

理想海底地形的南海海洋经向翻转数值模拟

王东晓 刘雄斌 王文质 杜岩 周伟东

(中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广州 510301. E-mail: dxwang@scsio.ac.cn)

摘要 利用一个 z 坐标刚盖近似海洋环流模式, 分别在吕宋-台湾以东的闭边界和开边界两种情况下, 模拟了理想海底地形(1000 m 平底)南海冬季和夏季上层环流的经向翻转(meridional overturning), 目的是为了分析黑潮入侵南海的可能影响范围及其对南海上层环流经向翻转的改变, 并比较这种影响的季节性差异. 模式采用气候平均的海面风场驱动, 热盐强迫采用基于向 Levitus 气候海面温度和盐度张弛的边界条件. 从模拟结果来看, 黑潮影响南海上层经向翻转的范围可达到 10°N 左右, 从而驱动南海上层海洋形成一个不闭合的经向翻转. 在冬季(1月份), 海水从大约 400 ~ 500 m 深处自北向南输送, 并且逐步上升, 在表层返回北部; 在夏季(6月份), 也有类似的情形, 海水从大约 150 ~ 200 m 深处自北向南输送, 并且逐步上升, 在表层返回北部. 该经向翻转描述了南海中、上层水的运动路径, 为研究南海风生-热盐环流动力学提供了理想化的参考依据.

关键词 南海 经向翻转 风生环流 数值模拟

南海是西北太平洋最大的边缘海. 南海有若干个重要的通道, 如北部的吕宋海峡、台湾海峡和南部的加里曼丹海峡、巴拉望海峡等. 南海通过吕宋海峡与太平洋相连接, 吕宋海峡的海水输送对南海内区环流有重要影响^[1]. 由于吕宋海峡处海流的直接观测资料很少, 对吕宋海峡海流状况的研究大多是根据水文资料采用动力计算等方法进行估计的, 不同的结果之间较大的差异. 关于黑潮对南海的影响, 是目前南海海洋学争论最多的问题之一, 争论焦点集中在: 是否有黑潮分支进入南海, 是否终年均有黑潮南海分支, 黑潮进入南海后表现如何以及黑潮入侵的动力机制等问题^[2-7]. 不同研究者根据某一次或数次海洋的调查资料得出的结论往往是针对某特定时刻或特定流型, 彼此之间会有较大差异. 对模拟而言, 其结果更是如此.

海洋环流经向热盐输送过程是海洋影响气候变化的重要方式, 低纬度海域的热量由此向极地海域运输, 而中、高纬度形成的中、下层水团在热带地区上升至上层, 呈现为所谓的经向翻转的结构^[8], 这个过程很大程度上体现在上层海洋的经圈环流. 本文关注的科学问题是, 南海是否也存在经圈环流? 如存在, 有什么样的特征? 是封闭的还是不封闭? 如果存在封闭的经圈环流, 则南海的中层水(intermediate water)可能是在南海内部局地生成的. 反之, 则是通过深层海域(如吕宋海峡), 由西北太平洋运输进来的. 本文通过两组对比数值试验(即吕宋外海有黑潮与无

黑潮, 也称为开边界与闭边界的试验), 模拟理想地形下南海上层海洋的经圈环流结构, 并定性地验证黑潮影响南海环流的程度, 特别是对南海上层海洋经向翻转的影响.

1 模式及数值实验介绍

1.1 模式简介

本文采用的是美国海洋大气管理局地球物理流体力学实验室(NOAA/GFDL)海洋环流模式(Bryan-Cox版本)^[9,10], 该模式是一种在满足静力平衡假定、Boussinesq近似条件和刚盖近似条件下, z 坐标有限差分数值模型. 这个模式以其优良的性能而在海洋学的不同领域得到了广泛的应用.

