1997-1998 年南海暖事件

王东晓^① 谢强^① 杜岩^{①②} 王卫强^{①②} 陈举^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.

E-mail: dxwang@sccsio.ac.cn)

摘要 通过海面温度、海面高度、风应力和次表层温度资料的合成分析发现, 1997 年春、夏季至 1999 年春季南海发生了强烈的暖事件, 与发生在南海北部的赤潮灾害事件、海南岛附近的珊瑚死亡(白花)现象以及长江中、下游 1997 和 1998 年洪涝灾害相对应. 1997 年南海海面温度距平发展阶段, 南风距平导致的暖平流为正距平发展主要因子. 而 1998 年夏季海温距平进入维持阶段, 此时深水区温跃层加深、明显下凸, 海盆中央维持系统的海面高度正距平导致了下降流模态.

关键词 南海 平流模态 下降流模态 暖事件

季风系统的年际变化在国际气候变化与可预报性研究计划(CLIVAR)中地位举足轻重, 这主要是因为季风活动异常对其他重要的气候异常事件有一定的影响. 例如亚洲季风系统, 特别是包括南海夏季风在内的东亚季风与 El Niño 事件存在相互作用^[1]. 南海是季风盛行的热带边缘海, 西太平洋和东印度洋与南海有着一定的水体交换^[2], 这些海域的海洋和大气环流具有显著的年际变化, 势必影响南海局地海-气系统. 众多的观测证据充分证明南海参与了热带气候系统的韵律, 如热带太平洋的 ENSO 事件^[3]. 王东晓等人^[4]通过资料分析揭示了南海存在区域耦合现象: 当南海盛行南风异常时, 海面温度(SST)表现为正距平; 盛行北风异常时, SST 负距平得到发展.

本文通过对 1997-1998 年 El Niño 事件和 1998 年 La Niña 事件期间南海 SST, 风应力, 海面高度和温跃层的定性分析和定量诊断, 发现在 1997-1998 年南海发生了强烈的暖事件. 与以往的暖事件不同, 本次事件 SST 距平与经向风异常的正相关关系只在暖事件建立和发展的阶段成立. 当暖事件进入维持阶段, 由于 El Niño 事件的结束, 南海海面异常南风距平消退, 甚至表现为异常北风. 定量诊断的结果说明暖事件的长久维持是由于下降流模态的控制, 即异常的下沉运动使得南海的温跃层加深, 从而使得正海表温度异常(SSTA)在南海长久维持.

1 资料来源

最优插值海表面温度(OISST)是通过最优插值方法将现场和卫星遥感 SST 进行分析得到的逐周 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的分析场资料^[5]. 由 18 年(1982~1999 年)资料得到 SST 气候平均场逐月分布, 从而得到逐月的

海表温度异常. 其他资料包括: $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率美国佛罗里达大学伪风应力月平均资料^[6]、美国环境预报中心(NCEP)再分析资料^[7]、 $5^\circ \times 2^\circ$ 上层海洋(0~400 m)可抛弃式温深仪资料^[8]和 TOPEX/Poseidon 卫星遥感海面高度距平(SSHA).

2 暖事件演变过程

为了分析南海年际变化, 本文定义南海全区平均 SSTA 为南海海温指数. 从 1982~1999 年南海海温指数和南方涛动指数(SOI)的时间序列图中可以看到, 在热带太平洋的每一次冷暖事件的一段时间后, 南海海盆都发生了一起性质相同的局地事件. 王东晓等人^[4]通过 1945~1989 年海洋大气综合资料集南海中部 SSTA 与 SOI 分析得到南海 SSTA 年际变化滞后 ENSO 的时间为 5 个月. 虽然本文采用不同的 SST 资料, 但从图 1(a)中仍然可以清晰地判断出 5 个月的滞后时间. 从 1982~1999 年南海海温指数看, 在强度上南海的暖事件与 ENSO 事件并没有确切的对应关系. 例如, 1982-1983 年的强 ENSO 事件并没有跟随一个强的南海暖事件, 而 1986-1987 年的 ENSO 之后在南海却有一次较强的增温过程.

