

# 南海海面高度和输运流函数: 全球变网格模式结果\*

魏泽勋<sup>①②</sup> 方国洪<sup>①③</sup> 崔秉昊<sup>④</sup> 方越<sup>⑤</sup> 何宜军<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; <sup>②</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>③</sup>国家海洋局第一海洋研究所海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 青岛 266061; <sup>④</sup>成均馆大学土木和环境工程系, 水原 440-746, 韩国; <sup>⑤</sup>Texas A & M University, College Station, TX 77843-3146, USA)

**摘要** 为了研究南海环流结构和变异及其与外部水域的关系, 我们建立了一个嵌套于全球大洋环流模式中的高分辨率中国近海环流数值模式. 给出模拟所得南海月平均以及年平均的海面高度和流函数分布, 与 TOPEX/POSEIDON 资料比较表明, 所得海面高度距平与观测十分一致. 基于这些结果, 讨论了南海的环流结构, 尤其是上层环流结构. 结果表明: 对于表层海水来说, 黑潮在冬、春和秋季均通过吕宋海峡入侵南海, 夏季则表层没有入侵. 但对于整个海水而言, 全年均有海水从太平洋通过吕宋海峡进入南海. 这一差异表明, 在夏季, 太平洋的海水是在次表层和中层入侵南海的. 南海北部陆坡附近全年受气旋式环流控制. 夏季的南海南部反气旋流圈、越南东南离岸流和冬季的南海南部气旋流圈都得到了很好的再现. 南海海面高度和海面高度距平之间的差异明显. 表明, 在利用卫星高度计资料研究南海的上层环流时, 长期平均海面高度的空间分布有重要意义.

**关键词** 南海 海面高度 海面高度距平 流函数 数值模式

对于南海环流的研究已经有 40 多年历史, 但迄今人们对它的认识还很不充分, 远远落后于对渤、黄、东海等其他海区的认识. 作为研究南海环流的主要手段之一, 数值模拟研究迄今也已经作过许多工作<sup>[1-4]</sup>. 但是大部分研究都是采用区域模式, 也就是说模式只是覆盖南海本身, 在各开边界处由研究者根据历史观测资料, 前人的一些估计, 或者研究者自己的判断先验地给定一定的边界条件<sup>[2]</sup>. 考虑到区域模式在开边界取值上有一定的人为因素, 会影响到模式结果的可靠性, 作者最近发展了一个嵌套于全球大洋环流模式中的高分辨率中国近海环流数值模式来研究中国近海尤其是南海的环流. 由于采用的是嵌套于全球的模式, 本文所用模式不需人为给定任何侧开边界条件, 各开边界处的温、盐、流都是由模式本身直接模拟得到的<sup>[5]</sup>. 本文报道模拟所得南海海面高度和流函数. 根据海面高度分布, 我们可以推断上层海水的流动. 而海面高度距平则可以用来与卫星高度计资料进行比较以检验模式结果. 从比较的情况看, 本研究的结果与卫星高度计资料符合良好. 海水输运流函数可以推断海水的整体运动状况. 海面高度和输运流函数的差异, 则包含了上层和中、下层海水运动差异的一些信息.

2002-02-08 收稿

\* 国家重大基础研究发展规划(编号: G1999043808)、国家 863 计划青年基金(编号: 2001AA639100)、国家重点科技攻关计划(编号: 97-926-05-01)、国家自然科学基金(批准号: 40076004, 49876010)和中国科学院知识创新工程(编号: KZCX2-202)资助项目

# 1 模式概述

本文的数值模式是基于美国普林斯顿大学地球物理流体力学实验室(GFDL)的 MOM2 模式而建立的. MOM2 模式采用三维原始方程组,即考虑了动量变化、动量平流、地球偏转力、海水密度变化引起的压力梯度力、海水垂向和侧向粘性、海水的体积守恒及温度、盐度的守恒和扩散效应.海面考虑风应力作用和热量、水汽交换<sup>[6]</sup>.