在球坐标下, 该模式的控制方程为:

$$u_t + L(u) - \frac{uv \tan \phi}{a} - fv = -\frac{1}{\rho_0 a \cos \phi} p_\lambda + (\kappa_m u_z)_z + F^u, \quad (1)$$

$$v_t + L(v) + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + fu = -\frac{1}{\rho_0 a} p_\phi + (\kappa_m v_z)_z + F^v, \quad (2)$$

$$T_t + L(T) = (\kappa_h T_z)_z + \nabla \cdot (A_h \nabla T), \quad (3)$$

$$S_t + L(S) = (\kappa_h S_z)_z + \nabla \cdot (A_h \nabla S), \quad (4)$$

$$w_z = -\frac{1}{a \cos \phi} (u_\lambda + (\cos \phi \cdot v)_\phi), \quad (5)$$

$$P_z = -\rho g, \tag{6}$$

$$\rho = \rho(T, S, p), \tag{7}$$

其中, F^u, F^v 代表水平摩擦, $L(\)$ 代表平流算子, $f = 2\Omega \sin\phi$ 为科氏参数, Ω 是地转角速度, T 和 S 分别是温度和盐度, (u, v, w) 表示纬向 λ 、经向 ϕ 和垂向 (z , 向上为正) 速度, p 为压力, ρ 为密度, ρ_0 为垂向平均密度(参考密度), g 为重力加速度, a 为平均地球半径, κ_m 和 κ_h 分别是垂向涡粘性系数和扩散系数, A_m 和 A_h 分别是水平涡动粘性系数和扩散系数.

1.2 模式参数选取

该模式采用的是 Arakawa B 网格, 垂向采用 z 坐标. 其计算域覆盖了介于 $0.5^\circ \sim 24.5^\circ \text{N}$, $100.5^\circ \sim 123.5^\circ \text{E}$ 之间的区域, 包括整个南海以及台湾以东和吕宋岛以部分海域. 水平网格间距为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 在分辨能力的范围内, 模式区域保持了真实的海岸线形状. 在垂直方向上, 模式采用不均匀间隔的 8 个分层. 由于本文只讨论南海中、上层的环流状况, 并且考虑到南海在 1000 m 以深海域范围较小, 所以我们将整个南海海盆及吕宋海峡深水区中超过 1000 m 的地形取为 1000 m 的平底地形(如图 1 所示), 浅于 50 m 的海区取为 50 m, 以垂向分层的精度反映真实地形

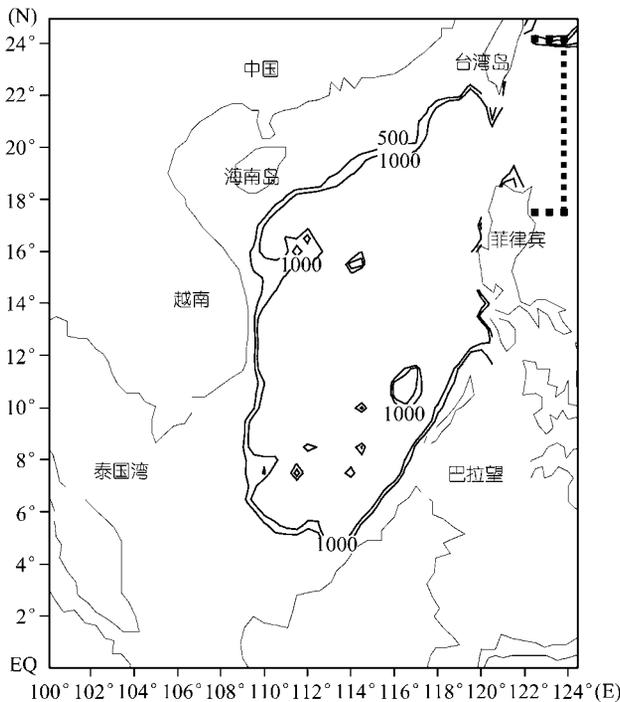


图 1 南海地形图(图中台湾岛和菲律宾以东 3 条虚线代表开边界位置)

的特征. 模式参数选取表 1.

表 1 南海 GFDL 海洋模式参数表

垂直黏性系数	$\kappa_m = 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
水平黏性系数	$A_m = 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
垂直扩散系数	$\kappa_h = 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
水平扩散系数	$A_h = 2 \times 10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
水平分辨率	$\Delta\lambda = \Delta\phi = 0.5^\circ$
速度的垂向层次深度	50, 100, 150, 250, 400, 600, 800 和 1000 m

