

# 气候态意义下的南海春季暖池

王卫强<sup>1,2</sup> 朱秀华<sup>1</sup> 侯一筠<sup>2</sup>

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 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

**摘 要** 应用气候态月平均的 Levitus 和 COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)温度资料及 COADS 海面通量资料, 探讨了南海气候态意义下春季暖池(温度大于 29.5°C 的水体)的演变过程及其生消的动力学机制。研究发现, 在气候态意义下, 南海表层海温在 5 月份存在显著的增温, 在南海中南部形成了大面积、具有一定厚度(约 15 m 深)的春季暖池, 暖池面积在 6 月份迅速减小以至消失。对南海春季暖池的生消机制研究发现, 春季暖池的产生过程是由于在不断增长的海面净热通量的作用下, 埃克曼抽吸导致的下降流有效地抑制了底部冷水的上涌, 进而维持了海温的持续增暖; 消亡过程则是由于局地涌升增强以及东南向的埃克曼流导致。以上的研究表明海洋动力因素在春季暖池形成及消亡过程中起着重要的作用。

**关键词** 南海 春季暖池 海洋动力

**文章编号** 1006-9895(2005)04-0565-08

**中图分类号** P461

**文献标识码** A

## The Role of Ocean Dynamics in Spring Warm Pool of the South China Sea

WANG Wei-Qiang<sup>1,2</sup>, ZHU Xiu-Hua<sup>1</sup>, and HOU Yi-Jun<sup>2</sup>

1 *Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301*

2 *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*

**Abstract** The climatology monthly mean sea temperature from Levitus and Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set(COADS), and sea surface flux from COADS are used to study the formation and decay of spring warm pool in the South China Sea (SCS). In May, SST is rapidly increased and a large area of warm water(greater than 29.5°C) of the large area named spring warm pool appears in the central SCS, and its thickness is about 15 m. At that time, northeast monsoon is gradually weakened and disappears. As a result, the mixed layer depth becomes shallow, which means that the upper layer water is easier warmed than before. Spring warm pool decays in June when southwest monsoon prevails in the SCS and disappears in July. From the above, spring warm pool is a transient phenomenon in response to the atmosphere change, which influences SST variation by ocean dynamics. According to the upper mixed layer dynamical equation, the formation and the decay of spring warm pool are investigated here. It shows that the formation is due to increasing surface net heat flux and the downwelling caused by Ekman pumping, which effectively restrain the cold water upwelling and maintain the water warming. The decay of spring warm pool is because of local strengthening upwelling and southeast Ekman currents. All that means ocean dynamics plays the determinant roles in this process.

**Key words** the South China Sea, spring warm pool, ocean dynamics

**收稿日期** 2003-12-10, 2004-04-05 收修定稿

**基金项目** 国家自然科学基金资助项目 40306003、40376004 和中国科学院知识创新工程项目 KZCX3-SW-227

**作者简介** 王卫强, 男, 1971 年出生, 博士, 副研究员, 目前从事南海环流动力学研究。E-mail: weiqwang@scsio.ac.cn

## 1 引言

作为西太平洋最大的深水边缘海,南海是世界上最大的海洋热库——热带西太平洋暖池的一个组成部分。与西太平洋暖池类似的是,南海的上层海洋热结构对于局地的海气相互作用有着相当重要的作用,其中一个重要的证据就是南海几乎长年存在高于 28℃ 的暖水,这种大面积暖水有利于其上的大气对流发展<sup>[1]</sup>。因此,随着海气相互作用研究的进一步深入,有关南海暖水(在有的文献中也称南海暖池)的问题在近年来得到关注。

现有的研究主要针对南海暖水的季节变化特征及其形成机制。何有海等<sup>[2, 3]</sup>研究发现,南海暖水具有明显的冬弱夏强的季节变化特征,并认为暖水的发展与到达海面的太阳辐射和局地的海洋环流有关。赵永平等<sup>[4, 5]</sup>利用 Levitus 和 XBT(抛弃式温深仪)资料进一步描述了南海暖水的季节变化特征。贾英来等<sup>[6]</sup>通过数值模拟进行机制研究发现,发展阶段的暖水范围和厚度的增长是由于南海地区受到的局部加热,维持阶段中暖水厚度主要由湍流混合作用和埃克曼效应来维持,衰退阶段则由于混合层顶部的降温以及冷水从底部的卷入。Liu 等<sup>[7]</sup>则进一步评估了不同阶段中各主要影响因素的贡献。张庆荣等<sup>[8]</sup>通过对南海暖水季节演变中水平、垂直结构的分析认为,南海暖水是一个深度不超过 50 m 的浅薄系统。