本文的数值模式是嵌套于全球大洋环流模式中的高分辨率中国近海环流数值模式<sup>[7]</sup>.模式覆盖全球大洋,在南海、渤黄东海和日本海海域的水平分辨率为 1/6°,往外分辨率逐渐变粗至 3°(图 1,其中 1/6°分辨率区域内网格线重叠,图中无法显示).垂向分为 15 层(表 1).模式的东、西边界取循环边界,南北边界为闭边界.模式考虑实际海底地形,水深资料取自 DBDB5 (National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado).海表由 Hellerman 等<sup>[8]</sup>的月平均风应力驱动.海表温度、盐度向 Levitus 等<sup>[9]</sup>的气候资料松弛.初始温盐场取自 Levitus 等<sup>[9]</sup>的 1 月气候资料.模式积分了 6 a 达到稳定态,将最后 1 a 的结果保存用以分析.

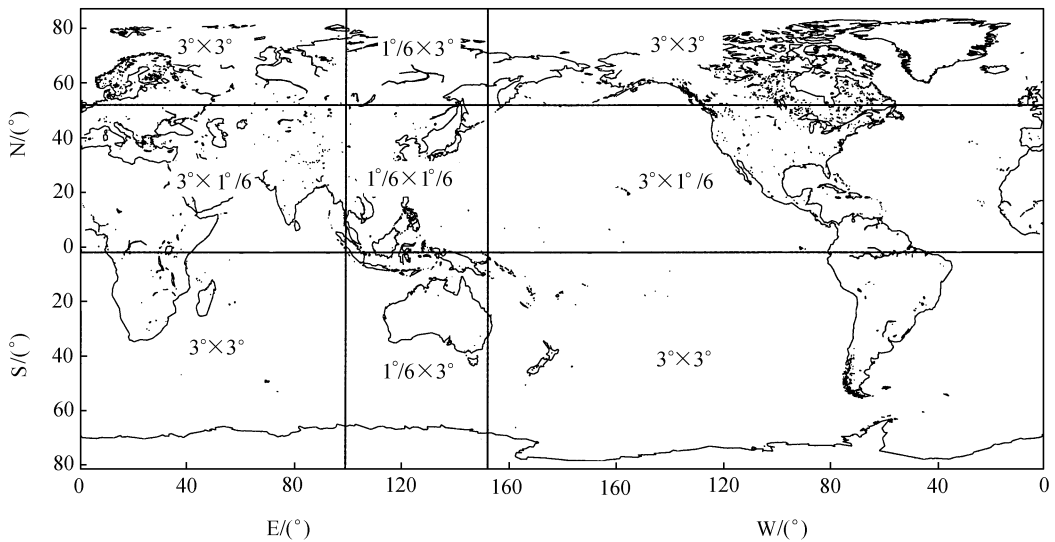


图 1 模式的水平网格

表 1 模式垂向分层

层次	层厚/cm	中心点深度/cm
1	2500	1250
2	2500	3750
3	2500	6250
4	2500	8750
5	3462	11250
6	7232	15674
7	14467	25715
8	24581	44609
9	36754	74876
10	50000	118116
11	63246	174876
12	75419	244609
13	85533	325715
14	92768	415674
15	96538	511250

# 2 南海海面高度距平计算结果与卫星高度计观测结果的比较

为了检验模式结果,我们首先将模式结果与 TOPEX/POSEIDON(T/P)卫星高度计资料进行比较.从T/P资料得到海面高度需要确定平均海面高度.而迄今为止,由地球重力场模式推算得到的大地水准面还没有精确到可以给出准确的平均海面高度.采用动力计算方法推算则由于该方法只近似适用于深海区,对南海周边浅海误差较大.我们这里先对模式得到的海面

高度距平来和 T/P 资料得到的海面高度距平进行比较以检验模式结果. 将各月的海面高度扣除年平均的海面高度就得到了海面高度距平, 如图 2 所示, 其中(a), (b), (c)和(d)分别示出 1 月、4 月、7 月和 10 月(分别代表冬、春、夏、秋季)的海面高度距平. 图 3 则对应地给出根据 1992 ~ 2000 年 T/P 资料得到的对应各月南海海面高度距平.

南海的海面高度距平具有明显的季节特征. 夏季和冬季的分布呈完全相反的趋势. 模式结果表明, 冬季在吕宋岛西岸和南沙群岛西侧分别存在一个负距平的中心, 最小值分别达到 -14 cm 和 -6 cm(图 2(a)). 对应的 T/P 资料的结果为 -14 cm 和 -10 cm(图 3(a)). 南海的西部和南部则基本为正距平. 具有明显的西南高东北低的分布特征. 而夏季的分布特征则完全与冬季相反, 为东北高西南低. 对应于冬季的负距平中心, 分别存在一个正距平中心. 中心距平值分别可超过 18 cm 和 6 cm(图 2(c)), T/P 资料为 12cm 和 8cm(图 3(c)). 春季和秋季的海面高度距平则明显呈现出夏季和冬季过渡期的特征. 春季的分布(图 2(b))比较接近夏季, 但越南外海高脊较偏北. 而秋季的分布(图 2(d))比较接近冬季, 但越南外海低槽亦较冬季偏北. 这一特征与 T/P 资料(图 3)一致.

