西部边界流(黑潮)的联系并不密切, 不难想像, 半封闭的南海有自己独立的环流系统. 特别是, 南海海面上的季风比较强且稳定, 在季风的驱动下南海海流应具有明显的季风流的特征. 我们计算的结果确实如此, 例如海流和海面起伏等都明显地表征出季节性的变化. 虽然目前还没有足够的同步观测资料可以绘制出南海全年海流图, 不过, 我们的计算结果与根据现有资料作出的海洋观测研究结果相比较仍然是有意义的, 这二者的吻合是令人鼓舞的. 为了简单起见, 我们准备进行详细的逐月分析, 而仅和上面风应力的分析相对应, 着重分析在上述四种典型的风应力场作用下的海流.

1. 冬季海流 (1月)

图 2b, b' 和 b'' 是利用图 2a 的风场按本模式算得的一月份平均海流, 其中图 2b 用了固体边界条件, 图 2b' 则全部用了开边界条件, 而图 2b'' 是网格加密一倍 (即 $\Delta x = \Delta y = 25\text{Km}$) 的结果. 可见三者的海流形势几乎一样.

文献 [3] (图 2c), [4], [5], [18] 都表明: 在冬季, 整个南海被一个大的气旋式环流所占据, 其中南海北部和南部又各有一个中等尺度的闭合气旋式环流; 此外文献 [4], [5] 还提到, 在南北两个气旋之间存在一个小的反气旋环流. 我们的计算结果与上述吻合得相当好, 只是南沙群岛北部反气旋环流的尺度比文献 [4], [5] 给出的要小. 另外, 文献 [15] 计算得到的北部湾气旋式小环流, 文献 [4], [5] 给出的台湾南面反气旋式小环流, 以及文献 [7] 得到的海南岛以南西沙群岛以西海区存在的一个气旋式环流, 都在我们的计算中得到了反映. 特别是计算结果明显地表现出“南海暖流”的存在, 以及南海中部环流的复杂结构. 由于这二者的季节变化也是很值得研究的, 下面我们还要专门加以讨论.

2. 春—夏过渡季节 (4月) 的海流

观测表明这段时间里海面上的风场处于春—夏转换过程, 风向不稳定, 风力较弱, 且静风天气较常见. 如前所述, 我们所使用的风应力资料也反映了这一特点. 因此, 我们计算所得到的环流形势与冬季大不相同. 4月份 (图 3b), 虽然北部以 (18°N , 116.5°E) 为中心, 南部以 (6°N , 108.5°E) 为中心的两个气旋式环流仍然存在, 但是占据整个南海的大型气旋环流已不复存在. 在 10° — 12°N 一带, 有一支穿过南沙群岛北边向西流动的海流. 这支海流到达越南沿岸后分为两支: 一支窄而弱的向北流去, 流速约为 1cm/s ; 另一支宽而强的海流向南流动, 构成了南海南部的气旋式环流的西翼, 并且, 这支南向海流的