1.3 实验方案

由于本文目的是研究黑潮入侵南海的范围及其对南海的影响, 尤其是对南海经向输送的影响, 所以设计了两个简单试验, 即分别在南海的闭边界和部分开边界情况下, 采用综合海洋大气资料集 (COADS)^[11] 海面风应力驱动结果(在南海, 有研究表明 COADS 风应力资料略优于其他风应力资料^[12]). 海面温度、盐度强迫采用了基于向 Levitus 气候资料^[13] 张弛的边界条件, 张弛时间尺度分别为 60 天(温度)和 45 天(盐度), 初始条件采用 Levitus 气候资料 1 月份的温度和盐度. 模式从静止状态下年循环的强迫场直接积分, 当模式中南海的总动能达到稳定后(本文积分 5 年), 根据模式输出最后一年的月平均结果计算南海上层的经向翻转. 南海海区具有典型的夏季风和冬季风, 分别在 1 月份和 6 月份达到最强盛, 表现为稳定的东南风和西北风. 我们用这两个月平均的垂向流函数代表南海上层海洋冬季和夏季的经向翻转特征.

定义垂向流函数 ψ 用于定量描述南海经向翻转:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = -\bar{v} l_\lambda, \tag{8}$$

其中, \bar{v} 为经向速度 v 的纬向平均, 即: $\bar{v} = \frac{1}{l_\lambda} \int_0^{l_\lambda} v(\lambda, \phi, z) d\lambda$, $l_\lambda = l_\lambda(\phi, z)$ 为南海随纬度不同而变化的东西向海域宽度.

2 分析与讨论

2.1 闭边界模拟结果

首先, 将南海四周封闭, 使其与外界无水交换, 只考虑表面强迫, 包括 COADS 风应力、参数化的热通量和淡水通量(即张弛边界条件). 从表层(50 m)的流场图(图 2)中, 可以看出夏季南海表层在北部以气旋式环流为主, 在南部以反气旋式环流为主; 在图 3 中, 可以看出冬季南海表层以气旋式的环流为主, 符

