

南海环流的一个约化模式

刘先炳 苏纪兰

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

提要 利用约化数值模式研究了黑潮在巴士海峡的流况及受其影响的南海海盆区的环流, 结果为: 定常的黑潮入流在巴士海峡不易出现显著的环状流动结构, 但在海峡西侧诱生一气旋涡, 该涡旋达到一定强度时, β 因子和侧边界作用使其向西南移动, 因此, 模式给出的南海环流呈准半年周期的气旋涡现象。动力分析表明, 气旋涡因非线性平流作用将黑潮西侧的气旋性切变涡度向南海北部输送所致。模式同时计算了入流方向和流轴位置呈周期性变化时, 巴士海峡和南海的流动结构。

关键词 南海 黑潮 南海环流 约化模式 气旋涡

近年来, 南海环流的研究逐渐受到重视, 但对南海陆坡外侧环流的了解仍不足, 尤其是黑潮对南海环流的影响及其在巴士海峡的流态。现有的观察资料表明, 南海陆坡外有一支西南向流, 且其强度多变^[1,2]。仇德忠等认为, 它可能是黑潮在南海的分支^[1,2]; 而苏纪兰等的正压模式计算结果表明, 这支海流应看作是黑潮诱生的南海气旋性环流的西侧强化部分, 黑潮并无显著的分支进入南海^[3]。由于南海和黑潮区有较强的斜压性, 正压模式不能反映若干动力特征, 因此, 我们认为这支西南向流的成因及特征尚值得进一步研究。

黄企洲根据历史资料分析指出, 巴士海峡的流向较不规则, 因此难以确定黑潮过海峡时是否可能出现环状流动结构^[3]。但在该文的纬向断面流速分布中, 黑潮流轴的位置似乎在 121°E 以东。

Hurlburt 和 Thompson 利用二层模式和约化重力模式研究湾流在墨西哥湾内的流动结构。他们的结果表明, 约化重力模式能从本质上反映湾流在墨西哥湾内的动力过程^[4]。由于黑潮流轴在南海的位置类似于湾流与墨西哥湾, 因此, 本文作者利用约化重力模式对黑潮引起的南海环流结构作了数值研究, 着重分析菲律宾以东的黑潮入流为定态时的环流结构。

一、数值模式

假设下层无限水深的二层海洋, 其上层海水运动的约化动力方程为:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla + \nabla \cdot \vec{v}) \cdot \vec{v} - f\vec{k} \times \vec{v} = -g'h \cdot \nabla h + A_h \cdot \nabla^2 \vec{v} + \frac{\vec{v}_r - \vec{v}_i}{\rho_0} \quad (1.1a)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1.1b)$$

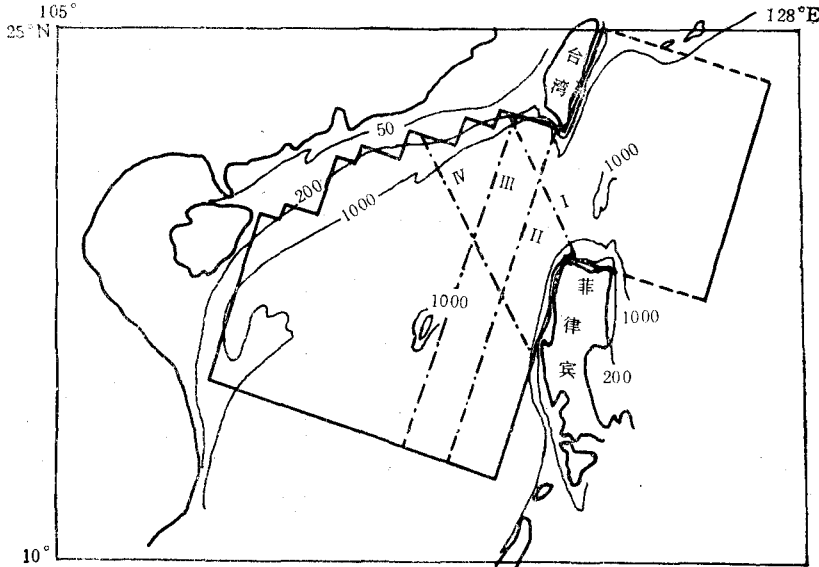


图 1 模式计算区域

Fig. 1 Model domain of South China Sea

实曲线为等深线(单位 m);虚线为开边界位置;点划线为文中所引断面 I—IV 的位置。

式中, $g' = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \cdot g$ 为约化重力加速度; ρ_0 为参考密度, $\Delta\rho$ 为上、下层密度差; h 为上层厚度; \vec{v} 为全流速度; \bar{v} 为垂直平均速度, $\vec{v} = \bar{v} \cdot h$; A_h 为涡动粘性系数; $\vec{\tau}_i$ 和 $\vec{\tau}_s$ 分别为风应力和交界面摩擦应力;其它符号为通常约定。本文利用 Hurlburt 和 Thompson 对上述方程建立的半隐差分格式^[6]进行数值计算。