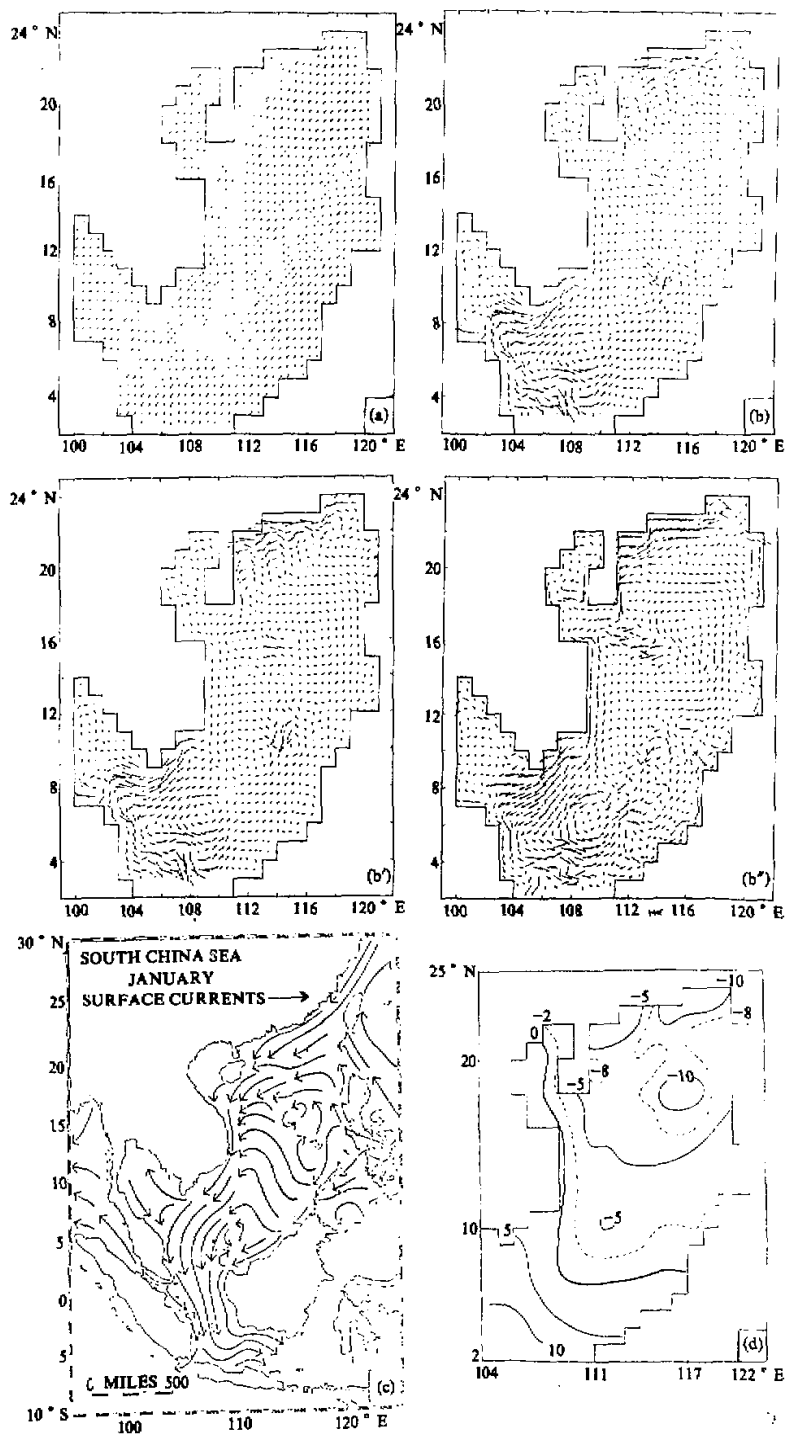


图 2a 一月份海面风应力

b 一月份计算平均流 (固体边界条件)

b' 一月份计算平均流 (开边界条件)

b'' 一月份计算平均流 (加密网格)

c 一月份表层海流 (摘自 Dale [3])