比较图 2 和图 3, 可以发现, 模拟得出的南海海面高度距平和卫星高度计资料相当符合. 为了给出符合程度的一个定量评价, 我们还进一步将模拟值与卫星高度计观测值直接进行了

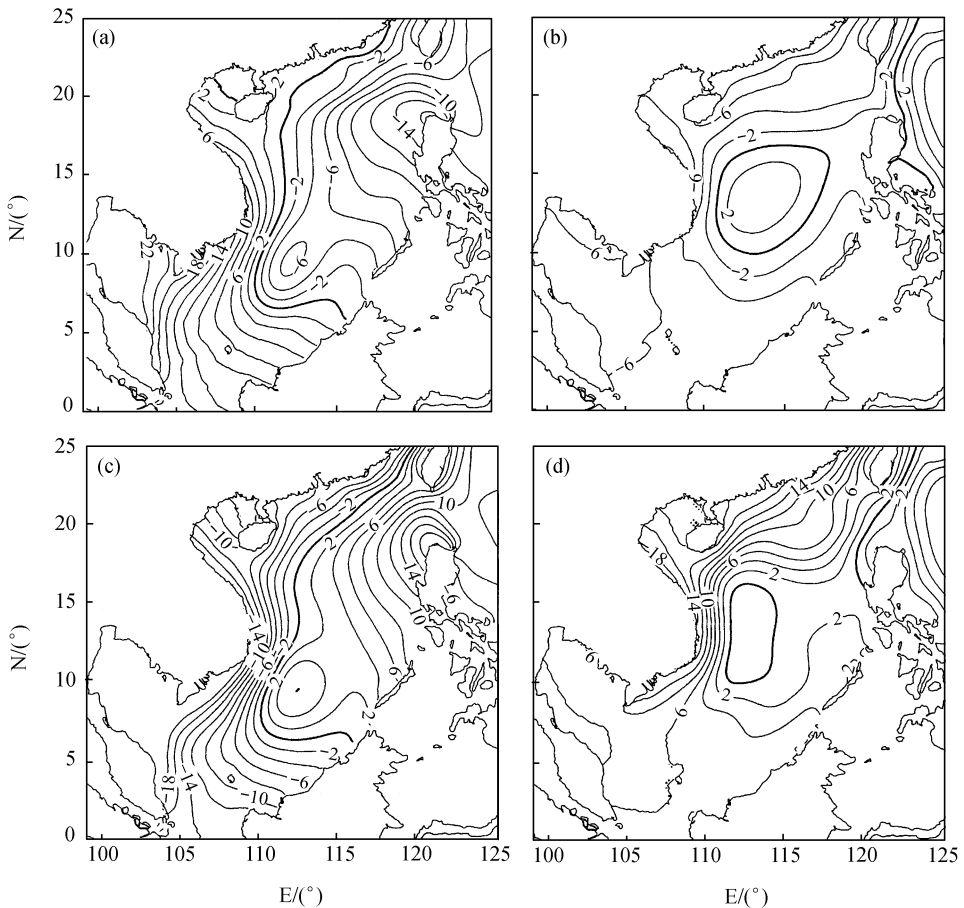


图 2 计算所得南海海面高度距平(单位: cm)  
(a) 1 月; (b) 4 月; (c) 7 月; (d) 10 月

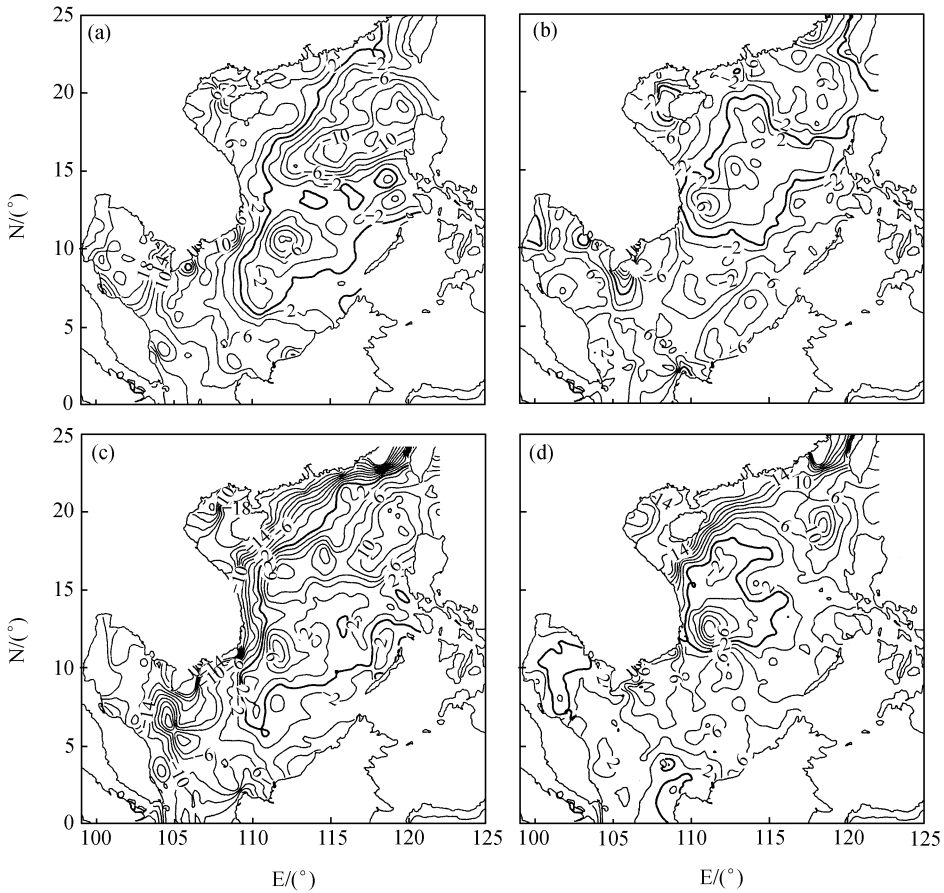


图 3 由 T/P 资料得到的南海海面高度距平(单位: cm)  
(a) 1 月; (b) 4 月; (c) 7 月; (d) 10 月

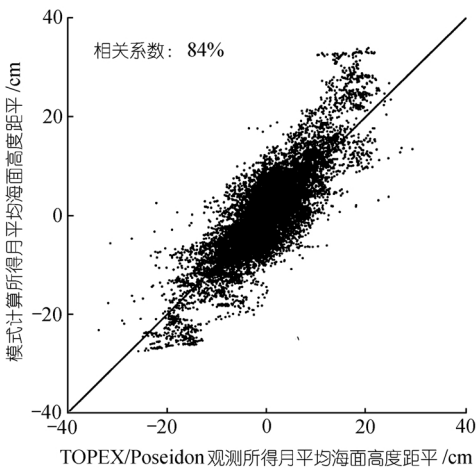


图 4 模拟所得南海海面高度距平与 T/P 资料的比较  
横坐标为 T/P 资料, 纵坐标为模式结果

比较. 所用的各月高度计距平资料为 1992 ~ 2000 年南海海域所有的 T/P 观测点资料, 对应的模式计算结果由网格点内插得到. 图 4 给出了两者比较的散点图. 其中横坐标为 T/P 资料, 纵坐标为模式结果. 从图中可以看出, 模式结果和 T/P 资料的散点分布基本与  $y=x$  这一直线(图中从左下角到右上角的直线)相吻合. 两者的相关系数为 84%. 可见本模式模拟所得的南海海面高度距平与卫星高度计资料具有良好一致性. 此外, 本模式模拟所得的中国沿岸平均海面高度与大地水准测量所得沿岸 28 个验潮站观测值也作过比较, 相关系数大于 95%<sup>[10]</sup>.

