

南海季风性海流的建立与调整*

王卫强^{①②} 王东晓^① 施平^{①②} 郭佩芳^② 甘子钧^①

(①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; ②青岛海洋大学海洋环境学院, 青岛 266003)

摘要 通过一个高分辨(1/6 度×1/6 度)南海环流模式, 在旋转加快(spin-up)过程中分析了南海上层海洋季风驱动下海盆尺度环流特征建立的方式与内在机制, 分析了南海自静止态至海盆尺度环流特征初步形成的过程, 揭示了此过程中边界截获 Kelvin 波和西传斜压 Rossby 波的重要作用, 由此估算了南海上层海洋季风性海流调整的特征时间尺度.

关键词 Rossby 波 边界截获 Kelvin 波 季风性海流

南海是西太平洋最大的半封闭深水边缘海. 与大洋相比, 南海环流具有明显的瞬变特征, 这主要是由于海盆尺度较小且季风强迫多变所导致的. 近年来, 由于南海环流动力学, 特别是南海环流数值模拟方面的较大进展^[1,2], 为研究南海环流的建立与调整打下了坚实的基础. 南海海盆尺度环流态的建立, 有其不同于大洋的边缘海特点和表现形式. 目前, 尚未有类似的研究剖析南海海盆尺度环流态建立的内在机制. 研究南海环流建立和调整的机制, 就是探讨能量和质量如何通过海洋内部动力过程(主要是大尺度波动)再分配, 从而达到对整个海域环流的调整, 这是本文的切入点.

近年来, 大量的研究集中于长 Rossby 波对大洋内区的重要影响, 以及短 Rossby 波对西边界强流的作用^[3,4], 只有少量涉及中纬度大洋的低频变化中 Kelvin 波的作用及其与行星 Rossby 波的相互作用^[5]. Anderson 和 Gill^[6]较早的研究了层化海洋的旋转加快过程中的 Rossby 波的作用, 描述了在初始风应力的作用下, Sverdrup 内区解的建立以及达到稳定态的过程. 在中纬度海洋, 行星 Rossby 波和边界截获 Kelvin 波的相互作用对于大尺度环流态的建立与调整起着至关重要的作用. Liu 等^[5]通过一个中纬度大洋的封闭海盆的理想化模型, 分析 Rossby 波和 Kelvin 波的相互作用及其通过对能量和质量的再分配, 在环流调整过程中所做的贡献. 以上的研究大多关注于赤道或是大洋的各种波动现象. 而较少关注具备不规则岸界、实际的海盆地形的边缘海波动现象的研究. Schwab 等^[7]利用多个复杂程度不一的有限差分模式, 研究理想化的不规则岸边界对边界 Kelvin 波传播有重要影响, 结果表明 Kelvin 波相速度依赖于网格分辨率和波动传播与网格所成的角度. 由此可见, 研究南海这样一个有着复杂侧边界的边缘海环流的建立过程是非常有科学意义的.

本文拟通过高分辨的数值环流模式, 在瞬时启动的固定风场强迫下, 分析静止状态到季风性环流形势的建立过程中, 在定性的概念上, 认识大尺度波动在南海环流态建立不同阶段

2002-01-22 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G1999043806)和中国科学院资源环境领域知识创新工程项目(编号: KZCX2-202)联合资助

的相对重要性, 从而对南海在季风强迫下的内部响应机制做进一步的探讨.

1 模式

本文采用水平 $1/6^\circ \times 1/6^\circ$ 度高分辨率, 垂向 σ 坐标、分 16 层的普林斯顿海洋环流模式 (POM)^[8]. 计算区域为 $99.25^\circ \sim 124.75^\circ \text{E}$, $0.25^\circ \sim 24.75^\circ \text{N}$, 最小深度为 20 m, 最大深度为 1000 m^1 . 计算区域有 4 个开边界, 分别为吕宋岛外, 台湾岛外, 台湾海峡和巽它陆架(见图 1 中的 ABCD 4 个水平边界). 边界处给定 1 月份气候态流量^[9], 保持内区进出流量平衡, 风应力采用 COADS 气候态 1 月份数据, 初始温盐场采用气候态 1 月份的 Levitus 资料. 取斜压步长为 1500s, 正压步长为 30s, 水平扩散系数采用 Smagorinsky 关系, 垂直扩散系数由二阶湍封闭方程提供. 模式从静止状态开始积分.