d 一月份计算海面起伏

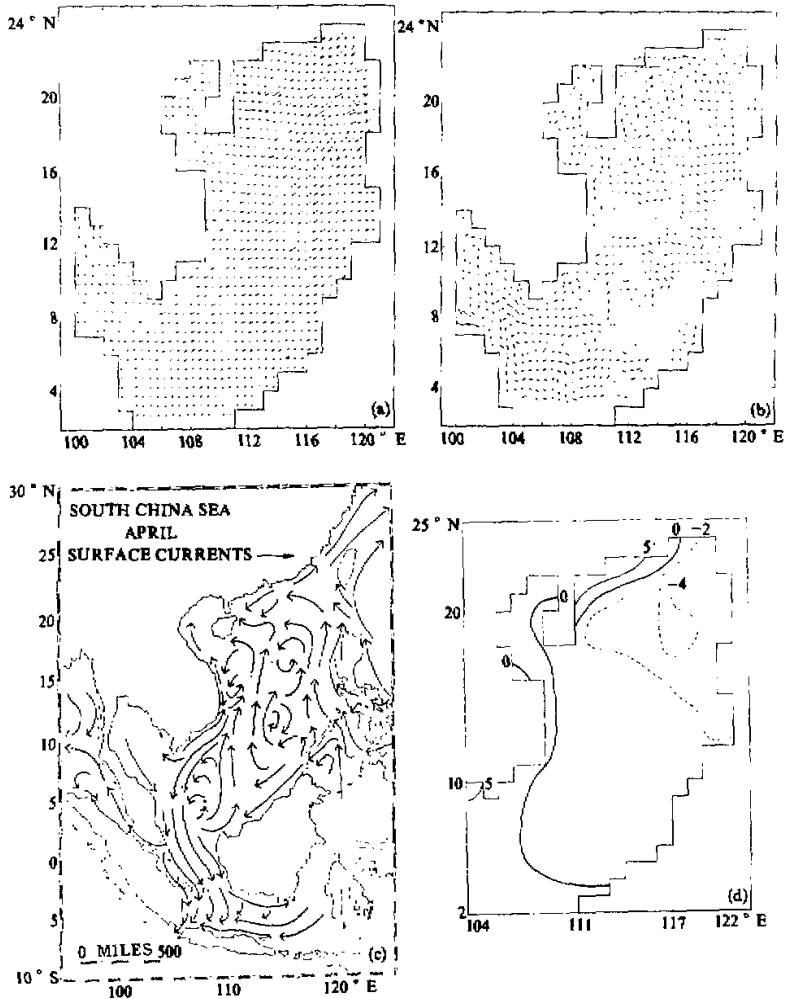


图3 a 四月份海面风应力 c 四月份表层海流(摘自Dale [3])
b 四月份计算平均流 d 四月份计算海面起伏

流速是沿程递增的,开始约为 5 cm/s ,在中南半岛南面金瓯角和奥比岛一带流速增加到 15 cm/s 。上述计算流的主要形势与文献 [3] 的结果颇相一致(图 3c)。

此外,还应指出,在文献 [26] 中,曾以 1986 年 4 月末至 5 月上旬的实测海流值与邻近的计算值进行比较,在曾母暗沙、八仙暗沙和立地暗沙的实测海流与我们的计算结果基本相符。

总的来说 4、5 月份南海流速普遍较小,大部份海区流速只有 $1\text{—}2\text{ cm/s}$,并出现大面积静流区。这与人们的实际经验相一致。渔民们都知道,每年的 4、5 月份,海上风平浪静,是捕鱼的黄金季节。

3. 夏季(7月)的海流

我们的计算结果(图4b)表明,7月份,在南海南部 12°N 以南,形成一个明显的反气旋式环流,这与许多文献报道的研究结果一致。在 12°N — 16°N 的越南沿岸海区,存在一气旋式涡旋,这在文献[3](图4c),[4],[5]和我们的计算结果中都显现得十分明显,这四者采用不同方法所得结果如此一致,看来并非偶然,而是共同地反映了这一海区夏季的环流特征。我们的计算结果表明,中南半岛南边海区有最大流速(达49厘米/秒),与[3]报道的形势一致。但是, 12°N 以北的广大海区的海流形势,我们的计算结果与文献[3],[4],[5]所得结果不尽相同,特别是我们的计算结果在这一海区是被一个较大的气旋式环流所控制,并且在这个较大的气旋式环流中,还有三个小的闭合气旋环流,其中,除上面提到的越南沿岸涡旋以外,其它两个小环流分别以($17^{\circ}\text{N}, 112^{\circ}\text{E}$)和($18^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}$)为中心。

文献[7]指出,在西南季风时期,南海中部海域的西部存在一个反气旋式环流,而海区中部和东部则被一气旋环流所盘踞。但是,文献[7]也指出,他给出的环流形式与国外一些学者的结果有明显不同之处。文献[3, 18, 23, 24, 25]报道的结果均是在西南季风作用下的表层海流,其总的形势是:南海中部海区的表层海水向东或向东北流动。在这个海区的中部和东部,我们的计算结果与文献[3, 18, 23, 24, 25]的结果十分一致。然而,在海域西部,如前所述,我们的结果却与文献[3, 4, 5]一样,存在一气旋环流而不是如文献[7]所报道的反气旋环流。看来,对南海中部海区的环流仍需要作进一步的研究。