几十年来, 最强的南海暖事件发生在 1997-1998 年. 南海全区平均 SSTA 高于 0.5°C 的时间持续了 18 个月左右, 而局地高于 0.5°C 的 SSTA 在南海滞留时间多于 2 年. 1997-1998 年南海暖事件的发生、发展对应了热带太平洋 ENSO 事件的发展, 两者几乎同时在 1997-1998 年冬季(具体而言为 1998 年 1 月左右)达到顶峰(图 1(b)).

1997 年东亚夏季风偏强, 冬季风偏弱, 南海海面风距平为一致的南风距平(图 2). 南海大部分海域(除

图 1 南海全区平均 SSTA, 南方涛动指数(SOI)和南海全区平均海气热通量的时间序列
(a) 1982 年 1 月至 1999 年 12 月; (b) 1996 年 1 月至 1999 年 12 月. SOI 经标准化, 海气热通量取自 NCEP 再分析资料. 圈点线为 SOI, 柱状线为南海全区平均 SSTA, 实线为海-气热通量距平(单位 W/m^2 , 缩小到 1/10, 正值代表海洋得到热量)

东边界外)海温正距平在 $1^{\circ}C$ 以上. 在这一阶段, 热带太平洋和热带印度洋“齿轮式耦合”过程^[9]诱导的大尺度低层风异常盛行于东亚季风区, 南海海面风的南风距平是上述大尺度环流异常的一种体现(图略).

随着热带东太平洋由 El Niño 暖事件向 La Niña 冷事件转换以及热带印度洋偶极子的结束^[10], 南海海面的南风距平消退, 甚至在 1998 年夏季表现为北风距平(图 2). 这对应了 1998 年南海夏季风偏弱, 而此时南海海温距平进入维持阶段, 高 SSTA 位于北部深水区域及泰国湾附近. 由此可见, 当热带太平洋 La Niña 冷事件发展时, 南海仍然维持异常暖. 南海表层对 1998 年偏弱的夏季风和 1997 年偏强的夏季风有不同的响应. 由于南风距平增加了越南附近的离岸流, 1997 年夏季越南沿岸的冷涡强烈发展; 而在 1998 年夏季北风距平驱动下, 夏季越南沿岸的冷涡不明显(参见图 4 的 SST 分布). 苏纪兰等人^[11]基于 SCSMEX 的水文观测分析, 揭示了 1998 年南海夏季越南沿岸有反气旋暖涡存在, 这显然与夏季北风距

平的驱动有关.

在 1998-1999 年冬季, 南海南部海温正距平开始消退, 海面风场距平表现南、北相对型, 即北部为北风距平, 南部则为南风距平, 这实际上是由于南海高压偏弱所致下层大气气旋式距平风场的一种体现.

上述分析已经发现南海暖事件期间表层热状况持续异常. 1997-1998 年南海暖事件期间温跃层又是如何调整的? 图 3 给出南海 $115^{\circ}E$ 经向-垂向剖面季节平均海温距平, 同时叠加了实际温跃层深度(以 $20^{\circ}C$ 等温线表示)和对应季节多年平均的温跃层深度. 可以看到, 南海 1997 年夏季至 1997-1998 年冬季(本文定义为暖事件发展阶段), 海温正距平只限于混合层内($<50 m$), 而此期间在温跃层的层次上维持负距平. 对比温跃层深度发现, 实际温跃层深度要略浅于气候平均的温跃层深度, 即温跃层出现浮升(shoaling)现象. 在动力学上, 这是由于海面气旋式 Ekman 抽吸的存在, 从而导致了温跃层处的上升运动.

1998 年春季, 温跃层的深度趋于正常态势. 1998 年夏季在该断面的南部和北部温跃层的温度距平同时转捩, 表现为正距平, 负距平仍然在断面中部存在, 但强度已明显减弱(图 4). 温跃层处的正距平对应了该处温跃层的加深. 在 1998 年秋季和 1998-1999 年冬季, 由于温跃层的持续加深, 温跃层处的正距平不断得到发展. 对应的异常海面风应力分布为反气旋态势, 使得 Ekman 抽吸抑制了温跃层处的上升运动.