### 3 南海海面高度

图 5 分别给出了年平均(a)、1 月(b)、4 月(c)、7 月(d)和 10 月(e) (分别代表冬、春、夏、秋季)的南海海面高度. 对于年平均而言(图 5(a)), 最低

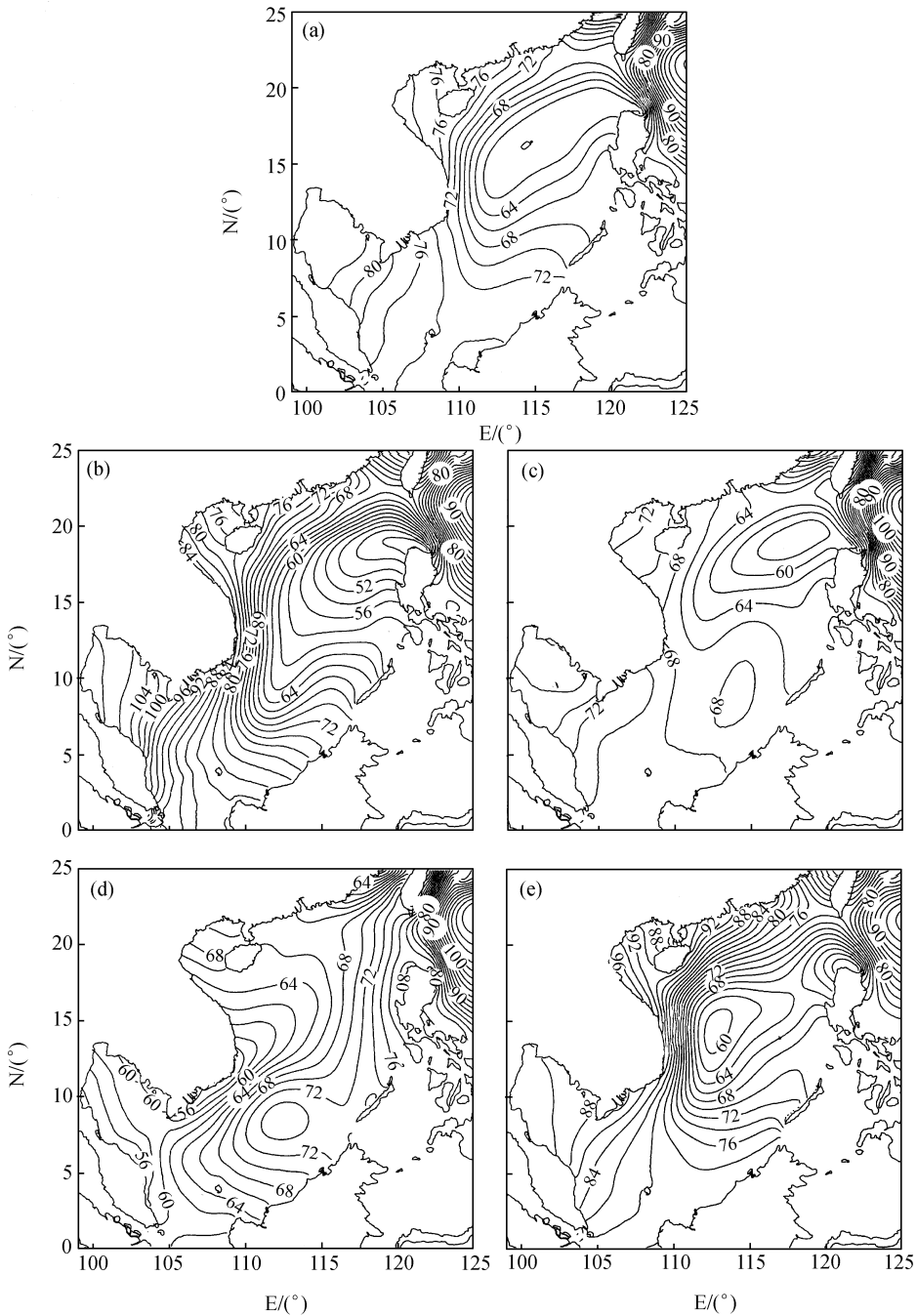


图 5 模拟所得南海海面高度(单位: cm)

(a) 年平均, (b) 1 月, (c) 4 月, (d) 7 月, (e) 10 月

的海面高度出现在南海深海盆的东北部, 这表明这里上层海洋存在着一个大的气旋式流圈. 在冬季(图 5(b)), 这个大的气旋式环流发育得更加强盛. 卡里马塔海峡中明显存在一股南向的流动将海水带出南海. 在夏季(图 5(d)), 南海的海面高度基本呈现东高西低的趋势, 这一特征与李立等<sup>[11]</sup>一致. 这意味着夏季南海上层环流以北向流为主. 图 5(d)还显示, 越南中部沿岸存

在着一个尺度大约为 500 ~ 700 km 的气旋式环流. 在这个环流的南边, 越南东南离岸流(SE Vietnam Off-Shore Current)清晰可见. 更南边一点, 又可以看到一个反气旋式流圈. 这一特征与 Fang 等<sup>[1]</sup>的描述一致. 其中, 越南东南离岸流还得到卫星遥感 SST 资料的证实<sup>[12]</sup>.