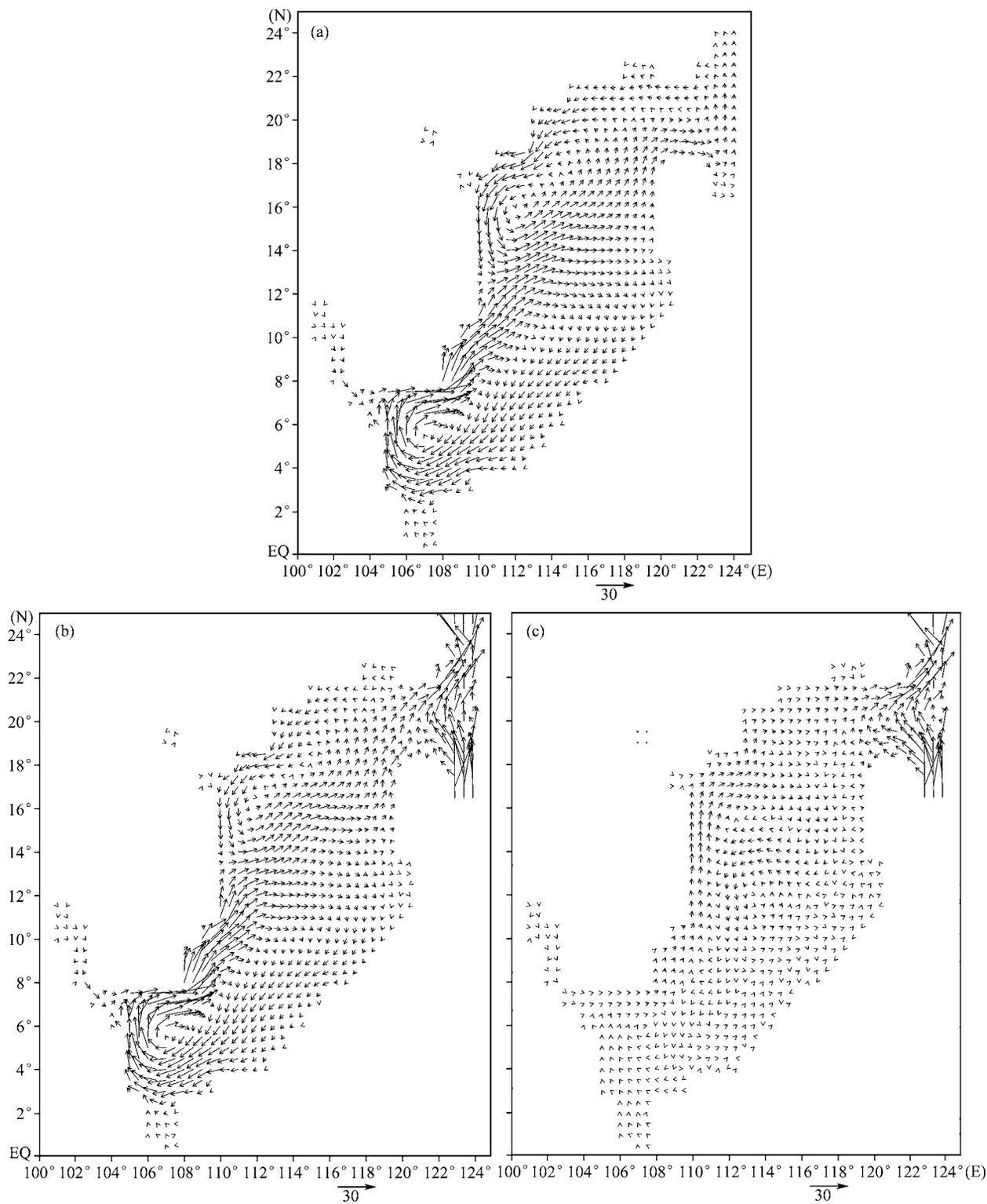


图2 夏季(6月份)表层50 m速度分布图(单位: cm/s)
(a) 闭边界; (b) 开边界; (c) 开边界减闭边界

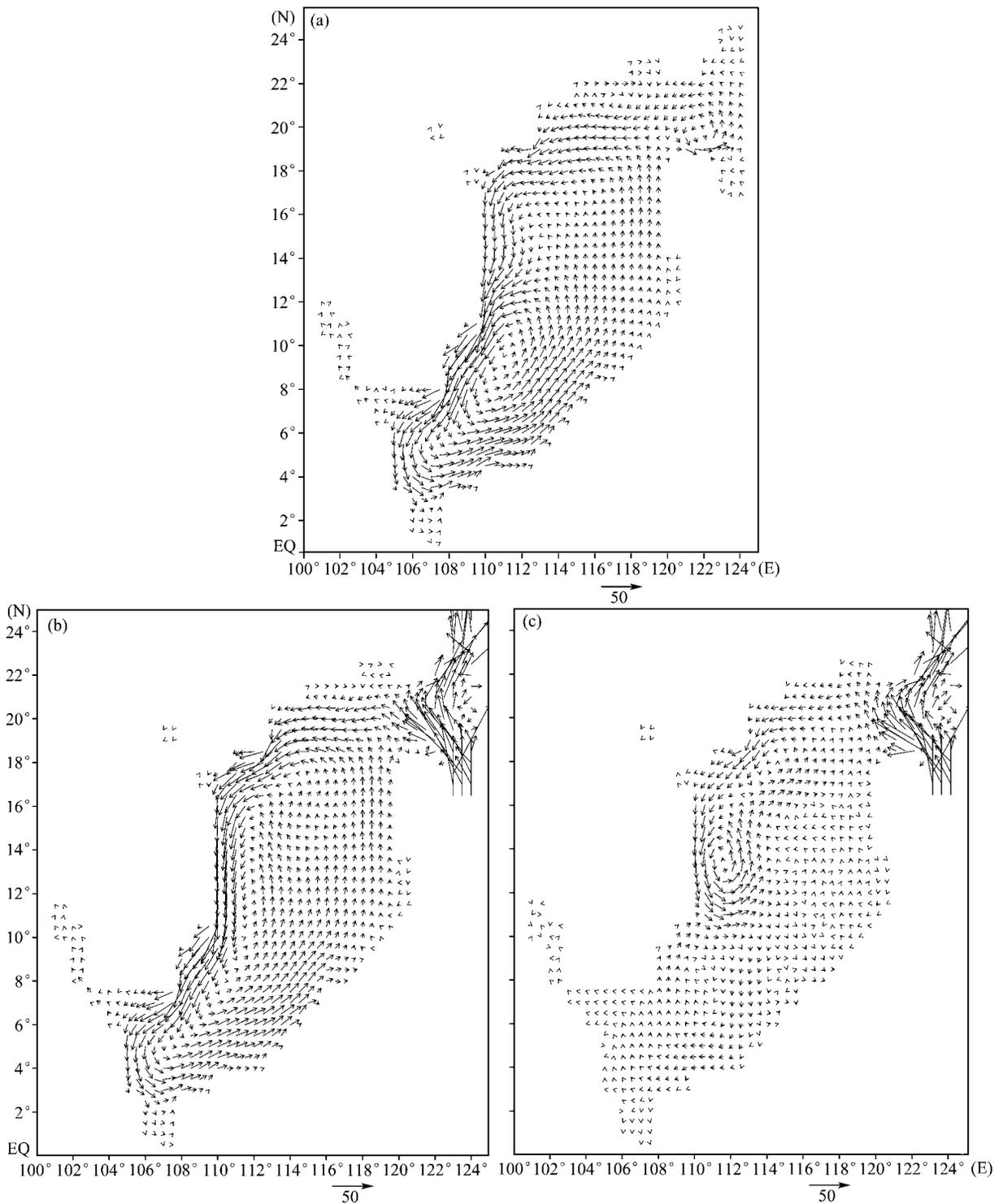


图 3 冬季(1月份)表层 50 m 速度分布图(单位: cm/s)
 (a) 闭边界; (b) 开边界; (c) 开边界减闭边界

合从温度和盐度观测诊断得到的结果^[14]. 南海环流
 向西强化十分明显, 这与以往的闭边界数值模拟结

果是十分相似的^[15].

流函数分布显示(图 4), 南海中层水向南输送,

并逐步上翻(upwelling), 然后返回北部. 为了方便起见, 将其定义为正的经向翻转; 反之, 若中层水在向南海输送的过程中, 逐步下翻(downwelling), 我们定义为反的经向翻转(下同). 从图 4(a), 可以发现在夏季(6月份), 假如南海封闭时, 在表面强迫作用下, 南海上层海洋的经向翻转是闭合的. 