表 1 模式运行实验参数

Tab. 1 A list of model-run experiments

E1	实验参数见正文
E2	$A_h = 10^3 \text{m}^2/\text{s}$
E3	令方程(1)中的非线性项为零(线性实验)
E4	南海为一方形区域,且西边界向西扩展 200km
E5	模式区域的东边界东移 200km
E6	巴士海峡的南北宽度缩小为 200km
E7	$X_c = 160 \text{km}$
E8	入流给定流速分布
E9	$\theta = 60^\circ$
E10	$\theta = 60^\circ, Q = 15.57 \times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$
E11	$Q = 30 \times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$
E12—16	$\theta = 45^\circ + 25^\circ \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T}$, T 变动周期分别为 10d, 20d, 60d, 90d 和 360d, 初始场为 E1 计算结果
E17	$\theta = 45^\circ + 15^\circ \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T}$, $T = 60\text{d}$, 初始场为 E1 结果
E18	$X_c = 80 + 40\sin(2\pi \cdot t/T)$, $T = 60\text{d}$, 初始场为 E1 结果

注: E12—18 为非定态入流。

模式的计算区域见图 1, 东边界用固壁近似, 菲律宾以东开边界为黑潮入口。入流给定全流速度或流速分布, 台湾以东的北边界为黑潮出口, 控制其净出流量和入流流量相等, 流速分布由模式给出。计算的空间步长为 40km, 时间步长为 2.5h。本文不考虑风生流, 即 $\vec{\tau}_i = 0$, 为减少边界扰动对计算的影响, 出口处使用了海绵边界条件, 即 $\vec{\tau}_i = r|\vec{v}| \cdot \vec{v}$, 其中摩擦系数 r 自出口处的 2.5×10^{-3} 在 160km 内指数减小至 0, 模式的其它区域取 $\vec{\tau}_i = 0$ 。为分析定态入流时的环流结构, 在标准实验 E1 中, 取 $A_h = 500\text{m}^2/\text{s}$, $g' = 3.0 \times 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}^2$ 。 $f = f_0 + \beta \cdot y$, f_0 参考科氏参数为 $0.365 \times 10^{-4}/\text{s}$, β 科氏参数变化率为 $2 \times 10/(\text{sm})$, 上层水的初始厚度 $H_0 = 250\text{m}$, 入流核心离菲律宾东岸的距离 $X_c = 80\text{km}$, 入流宽度 $X_w = 160\text{km}$, 入流方向与 y 方向的夹角 $\theta = 45^\circ$ 且偏西为正。入流量 $Q = 22 \times 10^6\text{m}^3/\text{s}$ 给定全流速度分布。模式运行的其它实验见表 1。各实验除表中给出的对应条件外, 其它的实验参数和标准实验 E1 相同。

二、数值结果及讨论

1. 定态入流情形

(1) 环流结构 大多数定态入流计算得到的南海环流具有准半年周期的涡旋现象(图 2)。气旋涡形成于巴士海峡西侧, 达到一定强度时, 沿西边界向西南移动, 涡旋呈椭圆形, 其长轴和边界大致平行; 随着原涡南移, 巴士海峡的西侧形成新的气旋涡, 在南海中部则诱生一弱的反气旋涡, 并西移插于两气旋涡之间, 涡旋最终在南海西南耗散。整个过程的周期约 167 天。气旋涡平均移速约 1.33km/d, 在南海北部的西边界邻近, 始终有西南向流存在(图 3), 构成气旋北侧的海流。

巴士海峡黑潮无显著的环状流动, 其主轴位于 121°E 以东, 巴士海峡的流速分布较不规则(图 3)。西南向流的流量为 $4.5-7.0 \times 10^6\text{m}^3/\text{s}$, 该值同动力计算所得的南海陆坡外西南向流的流量值相当^[4,2]。迄今, 南海西南向流外侧的观察资料尚不足以分析该海域的流动结构, 因此, 模式给出的涡旋现象有待证实, 但从漂流瓶观察的结果看, 南海确有存在气旋涡的可能^[2]。