在春季,海温的迅速增高为南海暖水的进一步发展奠定了坚实的基础。Chu 等<sup>[9, 10]</sup>发现在晚春季,南海中部出现大面积的海温高于 29.5℃ 暖水。Chu 等<sup>[11~13]</sup>通过 MOODS 资料研究了 1966 年 3~5 月份南海表层海温的演变过程,发现在成熟阶段(5 月初)整个南海中南部水体温度甚至达到了 30℃ 以上,5 月中旬至 6 月初这部分暖水面积迅速衰退以至消失,进一步探讨其生消机制认为,可能是风和地形的联合作用以及短波辐射的快速增加,使海温急剧升高,进而导致局地大气压力的降低,这促进了西南季风的爆发,在南海中南部的气旋式风场导致局地上升流增强使底层冷水上涌至混合层,从而使南海中部暖水消亡。然而就目前来看,这种海气反馈机制仍缺乏足够的证据支持。这里,Chu<sup>[9, 10]</sup>将晚春季迅速增暖的水体称之为春季暖池(spring warm pool),尽管并无明确地提出春季暖池的概念以及定

义其温度指标,但在本文中仍沿袭这种称谓,将晚春季出现的温度大于等于 29.5℃ 的水体称为春季暖池。春季暖池与南海暖水是两种不同的物理现象,它们之间的区别将在下节详述。

为进一步研究,这里首先通过实测资料来认识春季暖池现象。通过 2002 年 5 月的南海南部海域调查资料分析(此次调查任务由中国科学院南海海洋研究所“实验 3”综合科学考察船承担,见图 1),我们能够看到南海中部及南部存在大面积的高于 29.5℃ 的水体,春季暖池厚度(定义为“29.5℃ 等温线垂向所占深度”)最深约 35 m 左右,位于巴拉望岛附近。

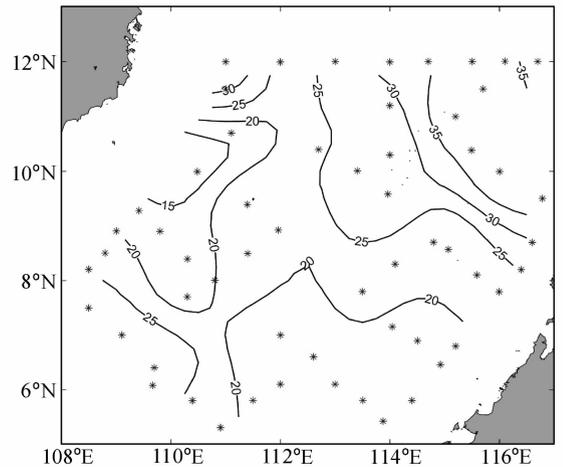


图 1 2002 年 5 月航次测站分布(星号)及春季暖池厚度图(单位: m)  
Fig. 1 The station (asterisk) map in May 2002 and the distribution of spring warm pool depth (The spring warm pool depth is the depth with temperature  $\geq 29.5^\circ\text{C}$ , units: m.)