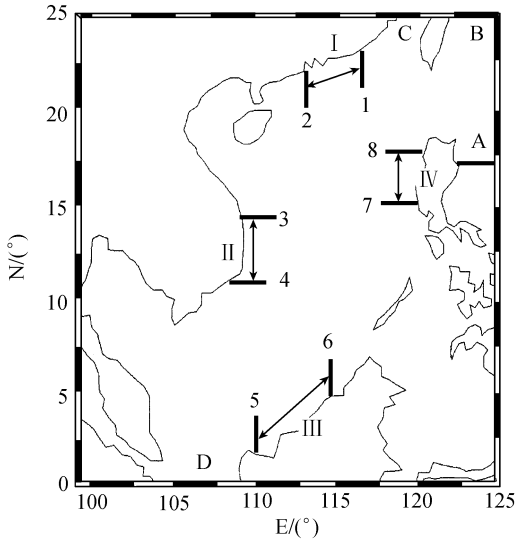


图 1 模式海洋边界及所选取的截面

粗横线为所选取的截面, 标记为 1~8; 双箭头粗线为所选取的 4 个截面, 标记为 I~IV; A, B, C, D 为模式的 4 个开边界

海洋中的波动是一种瞬变的过程, 波动的传播信息在粗分辨率的数值模式中无法被分辨. 因此在研究南海环流建立过程的数值模拟中, 必须凭借高分辨率的数值模式, 才能有效分辨各种波动. 本文正是基于这一点而设计的.

2 结果分析

对海洋环流的建立与调整体现在计算区域能量演变和质量的再分配. 从模式在 spin-up 阶段的正压总动能(图 2)来看, 能量具有 3 个调整阶段, 即快速增长阶段、缓慢增长和动态调整阶段, 分别在第 12, 30 及 85 天左右完成. 模式在瞬时启动的固定风场强迫下, 持续的动能输入使得计算区域的正压总能量经历快速增长和缓慢增长两个阶段, 达到过饱和状态, 即能量的过调整(over-shooting), 之后在动态调整阶段的作用下, 内区总正压动能逐渐趋于稳定.

模式响应海面强迫的初期, 由于艾克曼效应, 质量向西边界输运, 水体在西边界处堆积. 根据 Gill 理论^[10], 旋转流体在压力梯度存在时会产生地转适应, 质量在地转适应

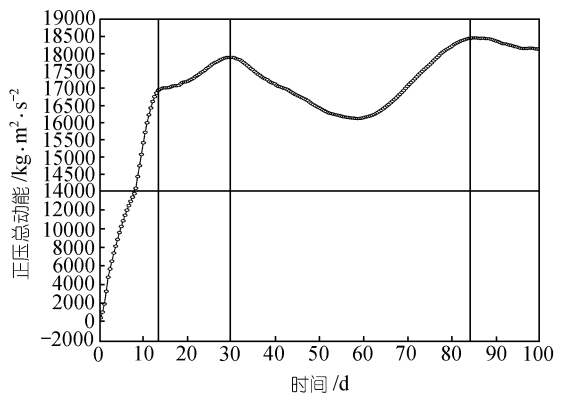


图 2 计算区域正压总动能变化

纵轴坐标以 $14000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ 为界, 上下标尺间隔不同, 以上间隔为 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$, 以下间隔为 $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$

1) 这样设定没有考虑深层环流以及底层混合作用对上层环流的影响. 本文针对对在 spin-up 过程中上层海洋季风性环流的建立, 因此如此设定有其合理之处

作用下向南输送, 以重力波的形式体现. 在南海边界处重力波相速在 20~200 m/s, 以至于从本文数模结果无法清晰捕捉重力波的传播. 然而, 地转适应在第一个阶段所做的贡献从图 3 可以看到, 在上层海洋能量的快速增长阶段完成之后, 南海正压流场出现西边界强流, 从广东沿岸一直向南延伸至巽它陆架, 并在吕宋岛左侧形成海面起伏的低值区. 这一阶段质量在南海西边界和南部堆积.