4. 秋—冬过渡季节(10月)的海流

从我们的计算结果来看,9月份的海流形势(海流图略)与夏季类似,整个海上被两个较大的环流占据着,但强度较夏季显著减弱,而南部的反气旋式环流不仅强度减弱而且范围也缩小了。中南半岛南面海区最大流速亦减至约为33cm/s,我们的此项计算结果与文献[3]的海流形势也很一致。及至10月份(图5b),整个南海气旋式大环流重新出现,但北部海区中较小尺度的气旋式环流并未闭合。我们的10月份计算结果与文献[4]所得结果,在北部区域的海流形势一致,而在南部海区则不尽相同;与文献[3]的结果(图5c)相比较,除南沙群岛北边一小部份海区的海流不相同以外,在大部分海域上几乎完全一致。而与文献[18]相比较,整个海流形势更为一致。

五、海面起伏

图2—5d(单位:cm)是我们计算得到的南海四个月份的海面起伏(即计算所得水深减去平均水深——无扰动水深)。

在迄今我们能看到的研究南海海况的文献中,只有文献[3, 18]有一些关于整个南海海平面起伏分布的报道。在文献[3]中,对南海每个月海面起伏分布简要状况作了论述,并给出一些测站的水位观测资料。我们的结果与文献[3]的分析相当一致,这确实令人鼓舞。从图2d—图5d中可以看到,海面起伏也像海流和风一样,有着明显的季节变化。在冬季,由于强大东北风的驱动,整个南海海面呈现出南高北低的形势,暹罗湾的最高水位高出海平面22cm。