## 2 春季暖池的表征

本文采用 Levitus 气候态月平均标准层温度资料<sup>[14]</sup>以及 Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (简称 COADS)<sup>[15]</sup>气候态月平均资料的表层温度场及风应力场,以上资料分辨率都为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。

从 COADS 气候态表层水温 4~7 月份在南海的分布(如图 2)可以看出,4 月份在泰国湾内有小面积的大于等于 29.5℃ 暖水区;5 月份 29.5℃ 等温线范围大面积增加,表现为呈西南-东北走向的狭长区域,在东岸与吕宋岛相邻约 16°N 附近,泰国湾内为高达 30℃ 暖水覆盖;6 月份春季暖池的范围明显减小,仅余菲律宾岛沿岸和泰国湾内,与爪哇海相连处也有少量 29.5℃ 暖水;而 7 月份全海区已无 29.5℃ 暖水,此刻春季暖池已完全消失。但是仍可以看到

相对高温区(29°C)分裂为南北两部分：北面的区域主要位于海南岛东南部至菲律宾岛西侧，南北跨度约为3~8个纬度，南面的部分在泰国湾至马来西亚沿岸和加里曼丹岛沿岸。同样的演变特点在 Levitus 资料中也可以看到，这里不再赘述。

春季暖池与南海暖水发展演变有很大的不同，从图 2 可以看到，4 月份春季暖池开始萌芽的时候，南海暖水(温度高于 28°C 的水体)已经占据南海的中南海盆，5 月份向北扩展到 20°N 左右，6 月份

继续保持发展趋势，向北扩展至 21°N 附近，至 7 月份整个南海海区已经都为南海暖水覆盖。还需强调的是，春季暖池与南海暖水的不同，不仅仅体现在温度定义指标以及发展演变的不同，最重要的是在于两者水体性质所表现出来的物理含义不同。暖水一般以大于等于 28°C 的水为定义，在南海除少数月份以外，几乎常年存在。暖水面积是南海上层海洋热含量的一个表征，代表了南海整体的热力状况。而春季暖池相对于南海暖水，是一个瞬变的物