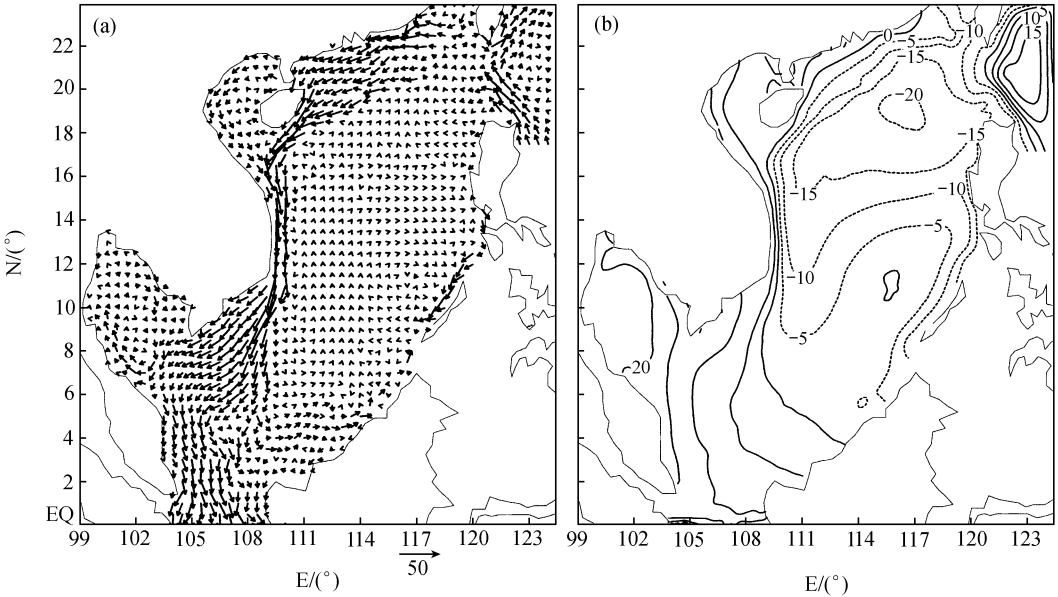


图 3 模式积分第 12 d 的正压环流和海面起伏分布
(a) 正压流场(单位: cm); (b) 海面起伏(单位: cm)

在上层海洋能量的缓速增长过程中, 激发了边界截获的 Kelvin 波, 沿西边界绕行南海^[11]. Kelvin 波的传播会引起局地水位和输运量的变化, 这是一个对整个海域水体质量分布进行调整的过程. 因此, 为捕捉 Kelvin 波绕行南海岸界的传播信息, 分别在广东沿岸、越南沿岸、加里曼丹岛沿岸及吕宋岛沿岸各选取两个截面, 每个截面长 1 度, 共 8 个纬向截面(标记为 1~8, 截面位置见图 1).

在各纬向截面上各选一点, 观察各点处的海面起伏距平(图 4). 广东沿岸的海面起伏距平在第 5 d 左右达到极值, 而越南沿岸的海面起伏距平在第 9 d 左右达到极值, 加里曼丹岛沿岸及吕宋岛沿岸分别第 15 和 27 d 左右达到海面起伏距平的极值. 这反映了边界 Kelvin 波沿南海岸界的传播, 从各截面的质量输运(图 5)亦可以得到相同的波动传播信息. 说明 Kelvin 波在一个月绕南海一周, 完成对海盆尺度环流的调整, 这对应了整个海域正压动能缓慢增长过程的结束.