春季和秋季的海面高度明显地具有冬季和夏季转换期的性质. 春季在吕宋岛西北方仍存在气旋式环流(图 5(c)). 在秋季(图 5(e)), 越南中部外海存在着一个较强的气旋式流圈, 其中心位置大约在 15°N, 112°E.

对于上层环流而言, 在秋、冬季, 黑潮通过吕宋海峡入侵南海(图 5(b), (e)). 春季上层海流入侵较弱(图 5(c)), 而在夏季, 上层海水没有西向入侵(图 5(d)).

图 5 显示的四个代表月海面高度分布与 Qu<sup>[13]</sup>根据历史温盐资料得出的动力高度图在基本格局上十分相符. 由于 Qu 给出的是 100m 相对于 400m 的动力高度, 与本文计算结果不可避免地有一定差别, 特别该研究未能给出水深小于 400m 海区的结果, 本研究则给出了南海整个海域上层环流更全面的认识.

虽然南海的海面高度分布(图 5)和海面高度距平分布(图 2)有一定的相似性, 但它们之间的差别也是非常明显的. 以春季为例, 在距平图(图 2(b))上, 于越南外海 13°N 附近存在一个明显的高脊; 而在海面高度图(图 5(c))上, 这个高脊消失了. 相反地, 在吕宋西北出现了一个低槽, 这个低槽在距平图上则没有. 这寓示着在利用卫星高度计资料来研究表层环流时, 年平均的海面高度非常重要.

## 4 海水输运流函数

图 6 展示模拟所得南海海水输运流函数, (a), (b), (c), (d)和(e)分别为年平均、1月、4月、7月和 10月(分别代表冬、春、夏、秋季)的流函数. 从图 6 可以看出南海从海面到海底积分总的海水运动情况及其季节变化. 结果显示, 太平洋的海水终年通过吕宋海峡侵入南海, 这股侵入的海水进入南海后立刻分为明显的两支. 一支很快通过吕宋海峡北部返回太平洋. 另一支则深入南海汇入南海环流系统. 从年平均的意义上说, 南海环流的基本形态受一个中心大约在 15°N, 114°E 的海盆尺度的气旋式流圈所控制(见图 6(a)). 从年平均环流结构看, 气旋式流圈中心偏向北部, 这与南海南部夏季受反气旋环流控制有关.

图 6(b)示出南海冬季的流函数分布. 海盆尺度的气旋式流圈在冬季得到充分的发育. 并且在南海南部出现一个很强的气旋式流圈, 其中心大约在 9°N, 112°E, 这也就是 Fang 等<sup>[1]</sup>指出的南海南部气旋流圈(SCS Southern Cyclonic Gyre). 在 Wyrтки<sup>[14]</sup>的冬季海水输运图中, 该流圈中心大约在 12°N, 110°E. 根据徐锡桢等<sup>[15]</sup>, 其中心位于 6.5°N, 109°E 附近. 而根据 Fang 等<sup>[16]</sup>的数值模拟结果, 其中心大约在 6°N, 111°E. 可见本研究的结果介于他们的结果之间, 与前人的认识基本符合. 图 6(d)显示的是夏季的流函数. 图中可以清晰地看出分别位于南海北部和南部的两个流圈. 与冬季的流圈相比, 这两个流圈都不是很强. 北部的流圈为气旋式的. 南部的流圈为反气旋式的, 也即 Fang 等<sup>[1]</sup>所说的南海南部反气旋流圈(SCS Southern Anticyclonic Gyre). 在这两个流圈之间, 越南东南离岸流(SE Vietnam Off-Shore Current)<sup>[1]</sup>可以很明显地看出.

图 6(c)和 6(d)分别示出南海春季和秋季的流函数分布. 春季和秋季的流函数分布明显地具有夏季和冬季之间过渡期的性质. 春季的流函数分布较接近夏季, 而秋季则较接近冬季.