在大约 300 ~ 500 m 深之间的层次上是正的经向翻转, 而在大约 550 ~ 700 m 层次上是反的经向翻转, 量级大约是 0.1 Sv (1 Sv = 1 × 10⁶ m³/s). 从图 5(a), 可以看到在冬季(1月份)的情形时与夏季类似, 基本上也是闭合的, 在大约 200 m 到 400 m 深之间的水是正的经向翻转, 量级也是 0.1 Sv. 这与南海冬季由表层水入侵温跃层的现象是相符的^[16].

在闭边界条件下, 无论是冬季还是夏季, 上层海洋的经向翻转强度都非常小. 这在一定程度上说明局地生成的南海次表层水非常有限, 这与观测和理

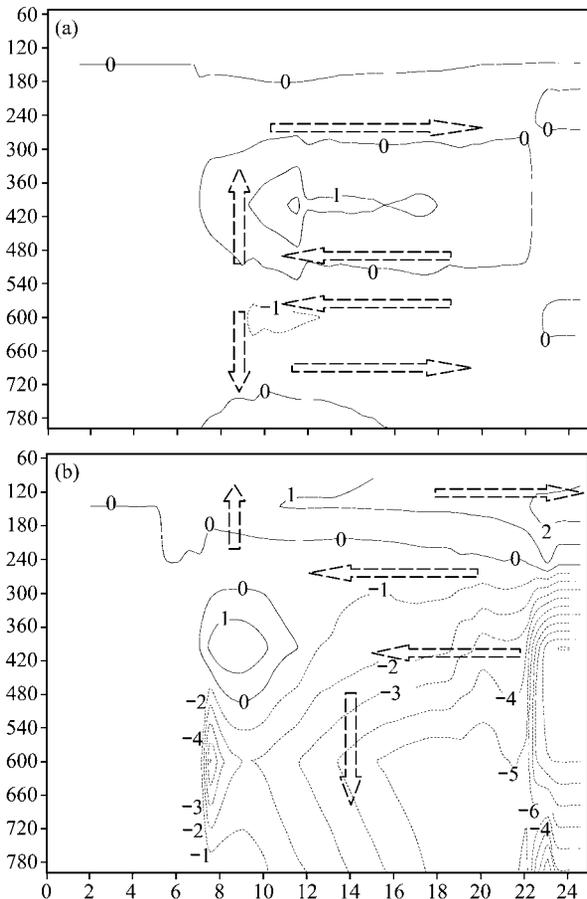


图4 夏季(6月份)南海经向-垂向流函数

纵轴为深度, 横轴为纬度(北), 图中箭头表示经向翻转. (a) 闭边界; (b) 开边界(单位: 10¹¹ cm³/s, 下同)