为了进一步探测 Kelvin 波在南海的绕行, 本文选取 I~IV 4 个沿岸截面(图 1), 绘制海面起伏的时间-经(纬)度图, 在验证 Kelvin 波沿边界绕行的同时, 估算了 Kelvin 波的相速(图 6). 由于南海地形复杂, 局地海水层化效应影响不一, 因此在南海的不同区域 Kelvin 波的相速有所不同. I~IV 4 个截面的估计相速分别为 2.3, 3.6, 2.5, 2 m/s, 相速度量级与陈大可等^[12]对中国

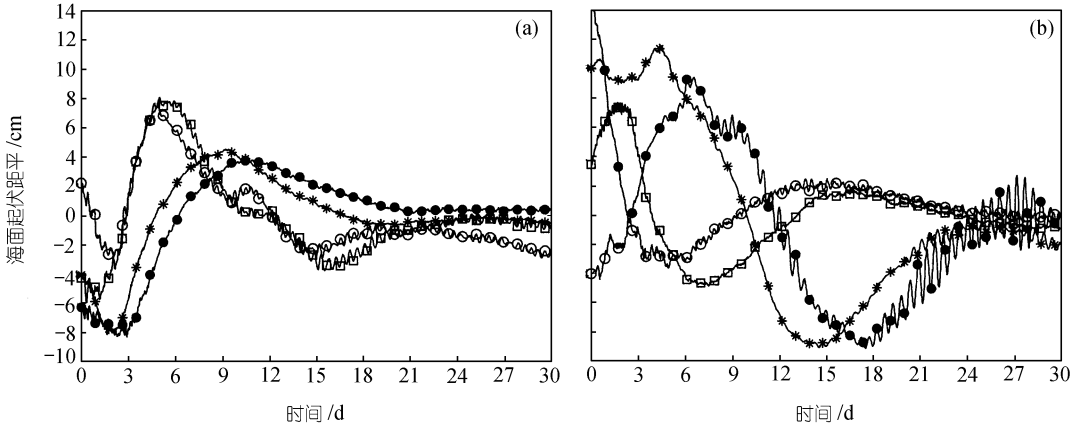


图 4 所选取各点处海面起伏距平图

(a) ○示(117°E, 22.75°N)点, □示(113°E, 21.75°N)点, *示(109°E, 14°N)点, ●示(108°E, 11°N)点; (b) ○示(110°E, 2.25°N)点, □示(115°E, 5.25°N)点, *示(119°E, 15°N)点, ●示(120°E, 18°N)点

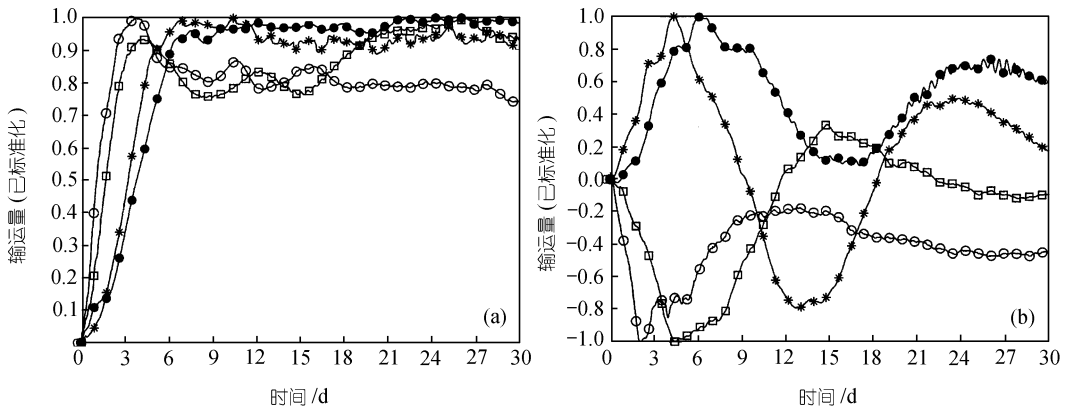


图 5 所选取各截面处体积运输

(a) ○示 117°E(截面 1), □示 113°E(截面 2), *示 14°N(截面 3), ●示 11°N 断面(截面 4); (b) ○示 110°E(截面 5), □示 115°E(截面 6), *示 15°N(截面 7), ●示 18°N 断面(截面 8)

沿岸陆架波的研究中得到的结论较为一致. II、III 截面上相速略大于其他两个截面. 与甘子钧等^[13]的 Kelvin 波相速理论计算值相比较后发现, 除了在 I 截面上量值有较大分别外, 其他截面上量值相当. 略有差异的原因可能是由于本文模式地形与实际地形不符、计算波的出现以及不同模态波解的叠加, 上述因素都在一定程度上扭曲了各截面中的边界截获 Kelvin 波的相速.