3 暖事件发展与维持的机制

通过平流模态和下降流模态的估计, 我们可以定量地诊断这两种因素在南海暖事件过程中不同时期的相对重要性.

混合层温度方程一般可以表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q}{D} - \mathbf{V} \cdot \nabla T - w_E \frac{\partial T}{\partial z} + A \nabla^2 T, \quad (1)$$

其中 $T, D, \mathbf{V}$ 是混合层温度、厚度和速度(矢量); Q 是海面加热函数; w_E 是 Ekman 抽吸速度, 此处近似为混合层底部的垂直运动; $\partial T / \partial z$ 是混合层底部处的温度垂向梯度; $A \nabla^2$ 是拉普拉斯扩散项.

由于海温局地变化项和侧向混合在热力学方程中一般为小量(在边界处除外), 热力学方程则变化为

$$\mathbf{V}_g \cdot \nabla T + w_E \frac{T_{\text{therm}} - T}{D} = \gamma(T - T^*). \quad (2)$$

上式中, $T_{\text{therm}} - T$ 代表对应季节平均混合层底部温度阶跃; 海面加热采用张弛形式参数化, T^* 为海面温

图 2 季节平均南海 SSTA 和海面风应力距平

图 3 季节平均南海 115°E 经向-垂向剖面海温距平
图中叠加了实际温跃层深度(以 20℃ 等温线表示, 图中粗断线)和对应季节的温跃层多年平均深度(细点划线).
DJF: 冬季; SON: 春季; JJA: 夏季; MAM: 秋季

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-9-711>

度气候值, $T - T^*$ 即为 SSTA.

南海暖事件发展阶段: 平流模态主导?

1997 年夏、秋、冬三季南海 SSTA 快速发展, 而此时南海上维持海面风的南风距平. 这种海面风距

平和南海 SSTA 的相关关系在以往的研究中已有许多探讨. 由于这一阶段海面海气热交换随季节而变, 难以成为恒定推动 SSTA 的发展的主要因素(图 1(b)); 海面风动力搅拌的减弱也是如此(图略). 与此同时, 温跃层浮升现象反映了下降流作用没有对暖事件发展有正贡献. 于是南风距平诱导海洋暖平流成为暖事件发展可能的主导因素.

以 1997 年夏季为例来分析本次暖事件的发展阶段. 从 TOPEX 卫星遥感 SSHA 可以诊断得到扣除长期平均态势的南海地转流. 由于此时盛行一致向北运动的地转流, 海盆尺度闭合型的气旋或反气旋环流结构不明显(图 5). 由图 5(a)计算得到纬向平均的地转流南北分量约为 0.2 m/s, 1997 年夏季 SST 经向梯度为 $1^{\circ}\text{C}/4^{\circ}$ 经度, SSTA 取为 1°C , 如果海面热力张弛时间尺度取为 50 天, 则有

$$O\left(\mathbf{V}_g \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right) \sim O(\gamma(T - T^*)), \quad (3)$$

所以在南海暖事件的发展阶段(1997 年夏至 1997-1998 年冬), 海温受平流模态控制. 还有一个很好的佐证是这一阶段上温跃层调整不明显(图 3), 海盆中央没有维持系统性的海面高度距平(图 5(a)).

南海暖事件的维持: 下降流模态主导?

在 SST 稳定维持阶段内, 南海 SSHA 在海盆中央维持一个异常高中心(图 5(b)), 由此诱导了一种距平环流态为反气旋式, 表明有异常辐合下沉的下降流维持. 这种反气旋上层环流在其他南海暖事件时期也曾出现^[12,13]. 对比温跃层深度分布可知, 此时温跃层下沉, 中央区有明显下凹现象(图 3). 以 1998 年春季为例, 由图 4(b)计算得到纬向平均的地转流南北分量约为 0.05 m/s, 1998 年春季 SST 经向梯度和 SSTA 仍为 1997 年夏季时的量值. Ekman 抽吸(向下为正)可以从风应力涡度计算得到, 为 $8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, $\frac{T_{\text{therm}} - T}{D}$ 约每 10 m 为 0.7°C , 则有

$$O\left(\mathbf{V}_g \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right) \ll O(\gamma(T - T^*)), \quad (4)$$
$$O\left(w_E \frac{T_{\text{therm}} - T}{D}\right) \sim O(\gamma(T - T^*)).$$

可见, 在南海暖事件的维持阶段(1998 年春~1998-1999 年冬)受下降流模态控制.