在4月季风转换时期,南海大面积区域的水位处于或低于海平面,这与人们的经验一致。夏

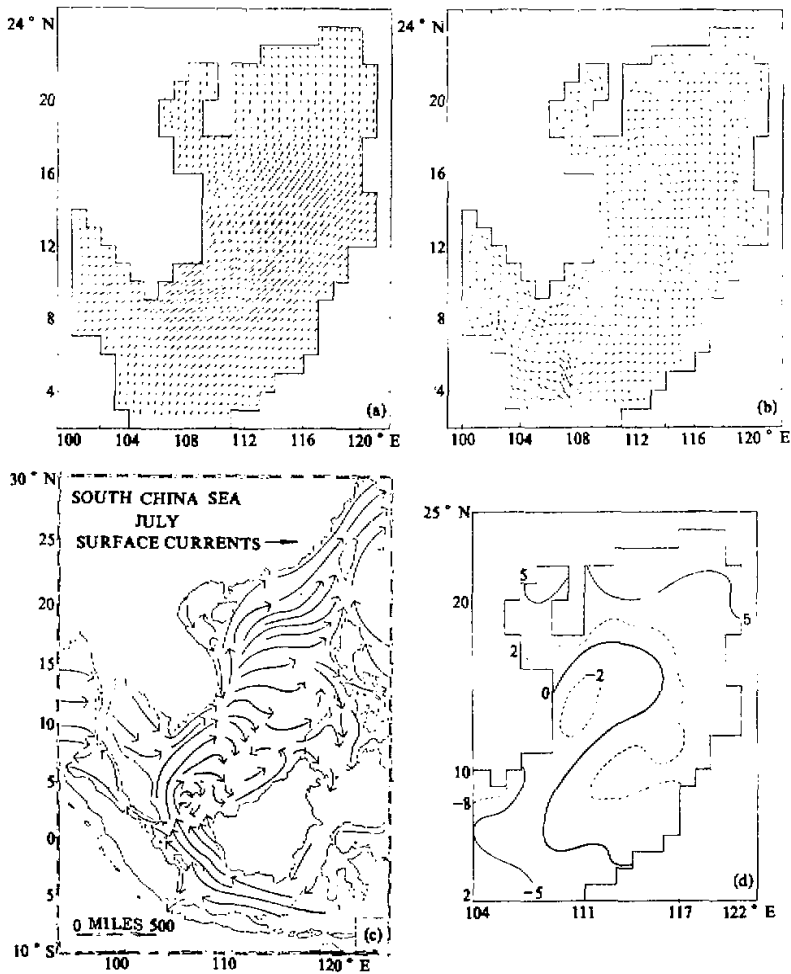


图4 a 七月份海面风应力 c 七月份表层海流 (摘自Dale[3])
b 七月份计算平均流 d 七月份计算海面起伏

季, 在西南风的驱动下, 南海的海面与冬季相反, 呈现北高南低状态, 7 月份广东沿岸水位高于海平面 8 cm, 10 月为过渡季节, 但海面起伏类似于冬季。

图 6 是我们对湄公河口北侧至西贡市南边海区一带计算得到的水位变化曲线, 与文献 [3] 中的图 13 给出的这一海域岸边测站的水位变化曲线趋势颇相一致 (图 6) (在那里, 高于平均海面的最大值都出现在 12 月份)。

六、冬季“南海暖流”

据报道, 在东北风盛行的冬季, 南海北部在顺风流动的沿岸流外面大致沿着 100 m 等

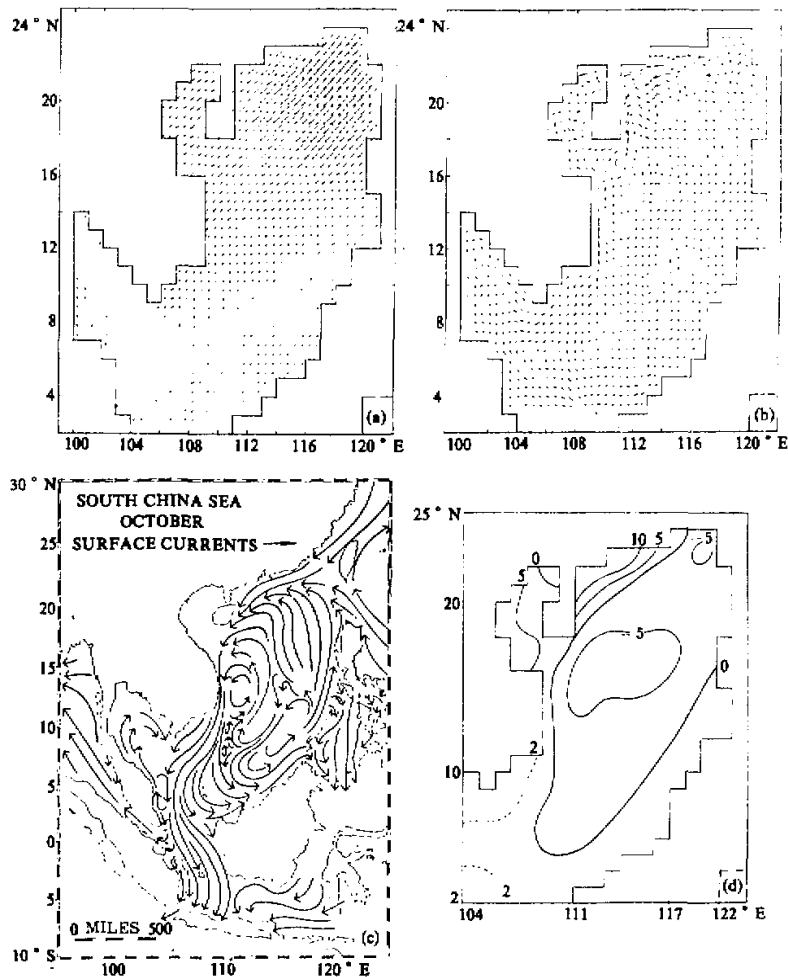


图5 a 十月份海面风应力 b 十月份计算平均流
c 十月份表层海流 (摘自Dale [31]) d 十月份计算海面起伏

深线的走向存在着一支逆风流动的海流,被称作“南海暖流”。这支海流是在1958—1960年间全国海洋综合调查中发现的,管秉贤首先并且多次对它进行过研究和论述^[10-13],在文献[4]的动力计算结果中,东沙群岛以北海区也显现出“南海暖流”。1982年2月18日—3月7日,中国科学院南海海洋所进行的“南海暖流动力学实验”现场观测结果又进一步证实“南海暖流”的存在。在数值模拟研究方面,曾庆存等^[2]首次在数值模拟中得到了“南海暖流”,但其中仅给出1月份的计算结果;而在本文的计算结果中除七月份以外,其它月份在 116°E 以东都明显地存在一支向北的海流(图2b, b', b'', 3b, 5b)。图2b''是把空间网格加密一倍计算所得的一月份平均流,可以看到“南海暖流”显现得更为明显。