海洋波动理论认为, Kelvin 波沿东西边界传播时, 在边界上处处激发 Rossby 波. 在西岸激发的短 Rossby 波^[6], 被边界截获, 能量被快速耗散; 而在东岸激发的长 Rossby 波则西传, 纬度越低, 相速越快^[14]. 在上层海洋环流的动态调整阶段中, 局地扰动产生的 Rossby 波与东边界 Kelvin 波所激发的长 Rossby 波相叠加, 在月的时间尺度上, 体现出类似第一斜压模的传播特性. 如图 7 所示, 在 18°N 截面上, 斜压 Rossby 波相速约 0.16 m/s, 传到西岸大约要 3 个月左右, 与现有的观测事实相符^[15]. 低纬的斜压 Rossby 波则以较快的相速向南海西海岸传播, 以

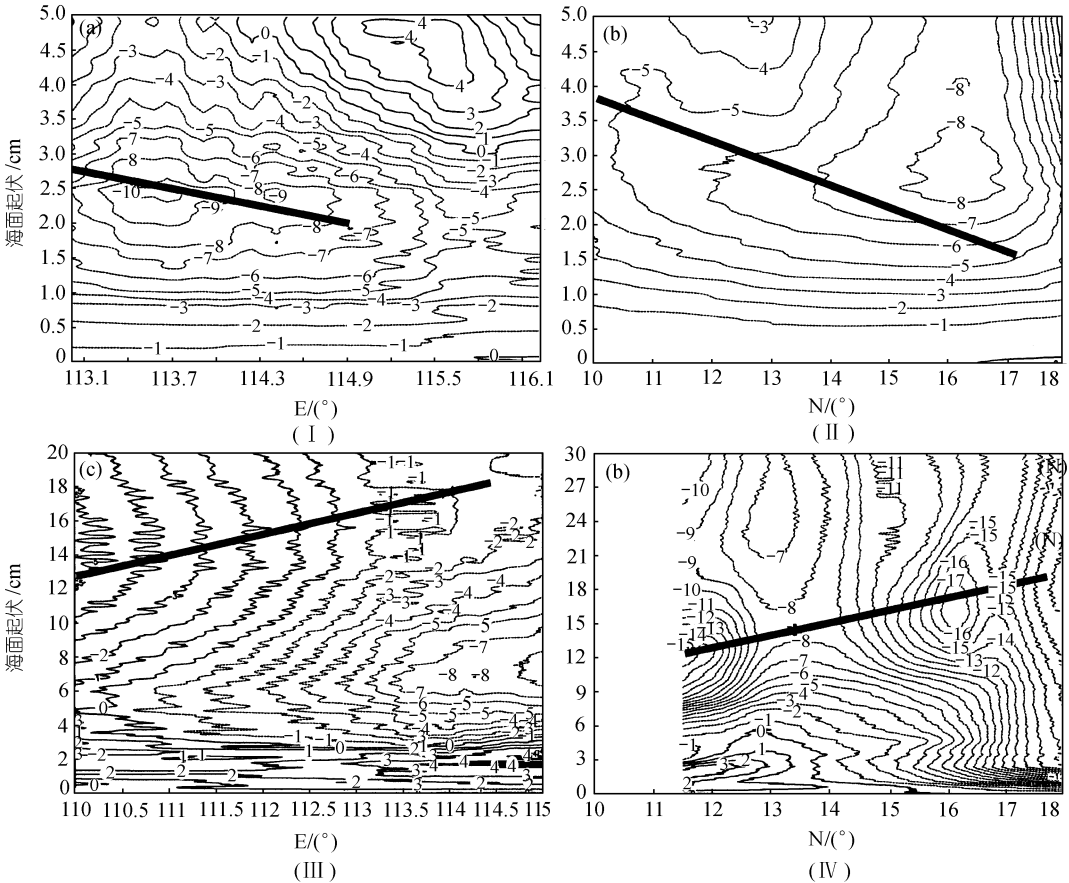


图 6 I~IV 截面上海面起伏的经度(纬度)-时间图
 图上所标黑线为估算波动传播轨迹, 由此可以估算波动的相速

14°N 为例, 传到西岸大约 70 d 左右, 相速约 0.2 m/s. 而在 8°N 和 6°N 截面上, 由于被其他的波动所扭曲, 而从海面起伏上看不到斜压 Rossby 波传到西岸. 这是因为模式无法从海面起伏上捕捉到纯的第一模态的斜压 Rossby 波, 但在 8°N 截面上, 仅从其传播到 105°E 附近来计算, 其相速约 0.23 m/s, 与蔡树群等^[16]用两层模式计算得到的结果一致, 且与第一斜压模的理论相速量值相当. 这印证了斜压 Rossby 波随纬度增加而相速愈小的特性, 并与甘子钧等^[13]的理论斜压 Rossby 波在南海的相速分布比较一致.

当最慢一列斜压 Rossby 波(从吕宋岛最北端处激发)西传至南海西海岸时, 动态调整阶段完成, 南海海盆尺度环流初态建立. 此时, 南海海盆尺度环流呈现气旋式环流态势. 以海面起伏为例, 逐渐产生冬季双冷涡结构的趋势(图 8), 这说明在能量的动态调整阶段, 在斜压 Rossby 波的调整下, 相比于能量的缓慢增长阶段, 质量的再分配使得南海海面高度场趋向有序, 这与冬季南海海盆尺度海面高度形态是相符的^[17]. 以估计得到的 18°N 处的第一斜压 Rossby 波相速来看, 从南海东海岸传到西海岸, 约费时 3 个月左右, 由此得到南海上层海洋海盆尺度环流建立的特征时间尺度.