我们利用模式计算了过断面 I—IV 的流量时间序列(图略), 在这些序列中, 除存在与气旋涡南移有关的 167 天周期, 还有一周期约 17 天的显著振荡, 其幅度达 $1.5 \times 10^6\text{m}^3/\text{s}$ 。对序列作谱分析表明, 该振荡沿西边界向南以 3.2m/s 的相速传播。由模式参数可得内 Kelvin 波相速 $C_0 = \sqrt{g'H}$ 约为 2.6 m/s, 内 Kelvin 波沿南海传播一周需时约 15 天, 因此, 上述振荡可能因 Kelvin 波激发所致。由于模式所限, 本文无法探讨其激发原因, 但一个可能的机制是局地切变不稳定, 尤其是在台湾东南的角点附近, 流动具有较大的横向切变。根据 Philander 的研究, 切变的不稳定周期范围通常在 10—30 天, 其具体量值取决于平均流的结构和位置^[7]。本文研究的振荡周期在该范围之内。

(2) 气旋涡的动力分析 引入全流涡量函数 $\zeta = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}$, 由控制方程 (1) 可得:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial(Uv)}{\partial x} - \frac{\partial(Uu)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial(Vv)}{\partial x} - \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right)$$

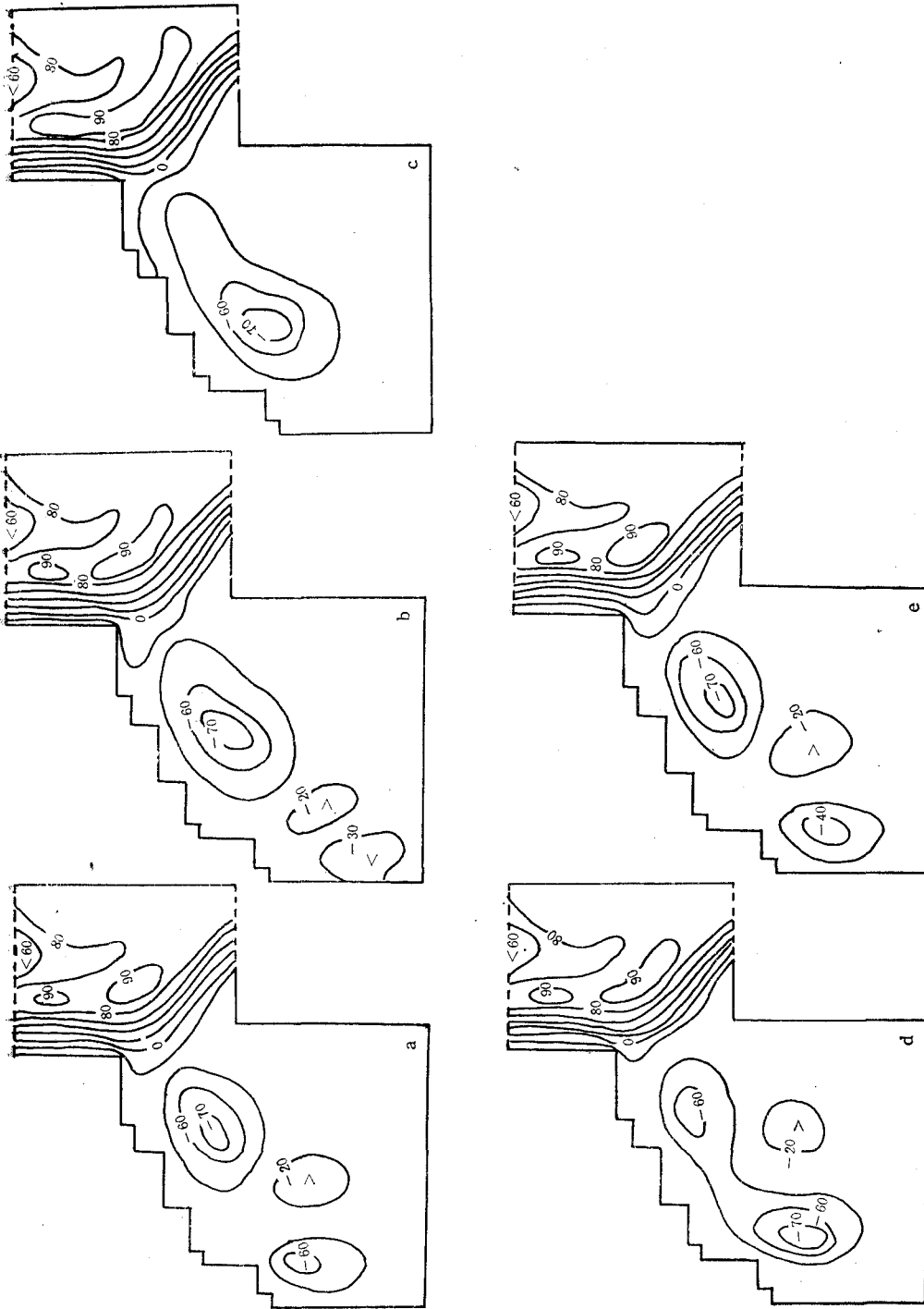


图 2 E1 的厚度距平(单位, m)

Fig. 2 Thickness anomalies (in meters) for E1

等值线间隔 20m; 积分时间为: a. 920d; b. 960d; c. 1000d; d. 1040d; e. 1080d.

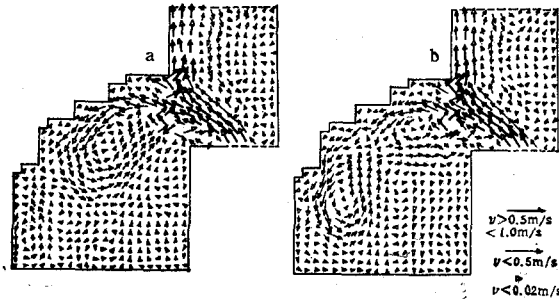


图3 E1 的流速分布

Fig. 3 Velocity distribution for E1

积分时间分别为 960d(a) 1040d(b)。

$$+ \frac{\partial}{\partial x} (fU) + \frac{\partial}{\partial y} (fV) = A_h \nabla^2 \zeta \quad (2.1)$$