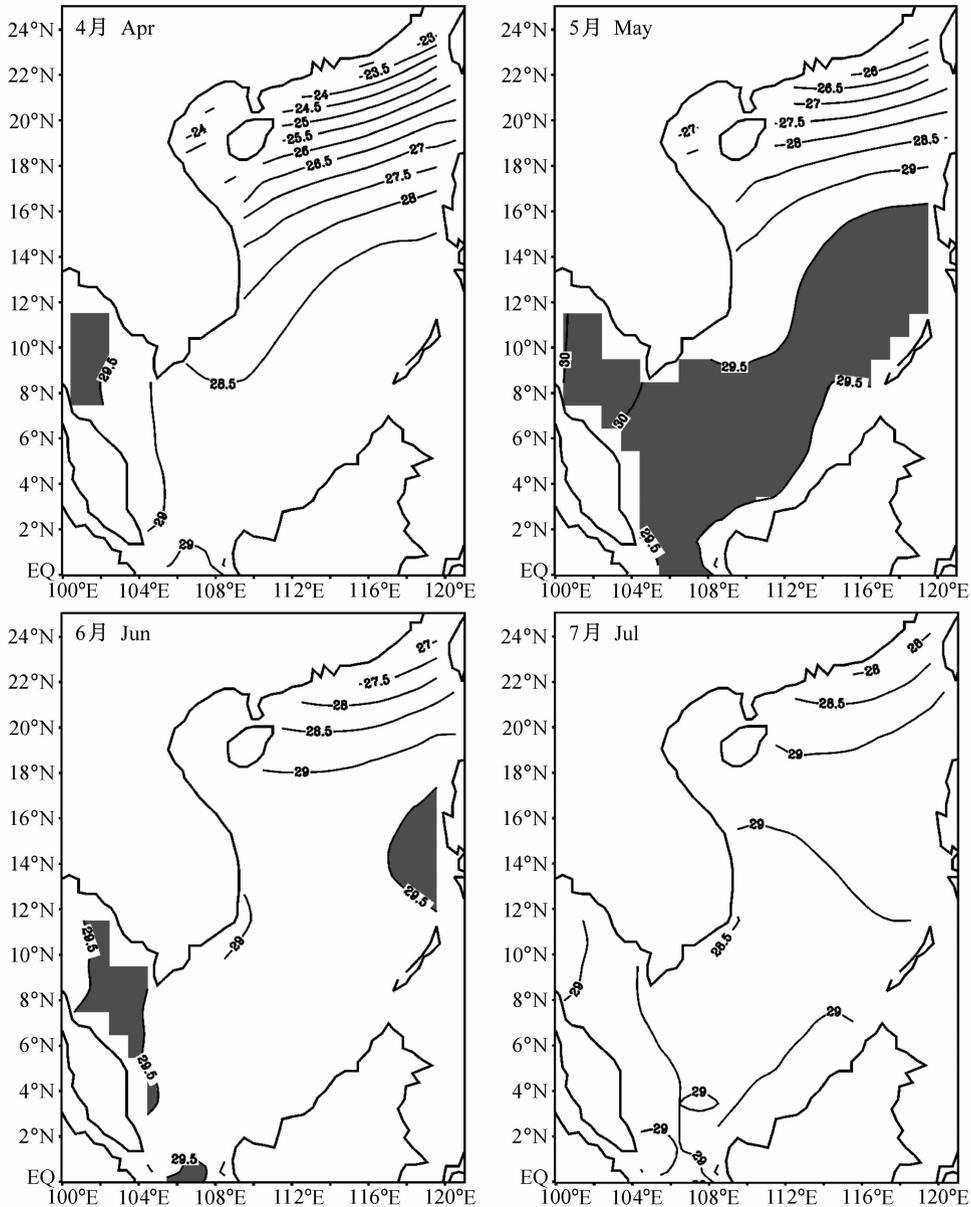


图 2 气候态 4~7 月南海表层温度场 (单位: °C) (资料来自 COADS) 阴影部分为表层水温  $\geq 29.5^\circ\text{C}$  的区域

Fig. 2 The climatology distribution of SST (units; °C) in the South China Sea (SCS) from Apr to Jul. The shadow is the region with SST  $\geq 29.5^\circ\text{C}$ . Data are from COADS

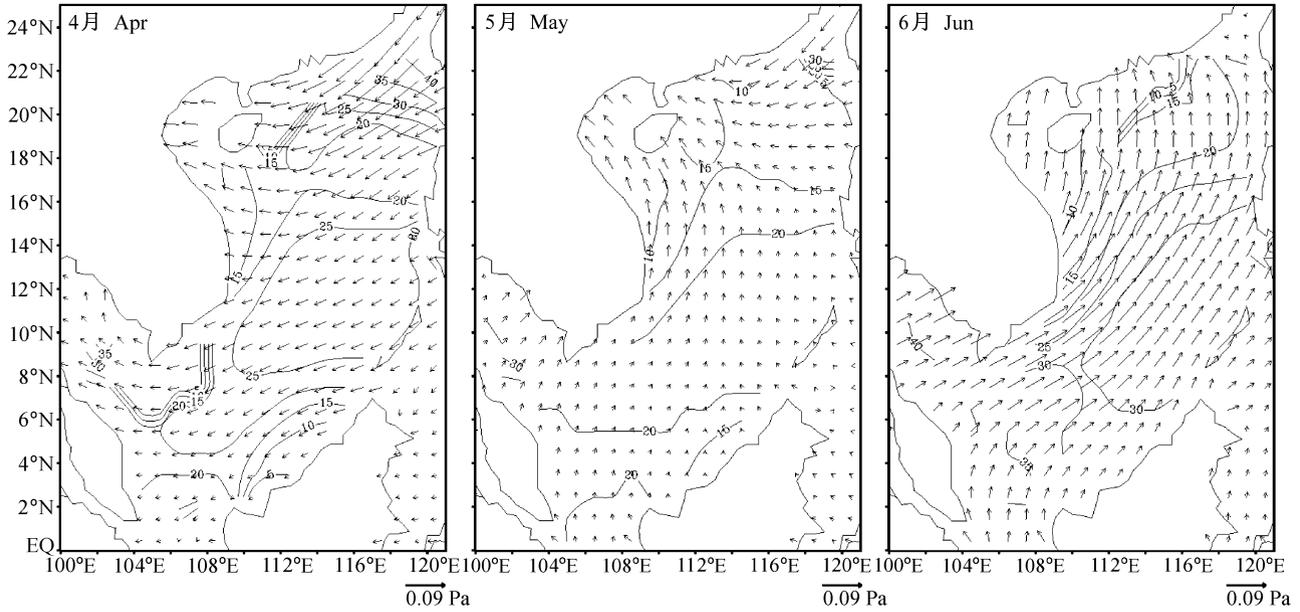


图3 气候态4~6月份南海风应力场(单位: Pa)及混合层厚度(单位: m)