在南海上层海洋环流的缓慢调整过程中, 边界截获 Kelvin 波绕行南海岸界, 对于质量和

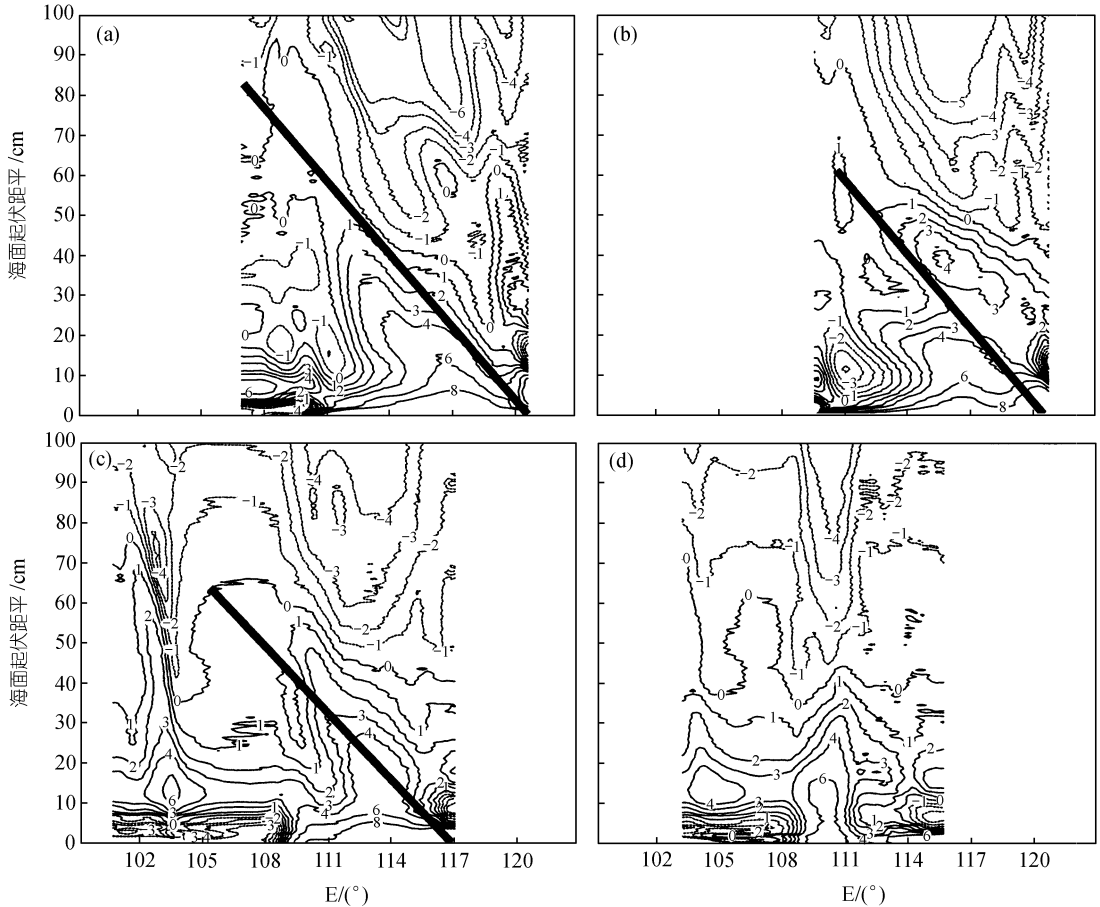


图 7 模式积分前 100 d 海面起伏的经度-时间纬度图(已扣除纬向平均)

(a) 18°N; (b) 14°N; (c) 8°N; (d) 6°N 图上所标黑线为估算波动传播轨迹, 由此可以估算波动的相速

能量的再分配起主导作用. 而在动态调整阶段, 在南海东海岸处的西传 Rossby 波对环流态的调整占据重要地位. 如图 9, 形象地表达了在此过程中, Kelvin 波绕行南海岸界的传播及南海东海岸激发的斜压 Rossby 波的西传(纬度越低, 相速越慢)等一系列现象.

3 结语

在季节性翻转的季风强迫下, 上层海洋的瞬时调整使得从严格意义上来讲南海不具备平均意义下的环流态. 因此对于南海来说, 研究海盆尺度环流的建立与调整具有十分明显的理论意义. 研究像南海这样的边缘海环流的建立和调整, 则需要深入探讨 Kelvin 波和 Rossby 波在此过程中的相互作用及不同阶段的相对重要性.