从图 6 还可以看到, 不论春、夏、秋、冬, 南海北部陆坡附近均受气旋式环流控制, 与苏纪兰<sup>[3]</sup>分析一致.

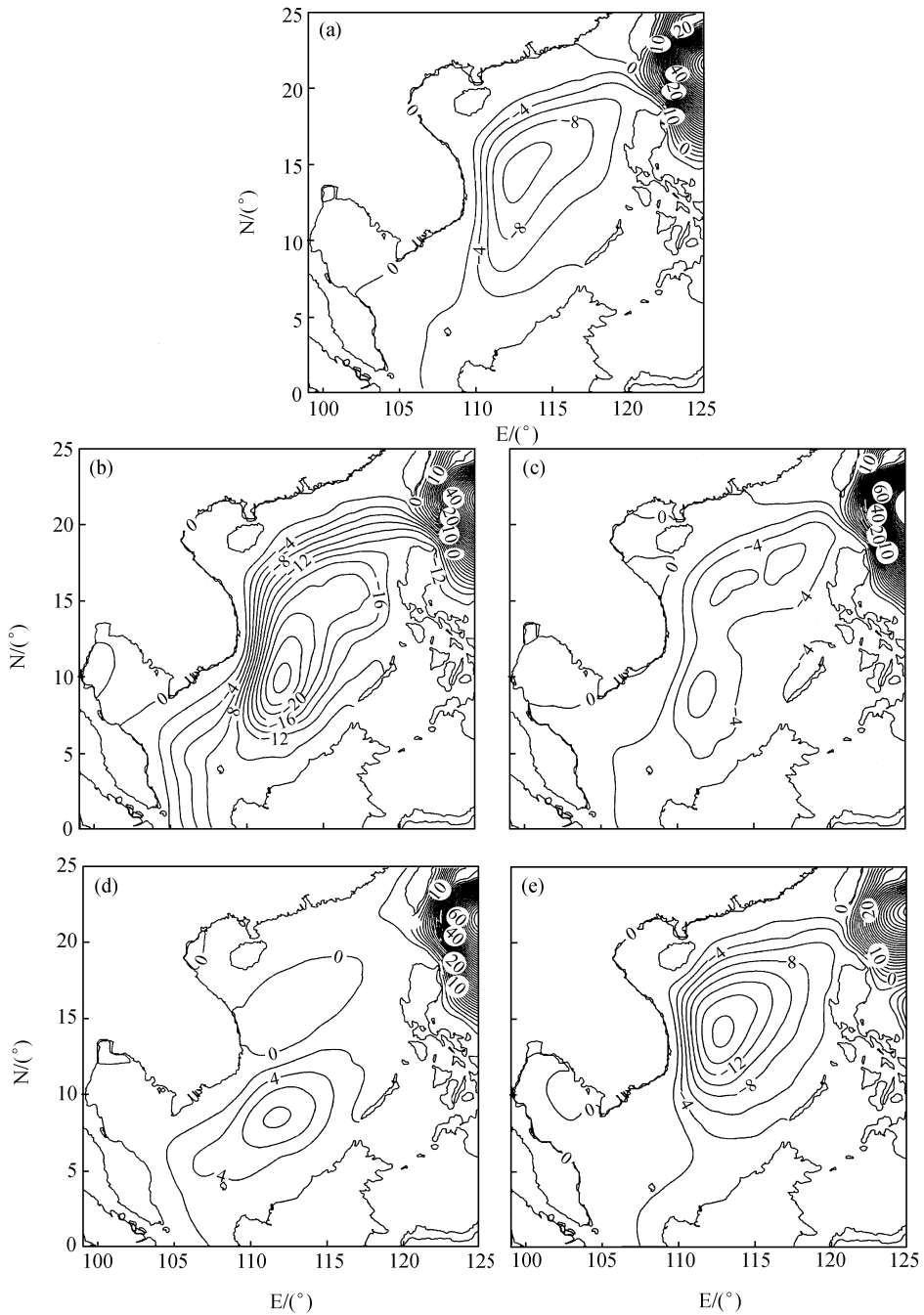


图 6 模拟所得南海海水输运流函数(单位: Sv)

(a) 年平均; (b) 1 月; (c) 4 月; (d) 7 月; (e) 10 月

南海南部的马六甲海峡和卡里马塔海峡全年的大部分月份都有海水流出南海. 而且在冬季的几个月中输运值明显比夏季强. 这应该是受全球大传送带热盐环流和东亚季风的影响.