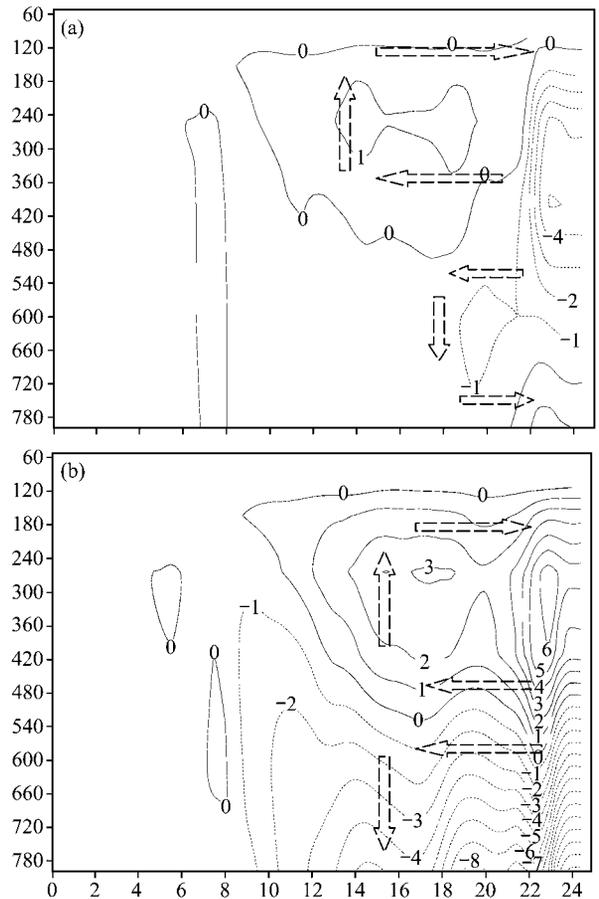


图5 冬季(1月份)南海经向-垂向流函数

(a) 闭边界; (b) 开边界

论分析的结果相一致. 南海北部冬季最低海面温度约为 20 °C, 理论上南海局地生成的次表层水也只能到达 20 °C 温度所在的层次. 这一点已经体现在上述的模拟结果中, 从一个侧面说明本文模拟结果在理想条件下是可信的.

除了南海北部(22°N 附近)冬季有一个小范围的下沉流外, 夏季和冬季南海上层海洋的经向翻转在闭边界条件下十分相似. 这说明封闭海盆的条件下南海上层海洋的经向翻转并不取决于海面风的驱动方向.

2.2 开边界模拟结果

南海通过 10 多个海峡和外部海洋相连, 与外海的水交换情况复杂^[6,7]. 但考虑到其中大多数海峡水深较浅, 尚不足以影响整个南海流系, 特别是对中层环流的影响, 本文人为地将除了吕宋海峡外的其他海峡视为闭边界. 吕宋海峡由于深度深, 其外侧是强

大的西边界流,因而对整个南海中层水和底层水的影响很大^[2,3,17].所以在闭边界基础上,仅考虑台湾以东(24°N)和吕宋以东(17°N)的边界为开边界.开边界宽度此处取为 1.5°.

本文根据黑潮的流幅和结构,给出开边界处的水平速度垂向分布,即理想化的分布廓线.以吕宋以东的南边界为例,冬季黑潮流量约为 26 Sv,夏季约为 30 Sv,主要集中在上层,最大流速在 50~100 m 处^[18].所以模式中,在该南边界的 3 个网格点上的冬季流量分别取为 8.5, 9.0 和 8.5 Sv,垂向用近似轮廓线代替:

$$V(k) = V_{\max} \left(1 - \frac{\text{abs}(k-2)}{8} \right), \quad k = 1 \sim 8 (\text{垂向层次}),$$

其中, V 代表速度,流速自上而下线性递减.温度和盐度在侧边界处也采用基于 Levitus 气候值的张弛条件,张弛时间尺度与海面处相同.另外,由于在 124°E 处有纬向的水交换^[19],从 17°~24°N 的侧向东边界,采用辐射开边界条件,即流出定常,流入无辐散^[20],以保证模式对该处纬向环流有一定的模拟能力.