本文应用一个高分辨率的海洋环流模式, 在旋转加快之始, 以冬季(1 月份)强大的东北季风驱动. 因艾克曼效应, 水体在西边界堆积, 在地转适应作用下质量在南海南部输运, 形成西边界强流及吕宋岛北部冷涡. 在上层海洋能量的缓慢增长阶段, 辐合辐散导致边界截获 Kelvin 波的产生, 自广东海岸沿边界绕行南海, 传到吕宋岛之后传出南海, 费时约 30 d 左右.

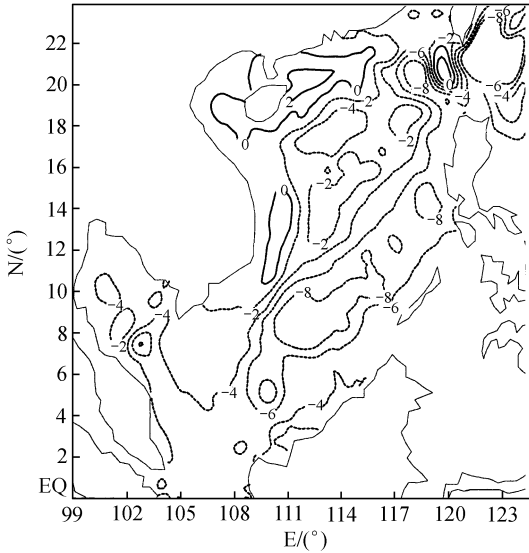


图 8 模式积分第 85 d 与第 30 d 海面起伏的差值场 (单位: cm)

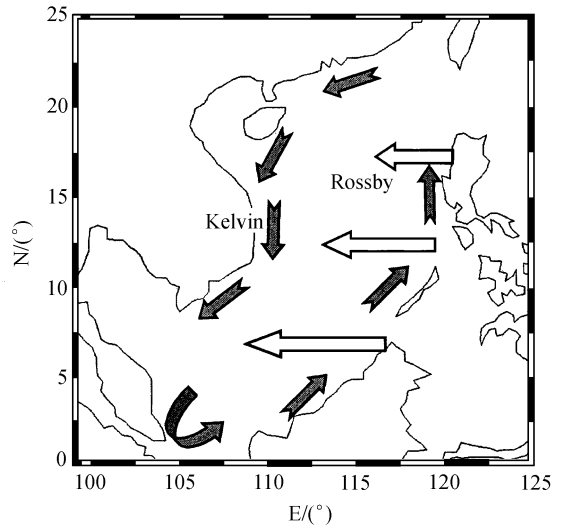


图 9 南海季风性环流建立与调整示意图
黑色箭头表示 Kelvin 波沿南海岸界的传播, 白色箭头表示西岸激发的 Rossby 波西传(白色箭头大小示相速快慢)