从图 6 看出, 终年有海水从太平洋通过吕宋海峡进入南海. 而由上节讨论的南海海面高度得到的结论, 在夏季, 上层海水没有入侵南海(图 5(d)). 而从图 6(d)可以看出, 对于整层海水来说仍然有海水通过吕宋海峡进入南海. 因此, 从图 5(d)和图 6(d)的差异可以得出这样的结论,

在夏季,虽然上层海水没有通过吕宋海峡入侵南海,但仍然有海水在中层和深层通过吕宋海峡流入南海.吕宋海峡断面的纬向流速分布亦可证实这一点(图略).

## 5 结语和讨论

根据以上的描述和分析,可以得到以下的一些结论:

(1) 对于表层海水来说,黑潮在冬、春和秋季均通过吕宋海峡入侵南海,夏季则没有入侵.但对于整个海水而言,全年均有海水从太平洋通过吕宋海峡进入南海.这一差异表明,在夏季太平洋的海水是在次表层和中层入侵南海.

(2) 南海北部陆坡附近终年均受气旋式环流控制.夏季的南海南部反气旋流圈、越南东南离岸流和冬季的南海南部气旋流圈在模式中都得到了很好的再现.

(3) 模拟所得的南海海面高度距平与 TOPEX/POSEIDON 卫星遥感资料相当一致.南海海面高度和海面高度距平之间的差异明显,这一差异表明,在利用卫星高度计资料研究南海的上层环流时,年平均海面高度是非常重要的.

本文用嵌套于全球大洋环流数值模式中的中国近海高分辨率数值模式来研究南海的环流,从结果看是相当成功的.这种模式摒弃了以前那种区域模式中侧开边界条件设定的人为因素,更有利于模拟和研究南海与外海的相互作用.

**致谢** 本文所用的卫星高度计 T/P 资料由美国 NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center at the Jet Propulsion Laboratory / California Institute of Technology 提供.

## 参 考 文 献

- 1 Fang G, Fang W, Fang Y, et al. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. *Acta Oceanogr Taiwan*, 1998, 37: 1 ~ 16
- 2 Hu J, Kawamura H, Hong H and Qi Y. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea Warm Current and Kuroshio intrusion. *J Oceanogr*, 2000, 56: 607 ~ 624
- 3 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究. *海洋学报*, 2001, 23: 1 ~ 16
- 4 王卫强, 王东晓, 施 平, 等. 南海上层海洋大尺度环流的建立与调整. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(12): 995 ~ 1002
- 5 方国洪, 魏泽勋, 崔秉昊, 等. 中国近海域际水、热、盐运输: 全球变网格模式结果. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(12): 969 ~ 977
- 6 Bryan K. A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *J Comp Phys*, 1969, 4: 347 ~ 376
- 7 Choi B, Wei Z, Fang G, et al. A nested OGCM simulations with restart dataset-strategy for simulating fine structures of circulation for NW Pacific. *Proc Coast Ocean Eng Kor*, 2000, 11: 182 ~ 187
- 8 Hellerman S, Rosenstein M. Normal monthly wind stress over the World Ocean with error estimates. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 1093 ~ 11042
- 9 Levitus S, Boyer T. *World Ocean Atlas*. Washington D C: NOAA, 1994. 1 ~ 117
- 10 方国洪, 魏泽勋, 方 越, 等. 依据海洋环流模式和大地水准测量获取的中国近海平均海面高度分布. *科学通报*, 2001, 46(18): 1572 ~ 1575
- 11 李 立, 吴日升, 郭小钢. 南海的季节环流. *海洋学报*, 2000, 22(6): 13 ~ 25
- 12 Ho C -R, Zheng Q, Soong Y S, et al. Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/Poseidon altimeter data. *J Geophys Res*, 2000, 115(C6): 13981 ~ 13990
- 13 Qu T. Upper-layer circulation in the South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 1450 ~ 1460
- 14 Wyrtki K. *Physical Oceanography of Southeast Asian Waters*. La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, 1961. 1 ~ 195
- 15 徐锡桢, 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
- 16 Fang Y, Fang G, Yu K. ADI barotropic ocean model for simulation of Kuroshio intrusion into China southeastern waters. *Chin J Oceanol Limnol*, 1996, 14: 357 ~ 366