在南海内部,表层(50 m)的流场状况类似于闭边界的情况.在图 2 中,夏季南海上层北部以气旋式环流为主,南部以反气旋环流为主;在图 3 中,可以看出冬季南海上层总的环流以气旋为主.

从图 4(b) 不难看出,在夏季(6 月份),由于存在通过吕宋海峡的水交换,使得闭边界条件下产生的闭合正的经向翻转范围明显缩小,与此同时,一个不闭合的正的经向翻转的区域延伸到大约 200 m 处,说明有中层水从黑潮中分离出来,进入南海.并在大约 200 m 处,海水自北向南输送,并不断地上升,在大约 100 m 以上又逐步返回到北部.在 300 m 以下的区域,反的经向翻转不闭合很明显.同样在图 5(b),冬季(1 月份)正的不闭合经向翻转呈现的区域更大,在大约 500 m 处,海水从北向南输送并逐渐地上升,到达大约 200 m 深以上,又向北返回.

2.3 开边界与闭边界的差异

为了将黑潮入侵影响南海上层经向翻转的效应线性地分离出来,本文用开边界的结果减去闭边界的结果所得的差值场,来定性地度量开边界所产生的影响程度.

从冬季的开边界与闭边界之差的表层速度分布中(图 3),黑潮影响南海表层最远可达到 10°N 左右.黑潮入侵主要对南海表层的水平方向影响是在越南

以东造成气旋式涡,吕宋海峡以西的南海北部气旋式涡得到加强,这也体现了冬季黑潮入侵对南海北部环流的重要影响^[11].同样,在夏季的表层速度的差值图(图 2)中可以看到,黑潮对南海表层的水平方向的影响弱于冬季,在越南以东形成微弱的反气旋式涡.

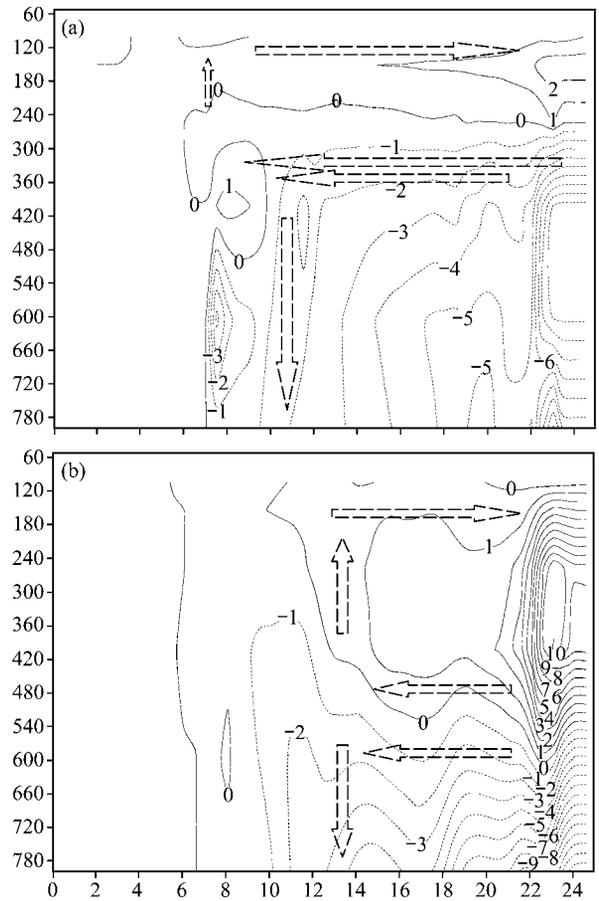


图 6 南海经向-垂向流函数在开、闭边界条件下的差值: 开边界减闭边界 (a) 夏季; (b) 冬季

图 6(a),即夏季开边界与闭边界的差值结果来看,黑潮的影响范围可以达到 10°N,使得正的不闭合经向翻转达到大约 200 m 以上区域,反的经向翻转伸展到大约 300 m 以下的区域,并且加剧.图 6(b),即冬季开边界与闭边界的差值结果来看,黑潮的影响范围也可以达到 10°N 左右,这对于大约 600 m 以上的不闭合正经向翻转的贡献是显著的.

3 结语

本文尝试采用 GFDL 海洋环流模式对南海上层海洋经向翻转现象进行数值模拟. 这个经向翻转一定程度上描述了南海中、上层水的运动路径, 所以与南海温跃层、上层环流等一系列过程有密切的关系.