4 结语

通过上述分析, 可以得出关于 1997-1998 南海暖

图 4 季节平均南海地转流和 SST
(a) 1997 年夏季; (b) 1998 年春季. 地转流由卫星遥感 SSHA 诊断得到.
图下方为矢量标尺, 单位: m/s. 等值线间隔 0.2, 单位: $^{\circ}\text{C}$

图 5 季节平均南海 SSHA 距平
(a) 1997 年夏季; (b) 1998 年夏季. 等值线间隔 0.03, 单位: m

事件过程的动力学解释:

南海 1997 年夏季风偏强, 南海海面出现南风距平, 暖平流使得南海增暖, 这是本次强事件的发展阶段; 1997-1998 年冬季风偏弱, 南海暖事件继续发展. 随后南海海面风距平消退, 海盆中央维持了系统的

海面高度正距平, 导致大尺度环流辐合下沉, 抑制温跃层处的上升运动, 南海 SSTa 异常持续, 此为本次事件的维持阶段. 1997-1998 南海暖事件的特殊性在于: 在暖事件发展到一定阶段, 南海温跃层产生明显的调整; 由于温跃层记忆时间长, 暖事件得以长久维持.

对南海暖事件的分析与研究可以有助于解释为什么 1998 年在南海北部有频繁的赤潮发生^[14], 也能够为 1998 年南海珊瑚死亡的白花现象找到科学根据.

由于黑潮的入侵对南海北部环流有重要的影响, ENSO 事件所引起的黑潮年际变化在一定程度上对南海的暖事件有作用. 南海局地海气相互作用已经引起了注意, 在季节和年际时间尺度上海盆尺度的海气反馈是南海区域与气候变化中不可忽视的^[4]. 对这两种因素的探讨已经超出了本文研究的范围, 有待今后深入分析.

致谢 本工作受王宽诚教育基金会、中国科学院知识创新工程(KZCX2-205)、“十五”专项 (2001DIA50041)和国家重点基础研究发展规划(G1999043806)资助.

参 考 文 献

- 1 Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Q J R Meteorol Soc*, 1992, 118: 877~926
- 2 Qu T, Mitsudera H, Yamagata T. The intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea. *J Geophys Res*, 2000, 105: 6415~6424
- 3 谢强, 鄢利农, 侯一筠, 等. 南沙与暖池海域 SST 的长期振荡及其耦合过程. *海洋与湖沼*, 1999, 30(1): 88~96
- 4 王东晓, 秦曾灏, 周发琚. 南海年际尺度海气相互作用的初探. *气象学报*, 1997, 55(1): 33~42
- 5 Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J Climate*, 1994, 7: 929~948
- 6 Legler D M, Navon I M, O'Brien J J. Objective analysis of pseudo-stress over the Indian Ocean using a direct-minimization approach. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 709~720
- 7 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77: 437~471
- 8 White W B. Design of a global observing system for gyre-scale upper ocean temperature variability. *Prog Oceanogr*, 1995, 36: 169~217
- 9 吴国雄, 孟文. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件. I. 资料分析. *大气科学*, 1998, 22(4): 470~480
- 10 Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401(6751): 360~363
- 11 苏纪兰, 许建平, 蔡树群, 等. 南海的环流和涡旋. 见: 丁一汇, 李崇银, 主编. 南海季风暴发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 66~72
- 12 Wu C R, Shaw P T, Chao S Y. Seasonal and interannual variations in the velocity field of the South China Sea. *Journal of Oceanography*, 1999, 54: 361~372
- 13 王卫强, 王东晓, 施平. 南海大尺度动力场年循环和年际变化. *热带海洋学报*, 2001, 20(1): 61~68
- 14 Yin K, Harrison P J, Chen J, et al. Red tides during spring in Hong Kong: Is El Niño responsible? *Mar Ecol Prog Ser*, 1999, 187: 289~294