根据计算得到的流场特征(图3),我们取断面 II 作为南海和黑潮区的交界,在南海区域,对方程(2)求面积分,并应用二区域的高斯定理后有:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Omega} \zeta dx dy + \oint_{l_s} (\overline{NL}) \cdot \vec{n} dl + \oint_{l_s} f \vec{V} \cdot \vec{n} dl = A_h \cdot \oint_{l_s} \nabla \zeta \cdot \vec{n} dl \quad (2.2)$$

其中

$$(\overline{NL}) = \left(\frac{\partial}{\partial x} (Uv) - \frac{\partial}{\partial y} (Uu), \frac{\partial}{\partial x} (Vv) - \frac{\partial}{\partial y} (Vu) \right),$$

为非线性平流项;积分环线 $l_s = l_w + l_{II}$; l_w 为环绕南海的固边界; l_{II} 为断面 II; \vec{n} 是 l_s 的外法向。因固壁处有 $\vec{V} = 0$,则由(2.2)式可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Omega} \zeta dx dy - A_h \cdot \int_{l_w} \nabla \zeta \cdot \vec{n} dl \\ = \underbrace{- \int_{l_{II}} (\overline{NL}) \cdot \vec{n} dl}_{\text{TERM A}} - \underbrace{\int_{l_{II}} f \vec{V} \cdot \vec{n} dl}_{\text{TERM B}} + \underbrace{A_h \cdot \int_{l_{II}} \nabla \zeta \cdot \vec{n} dl}_{\text{TERM C}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

式(2.3)表明,南海区总涡量的变化和固壁上耗散的涡量值,有三个不同的来源:其一为在断面 II 处与黑潮区的非线性平流交换 (TERM A),其二为通过断面 II 的行星涡度净输送 (TERM B),其三则为同黑潮区的侧向涡动粘性交换 (TERM C)。

在实验 E1 中,我们计算了上述三项的时间序列,结果表明,TERM A 较其它两项大一个量级(图4)。这一结果证明,南海气旋涡的生成是非线性平流将海水自黑潮西侧气旋性切变区获得的气旋涡度向南海北部输送所致。为进一步证实这一结论,我们在实验 E3 中,将非线性忽略,此时在计算结果中不再有南海气旋生成,可见非线性平流在南海气旋涡形态过程中确起主要作用。