模拟计算的结果显示在 300 m 以上南海维持一个浅的经向翻转. 从两组侧向开边界开关(turn on/off)的数值试验对比可以看出, 吕宋海峡的水交换对这个上层海洋的经向翻转有重要影响. 同时表明黑潮的入侵对南海水平环流结构有重要作用, 其影响范围最远可达 10°N 左右.

在 1000 m 平底地形条件下, 南海上层经向翻转的最主要特征是不闭合(即冷的次表层水不是局地生成, 而是通过吕宋海峡之外海输运进来), 其量级大约为 0.3 Sv. 这结果暗示了中层水从西北太平洋进入南海的方式. 通过黑潮入侵南海, 大洋中层水可以到达南海中部乃至南部, 这与水团分析结果一致^[2].

应该看到, 本文只考虑 1000 m 以上的南海上层海洋, 而南海是一个水深达 4000 m 的深海盆, 其 1000 m 下层海洋混合可能会强烈影响经向翻转. 所以本文的结果还有待进一步拓展. 与此同时, 本文没有考虑台湾海峡、巴拉望海峡等通道的开边界作用, 今后也应该分析各海峡的水交换对南海的经向翻转影响程度.

致谢 本工作受国家自然科学基金项目(批准号: 40076007, 40346029)、“十五”专项(2001DIA50041)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999043806)资助.

参 考 文 献

- 1 Su J L. Circulation dynamics of the China Sea: north of 18°N. In: Robison A R, Brink K, eds. *The Sea*, Vol. 11, The Global Coastal Ocean. New York: John Wiley & Sons, 1998. 483~506
- 2 Wyrki K. Scientific result of marine investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand, 1959~1961. NAGA Rept 2, 1961, 2: 1~195
- 3 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套? 台湾海峡, 1989, 8(1): 89~95
- 4 郭忠信, 杨天鸿, 仇德忠. 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
- 5 Shaw P T. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea into the South China Sea. *J Geophys Res*, 1991, 96(C1): 821~827
- 6 刘秦玉, 杨海军, 李薇, 等. 吕宋海峡纬向海流及质量输送. 海洋学报, 2000, 22(2): 1~8
- 7 方国洪, 魏泽勋, 崔秉昊, 等. 中国近海域际水、热、盐输运: 全球变网格模式结果. 中国科学, D 辑, 2002, 32(12): 969~977
- 8 McPhaden M J, Zhang D. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*, 2002, 415: 603~608[DOI]
- 9 Bryan K. A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *J Comp Phys*, 1969, 4: 347~376
- 10 Cox M D. A primitive equation, three-dimensional model for the ocean. GFDL Ocean Group Tech Rep 1. Princeton/ NJ: Geophys Fluids Dyn Lab, 1984. 137
- 11 da Silva A, Young C, Levitus S. *Atlas of Surface Marine Data 1994*, Vol. 1: Algorithms and Procedures. NOAA Atlas NESDIS 6. Wash D C: U S Gov Printing Office, 1994. 83
- 12 谢强, 王东晓, 王卫强, 等. 南海海域海面风应力比较分析. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 91~100
- 13 Levitus S, Boyer T. *World Ocean Atlas 1994*, Vol. 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4, U S Gov. Printing Office, Wash D C, 1994. 117
- 14 徐锡祯, 邱章, 陈惠昌. 南海水平环流概述. 见: 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1982. 137~145
- 15 王东晓, 周发琇, 秦曾灏. 南海上层海洋环流两层半模式的数值模拟. 闭边界海盆季节性环流. 海洋学报, 1996, 18(5): 30~40
- 16 王东晓, 杜岩, 施平. 冬季南海温跃层通风的证据. 科学通报, 2001, 46(9): 758~761
- 17 赫崇本, 管秉贤. 南海中部 NE-SW 向断面海水热盐结构以及海盆冷水的来源. 海洋与湖沼, 1984, 15(5): 411~418
- 18 Chao S Y, Shaw P T, Wu S Y. El Niño modulation of the South China Sea circulation. *Prog Oceanography*, 1996, 38: 51~93[DOI]
- 19 Nitani H. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K, eds. *Kuroshio*, Seattle. Washington: University of Washington Press, 1972. 129~163
- 20 Orlandi I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, *J Comput Phys*, 1976, 21: 251~269

(2003-10-31 收稿, 2003-12-15 收修改稿)