关于“南海暖流”的成因至今仍未得到确切的结论,管秉贤^[11]曾提到在南海 116°E

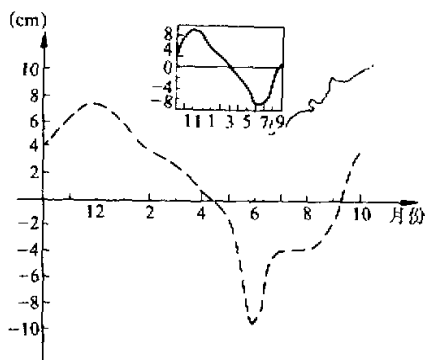


图6 渤海河北侧海域计算海面起伏随季节变化上面小图
为该处的观测值(摘自 Dale [3]).

以东的东北向流与台湾海峡中冬季也可能存在着逆风流动的东北向流有着密切的关系。然而，值得注意的是，在我们的计算结果中图 2b 是把台湾海峡作为闭边界来处理的，而图 2b'则是把台湾海峡作为开边界入口，即给定了向西南方向的流动，在这两种显著不同的情况下， 116°E 以东向东北的流动都非常明显。因此，从我们的计算结果看，冬季台湾海峡可能存在的东北向流并不是“南海暖流”所以形成的主要因子，所以对“南海暖流”的形成机制仍需要做更深入的研究。

七、关于南海中部地区的环流

仇德忠^[7]利用南海海洋研究所“实验 3 号”于 1977 年 11 月 7—12 日在南海中部海区 (12°N — 15°N , 110°E — 118°E) 作的海洋综合考察中所得的观测资料，对南海中部海区东北季风时期的海流状况作了分析，给出了以动力高度分布图表示的该海域的密度环流模式，并确认在调查海区的西部存在着一个气旋式局部环流。文献 [3, 18, 23, 24] 也都曾指出这一气旋式局地环流的存在，其中文献 [7] 还指出，由于调查区域的限制，此项由观测资料分析得到的结果还不能反映出这个气旋式环流的全貌，他推测，这支环流的范围向西将达到越南沿岸，其南界可能延至 10°N 附近，北界接近西沙群岛。在我们的计算结果中不仅能看到这一海区这个局部气旋环流的存在，而且还可以看到这个环流的范围、强度和中心位置等都随季节而演变：1 月这个局部环流中心偏北 (15.8°N , 112°E)，范围较小，强度较大，海南岛以南最大流速为 25cm/s ；4 月份，这一海区流速很小或为零，环流形势不明显，及至 7 月西南季风时期，这一气旋中心偏南 (14°N , 110.5°E)，范围偏大而强度较小，越南沿海最大流速为 9cm/s ，到 10 月份这个气旋环流范围更大。由此可见，利用数值计算的方法来研究海流随时间变化的问题有诸多的方便 (参看图 2b—图 5b)。

八、结果和讨论

(1) 我们所用的全流模式忽略了热盐效应和密度的变化，但考虑了风场效应，同时较

好地考虑了地形效应、 β 效应、非线性效应和岸边形状等因素, 将计算结果与现有的实测资料分析结果比较表明, 计算结果在很大程度上反映了南海环流的实况。至于在某些月份迄今未见报道, 而在我们的计算中出现的一些局部海区的海流和旋涡, 当有待在今后的观测和进一步的研究中予以检验。