一定强度的海洋涡旋,受 β 动力作用^[4] 和涡旋本身与侧边界或底形相互作用^[5] 而移动。我们应用 Flierl 对 β 因子的理论分析结果^[4] 和类似于 Smith 所用的数值方法^[6],分析了南海气旋涡形成后的移动原因,并进一步假定不同的南海区域进行了数值实验(E4)。通过实验结果比较和分析,得如下结果,南海气旋涡的椭圆状结构和其西南向的移动是因 β 因子及西边界对涡旋限制诱生的非线性平流共同作用所致。正是由于气旋涡

的南移,导致了模式给出的南海环流呈准半年周期现象。

(3) 模式参数对环流影响 总结模式在不同定态入流条件(表 1)下的运算结果,

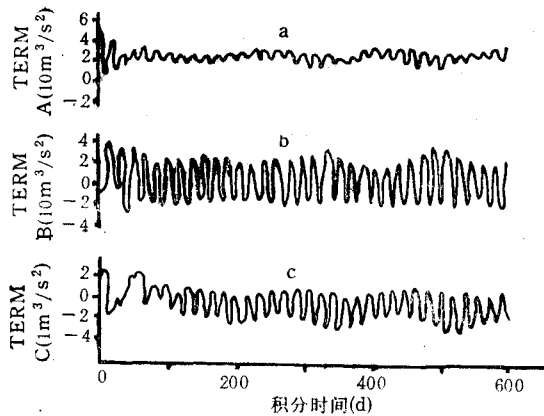


图 4 实验 E1 涡量方程(2.3)中 TERM A (a), TERM B (b) 和 TERM C (c) 各项的时间变化曲线

Fig. 4 Time series of TERM A(a), TERM B (b), and TERM C (c) in vorticity equation (2.3) for E1
各项的平均值分别为 24.45, 3.0, -0.62m³/s²。

有如下几点: ①当巴士海峡宽度比实际窄时 (E6), 南海气旋涡强度减弱, 环流周期相应变短。②入流流轴位置 (E7)和入流确定流速分布 (E8)对环流结构无显著影响;相对而言,入流方向对巴士海峡的流动影响略大。当入流方向偏西时(E9), 黑潮西侧有小股流动呈环状结构, 但主轴仍位于海峡以东;若入流方向偏西,又保持全流速度量值不变, 相应入流流量减小 (E10), 此时, 巴士海峡有显著的环状流动, 在其西南仍产生类似 E1 的涡旋现象, 但周期稍长, 南海东部的反气旋涡亦略强, 并有从菲律宾西北角的环状流动中获得水体的趋势。③入流流量

增加时 (E11), 环流和 E1 的结果无显著差别, 只是南海气旋涡略强。

黑潮在巴士海峡难以形成显著的环状流动的原因如下, 若黑潮经巴士海峡进入南海, 那么, 巴士海峡将既是黑潮的入口又是其出口, 因此, 入口和出口之间的距离不大于海峡宽度。Hurlburt 和 Thompson 曾指出, 假定把湾流在墨西哥湾的入口和出口之间距离减小到一定程度, 则湾流在墨西哥湾内也将不会有环状流动⁶⁾。此外, 在墨西哥湾除 β 因子有利于环状流形成外, 入流惯性也有利于湾流向湾内入侵, 而对黑潮和南海则不然, 入流和出流方向受菲律宾东岸和台湾东岸限制, 其相互间的夹角远比墨西哥湾内的湾流入、出流夹角小, 北向流动惯性不利于黑潮水向南海入侵, 从而较难形成环状流结构。

2. 周期性变异的人流情形

因模式无法确定台湾以东黑潮出口对菲律宾以东黑潮入口流量变化的响应时间, 为维持水量平衡, 模式难以合理地反映入流流量周期性变异时对南海环流的影响, 所以, 我们只对维持入流流量定常, 而入流流向或流轴位置呈周期性变化时进行了数值计算(E12—E18)。综观计算结果, 短周期变化时, 除入口附近流动有相应变异外, 南海环流和黑潮本身结构变化并不显著, 但对较长周期变异的入流, 巴士海峡和南海北部的流动作相应周期的调整, 此时黑潮在巴士海峡可出现阶段性的环状结构, 但其主轴仍位于巴士海峡以东, 小部分入侵到南海的水体也可与主轴分离, 在台湾南侧形成小的反气旋涡。只有当入流变化周期足够大时, 入流变异才可能影响到整个南海海区的环流变化。