在上层海洋能量的动态调整阶段, 边界截获 Kelvin 波在边界上处处激发 Rossby 波, 与局地扰动产生的 Rossby 波叠加, 呈现出类似第一斜压模的传播特征. 南海西海岸激发的短 Rossby 波被边界截获, 东边界的长 Rossby 波西传. 随着在吕宋岛最北端的斜压 Rossby 波传到西海岸, 南海海盆尺度环流初态的建立才最终完成, 历时 3 个月左右(即南海大尺度环流建立的特征尺度).

应特别指出的是, 本文着重分析了旋转加快过程, 而实际海洋在响应长期强迫时会在第一斜压模态之后激发出高阶斜压模态, 这些模态对南海环流的季节演变起到了一定的作用^[18].

参 考 文 献

- 1 苏纪兰. 南海北部环流的动力学. 苏纪兰主编: 南海环境与资源基础研究前瞻. 北京: 海洋出版社, 2001
- 2 王东晓. 南海环流多时空尺度与局地海气相互作用. 苏纪兰主编: 南海环境与资源基础研究前瞻. 北京: 海洋出版社, 2001
- 3 Pedlosky J. A note on the western intensification of the oceanic circulation. *J Mar Res*, 1965, 23: 207~210
- 4 Pedlosky J. *Geophysical Fluid Dynamics*. New York: Springer-Verlag, 1987. 710
- 5 Liu Z, Wu L, Bayler E. Rossby wave-coastal Kelvin wave interaction in the extratropics. Part I: Low-frequency adjustment in a closed basin. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 2382~2404
- 6 Anderson D L T, Gill A E. Spin-up of a stratified ocean, with application to upwelling. *Deep-Sea Res*, 1975, 22: 593~596
- 7 Schwab D J, Beletsky D. Propagation of Kelvin waves along irregular coastlines in finite-difference models. *Advances in Water Resources*, 1998, 22(3): 239~245
- 8 Mellor G L. *User's Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences. Princeton: University Princeton, 1998
- 9 Wyrski K. Physical oceanography of the southeast Asian waters. Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand. In NAGA Report, Vol. 2. La Jolla Calif: Scripps Inst. Of Oceanogra, 1961. 195
- 10 Gill A E. Adjustment under gravity in a rotating channes. *J Fluid Mech*, 1976, 77: 603~621

- 11 Wajsowicz R C, Gill A E. Adjustment of the ocean under buoyancy forces. Part I: the role of Kelvin waves. *J Phys Oceanogr*, 1986, 16: 2097~2114
- 12 陈大可, 苏纪兰. 中国沿岸陆架波的初步研究. *海洋学报*, 1987, 9(1): 1~15
- 13 甘子钧, 蔡树群. 南海罗斯贝变形半径的地理及季节变化. *热带海洋学报*, 2001, 20(1): 1~9
- 14 Wajsowicz R C. Adjustment of the ocean under buoyancy forces. Part II: the role of Planetary waves. *J Phys Oceanogr*, 1986, 16: 2115~2136
- 15 Hu J Y, Kaawamura H, Honget H S, et al. 3~6 months variation of sea surface height in the South China Sea and its adjacent ocean. *J Ocean*, 2001, 57: 69~78
- 16 蔡树群, 苏纪兰, 甘子钧, 等. 冬季南海上层环流动力机制的数值研究. *海洋学报*, 2001, 23(5): 14~23
- 17 Liu Z, Yang H, Liu Q. Regional Dynamics of Seasonal Variability of Sea Surface Height in the South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31: 272~284
- 18 Isobe A, Namba T. The circulation in the upper and intermediate layers of the South China Sea. *J Ocean*, 2001, 57: 99~104