(2) 本文不拟对南海环流的动力机制进行专题讨论, 这里试图作一梗概说明: 南海虽是一个宽阔的深海海盆, 但四面受海岸环绕, 只有东北和西南有不大的进出口与大洋相通, 其环流具有相对的独立性, 又地处热带, 斜温性并不大, 在比较封闭的环境中深层盐热分布相对稳定, 因此环流应主要由风应力所驱动, 而受海岸线、海底地形等边界动力条件约束, 以及 β 效应和平流项等惯性因子的作用, 这就使得其平均流在很大程度上反映了表层流的特征, 总的流动趋势主要受风的影响; 而一些中小尺度的局地环流和涡旋的形成和维持则可以认为是由风、海底地形、海岸线形状、惯性效应等因素共同作用的结果。所以我们的模式能给出较好的结果。

(3) 我们的计算结果表明, 西部海流的流速都明显高于东部, 此外从海面起伏的计算结果也可看到, 西部水位等值线都比东部密, 也正说明了 β 效应引起的西岸海流的强化。

(4) 冬季的计算流与以往的研究和观测都吻合得比较好, 而夏季计算流与以往研究结果却有些差异, 特别是在 18°N 以北海区, 按文献[3—5]的报道, 均是往北流, 而我们的计算结果则是起初向北流, 到 20°N 则转而向西南流动。看来, 这也许是由于夏季北部海上的风力较弱, 因之海流也较弱, 计算和观测两者都可能有一定的不确定性。此外, 也可能是热盐效应相对比冬季明显; 或者可能与我们在夏季海流的计算中把台湾海峡和巴士海峡作为封闭边界处理有一定关系(不过, 即使使用了开边界, 改变也很小, 不知是否与所取的进出流量不够大有关, 见下)。

(5) 对于冬夏两季典型月份(1月和7月)的海流, 我们也做了开口计算, 即对于1月份, 把台湾海峡和巴士海峡作为入口, 南面的卡里马塔海峡作为出口, 让南海的海水向南流出爪哇海, 流入量等于流出量; 7月份的情况则与之相反, 以南边界为入口, 台湾海峡和巴士海峡则为出口。比较图2b和图2b'可以看到, 对于1月份来说, 按这种截然不同的边界处理方式计算得到的海流图象除开口附近以外两者的海流形势几乎完全相同。7月份的计算结果也是如此(7月份开口边界处理的计算海流图从略)。这也可能是因为我们给定的开口流量太小, 不足以对海流的总形势产生影响的缘故。看来, 在将来的改进计算中, 要扩大计算区域, 让海峡能自动进行水交换, 以便验证本计算结果的可靠程度。

(6) 从我们的数值模拟结果以及上面的讨论出发, 我们初步认为南海暖流(尤其是冬季时的逆风向那支海流)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)而造成的环流(补偿流)作用。也许吕宋岛东南的西太平洋暖流流入南海的小分支也有不小的贡献, 但似乎不是主要的, 否则无法解释南海海流在冬季为一大气旋环流, 而在夏季为一大反气旋环流。文献[3]虽然没有强调南海暖流, 但也指出4、5月份台湾海峡中向北流动的海流与其上的风向相反, 并推测这可能与黑潮的一个分支侵入南海有关, 其图3c事实上反映了南海暖流的存在。不过, 这种画法是否可靠? 是基于观测资料还是凭想象? 是令人怀疑的。也许, 当作进一步的机理性研究和扩大海域的计算, 可以得到较确切的结论。