三、结 语

1. 定态入流时, 巴士海峡无显著的环状流动结构, 南海海盆区的环流具有准半年周期的气旋涡形成和南移现象。气旋涡的形成系黑潮西侧的气旋性切变通过非线性平流向南

海北部输送积累所致。当涡旋达到一定强度时, β 因子和侧边界作用促使其向西南移动, 从而使南海环流呈准半年周期的变化。

2. 在南海北部海区, 始终有一支西南向的海流, 其位置相当于正压模式中陆坡外的西南向流^[9], 该海流构成气旋涡的北侧, 流量与以往的动力计算结果相当, 它源自巴士海峡中部的黑潮西侧, 是气旋涡循环水体在巴士海峡南部进入黑潮西侧后的再分离, 可以预计, 该海流的水体性质将类似黑潮水。

3. 约化模式不能体现斜压不稳定现象, 因此, 黑潮在巴士海峡是否存在斜压不稳定仍值得研究。本文作者只考虑了黑潮对南海海盆区环流的影响, 而对风生环流未加研究。由于南海的水平尺度大到足以建自身的水平环流, 风应力旋度也可驱生南海气旋涡现象^[10], 但 Gill 曾指出, 就斜压模而言, 由于起动时间过长, 环流对年周期变化的大尺度风场响应以局地 Ekman 抽吸平衡为主^[5], 因此本文研究的气旋涡现象在动力上受风应力旋度的影响较小。但若黑潮水受风应力作用而入侵南海, 此时, 入侵的黑潮水对涡旋的动力影响有待今后进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 仇德忠等, 1984, 夏季南海北部一支西南向流动的海流, *热带海洋*, 3(4): 65—72。
- [2] 郭忠信等, 1985, 冬季南海暖流及其右侧的西南向海流, *热带海洋*, 4(3): 1—8。
- [3] 黄企洲, 1983, 巴士海峡黑潮流速和流量变化, *热带海洋*, 2(1): 35—41。
- [4] Flierl, G. R., 1977, The application of linear quasi-geostrophic dynamics of Gulf Stream Rings, *J. Phys. Oceanogr.*, 7(3): 365—379。
- [5] Gill, A. E., 1982, *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York, pp. 493—543。
- [6] Hurlburt, H. E. and Thompson, J. D., 1980, A numerical study of loop current intrusion and eddy shedding, *J. Phys. Oceanogr.*, 10(10): 1611—1615。
- [7] Philander, S. G. H., 1976, Instability of zonal equatorial currents, *J. Geophys. Res.*, 81(21): 3725—3735。
- [8] Smith, D. C. I., 1986, A numerical study of loop current eddy interaction with topography in western Gulf of Mexico, *J. Phys. Oceanogr.*, 16(7): 1260—1272。
- [9] Su, Jilan and Wang Wei, 1987, On the sources of the Taiwan Warm Current formation from the South China Sea, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 5(4): 299—308。
- [10] Wytki, K., 1961, NAGA Report—Physical Oceanography of the Southern China Water, Neyensch Printer, San Diego, Ca, pp. 117—153。

A REDUCED GRAVITY MODEL OF THE CIRCULATION IN THE SOUTH CHINA SEA

Liu Xianbing and Su Jilan

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012)

A reduced gravity numerical model is adopted to study the circulation in the South China Sea and in Bashi Strait. Numerical experiments and the dynamical analyses show that (1) for the steady state inflow condition there is an insignificant loop current in the Bashi Strait like that in the Gulf of Mexico. This is probably due to the narrow outport and inport distance and the unfavourable northward inertia. A cyclonic eddy is induced periodically by Kuroshio across the strait in the northern part of SCS. As the eddy becomes strengthened, it moves southwestward along the west boundary and finally dissipated in the southwest corner of the model domain. Thus the current system in SCS has a quasi-semi-annual period. The cyclonic eddies are formed by the advection of the positive vorticity west of the main stream of the Kuroshio, while the southwestward movement of these eddies is induced by both the β factor and the interaction between the eddies and lateral boundary. (2) A persistent southwestward current exists adjacent to the northwestern boundary of the model domain. Its position is consistent with that appeared in a barotropic model, and its average volume transport is comparable to that obtained by dynamical computations. The current has its origin west of the Kuroshio main stream near the center of Bashi Strait, and it is actually a recirculation of the cyclonic eddies. However, because of its mixing with Kuroshio water in Bashi Strait we can expect the water in the current will have some characteristics of the Kuroshio water. (3) Further studies are needed to confirm the model result.

Key words: South China Sea, Kuroshio, South China Sea Circulation, Reduced gravity model, Cyclonic eddy.