致谢: 孙燕斌同志帮助上机计算, 王婉文同志帮助绘图, 在此表示感谢。

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、季仲贞、李荣凤、柯佩辉, 1985, 南海海流数值模拟 (I) 冬季典型月平均流, 南海石油开发环境国际研讨会论文集, 1—14.
- [3] Dale, W. L., 1956, Wind and drift Currents in the South China Sea. *The Malayan Journal of Tropical Geography*, Vol. 8, 1—31.
- [4] 徐锡桢、邱章、陈惠昌, 1980, 南海水平环流概述, 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议论文集, 137—145.
- [5] 王佳, 1985, 南中国海定常环流的一种模型, 山东海洋学院学报, 第15卷, 第3期, 22—31.
- [6] 陈史坚, 1985, 浩瀚的南海, 科学出版社.
- [7] 仇德忠, 1982, 南海中部海区的密度环流, 南海海区调查研究报告 (一), 科学出版社, 129—139.
- [8] 钟欢良, 1979, 中、西沙群岛北部海区环流的初步探讨, 海洋科技资料, 第7期, 1—23.
- [9] 日本海洋资料, 1978, 海洋环境外篇——西北太平洋, 54—65.
- [10] 管秉贤, 1978, 南海暖流——广东外海一支冬季逆风流动的海流, 海洋与湖沼, 第9卷, 第2期, 117—127.
- [11] 管秉贤, 1978, 南海暖流的新证据, 海洋科学增刊, 100—103.
- [12] 管秉贤, 1981, 南海北部冬季水温垂直结构的重要特征, 海洋与湖沼, 第12卷, 第4期, 311—320.
- [13] 管秉贤, 1985, 南海北部冬季逆风海流的一些时空分布特征, 海洋与湖沼, 第16卷, 第6期, 429—438.
- [14] 郭忠信、杨天鸿、仇德忠, 1985, 冬季南海暖流及其右侧的西南向海流, 热带海洋, 第4卷, 第1期, 1—8.
- [15] 郭忠信、王文质, 1983, 北部湾风生环流的数值研究, 热带海洋, 第2卷, 第3期, 1—9.
- [16] Hydrographic Department, Admiralty, 1945, The Surface Currents of the South China Sea, Java, Celebes and Sulu Seas. H. D., 409; Plate 1—12.
- [17] Hydrographic Office United States Navy under the Authority of the Secretary of the Navy, 1945, Currents in the South China, Java, Celebes and Sulu Seas. H. O., PUB., 236; Plate 1—12.
- [18] Wyrtki K., 1961, Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters Scientific Result of Marine Investigation of the South China Sea and Gulf of Thailand, 1959—1961, NAGA Report. 2.
- [19] LaFond E. C., 1966, South China Sea, Encyclopedia of Oceanography, Reinhold pub. corp. P 829—836.
- [20] Vdam, and Nakav T., 1974, Water Masses and Currents in the Seasonal Changes, changes, 1. "the Kureshio III", Proc. IIIrd, CSK Symp., Bangkok, Thailand, 1972, P. 161—188.
- [21] Kwan Ming-chan, 1970, The Seasonal Variation of Hydrological Properties in the Northern South China Sea.
- [22] 钟欢良, 1981, 黑潮水团在南海北部影响的探讨, 海洋科技资料, 第2期.
- [23] 海上保安庁水路部, 1976, スマトラ島水路図, 海上保安庁.
- [24] Royal Netherlands Meteorological Institute, 1935, Meteorological and Oceanographic Observation in the China Sea and the Western Part of North Pacific Ocean, 115.
- [25] Department of the Navy Hydrographic Office, 1963, Atlas of Surface Northwestern Pacific Ocean.
- [26] 柯佩辉、李荣凤、季仲贞、曾庆存, 南海海流数值模拟 (II) 南沙群岛海域春季典型月平均流 (待发表).
- [27] Zeng Qing-cun, 1983, Some Numerical Ocean-atmosphere Coupling models. International Symposium on the Integrated Global Ocean Monitoring, Tallinn USSR, October 2—10.
- [28] 奚盘根、张淑珍、冯士筭, 1980, 东中国海环流的一种模型 I. 冬季环流的数值模拟, 山东海洋学院学报, 10 卷, 3 期.
- [29] 袁跃丽、苏纪兰、赵金三, 1982, 东中国海陆架环流的单层模式, 海洋学报, 4 卷, 1 期, 1—11.
- [30] 王卫、苏纪兰, 1987, 黄、东海黑潮流系和涡旋现象的一个正压模式, 海洋学报, 第9卷, 第3期, 271—285.
- [31] 张淑珍、奚盘根、冯士筭, 1984, 渤海环流数值模拟, 山东海洋学院学报, 14 卷, 2 期, 12—19.
- [32] 奚振兴、张存智、张砚峰, 1986, 渤海风海流的数值计算, 海洋学报, 8 卷, 5 期, 527—533.