Fig. 3 The climatology distribution of wind stress (units; Pa) and mixed layer depth (units; m) from Apr to Jun. Data are from COADS

理现象, 生命过程十分短暂, 一般出现在晚春季节, 其他月份很少或基本没有, 从物理意义上来看, 春季暖池表现为季风转换期间在大气强迫下南海敏感的反应。

那么究竟是什么因素控制着春季暖池的生成、发展和消亡过程? 为了进一步深入对春季暖池的研究, 有必要对这期间的海洋状态有更为全面的认识和了解。

季风驱动是南海环流最主要的外界强迫, 与4月份相比, 季风风场(图3)在5月份除南海18°N以北外, 其他区域风场基本上已经转为西南向, 而且南海中部靠近越南沿岸区域风应力较强。至6月份西南季风已经占据整个南海。从同时期的混合层厚度(如图3, 混合层厚度是采用较严格的小于 $0.05^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 的标准来定义)的分布来看, 5月份的混合层厚度明显要小于4月及6月, 海盆中心的高值中心约为20 m。这与5月份季风转换期间风速减小、风力减弱存在很好的对应关系。混合层厚度是表征上层海洋热力结构的一个重要的指示因子。

从5月份春季暖池厚度(图4)来看, 春季暖池水体可分为两部分, 马来半岛的东侧和巴拉望岛附近。前者面积较小, 位于泰国湾内; 而后者分布面积较大, 位于南海中部。春季暖池是一个相对浅薄的水体, 最深处约15 m, 而且春季暖池的核心随深度增加逐渐偏

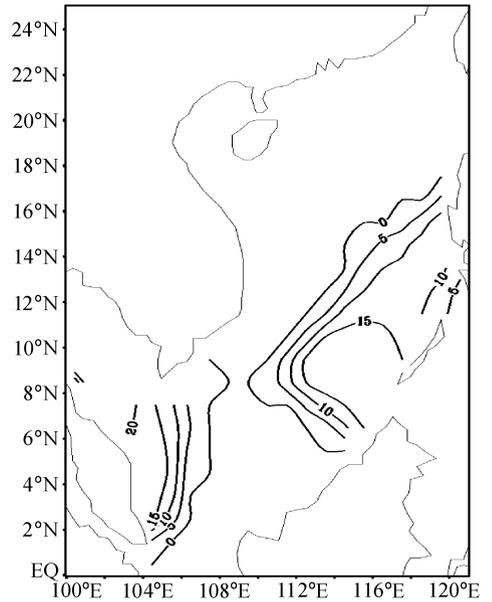


图4 春季暖池厚度(单位: m, 资料来自 Levitus 垂向插值后的温度-深度廓线数据)

Fig. 4 The climatology spring warm pool depth (units; m). Data are from the vertical interpolated data of Levitus temperature.

于西南侧, 位于约(10°N, 115°E)处。

### 3 春季暖池形成及消亡机制分析

本文依据 Kraus-Turner 混合层温度变化方

程<sup>[16,17]</sup>[式(1)], 尝试探讨春季暖池的成因及其消亡。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T = \frac{Q_{\text{net}}}{\rho c_p h} + K_T \nabla^2 T + \frac{W_e \Delta T}{h}, \quad (1)$$

其中,  $T$  是上混合层温度,  $\mathbf{V} \cdot \nabla T$  为平流作用项,  $Q_{\text{net}}$  为海面净热收支,  $K_T \nabla^2 T$  为水平扩散项,  $W_e \Delta T/h$  为卷挟作用项。如果将 SST 视为上混合层的温度, SST 的变化取决于方程(1), 影响因素包括海洋内部动力过程、水平扩散和海面净热收支等因素。海洋内部动力过程又包括平流作用和卷挟作用。这里, 水平扩散项在热力学方程中一般为小量(边界处除外), 因此略去此项。下面, 将分别从以上三种影响因素出发, 利用 COADS 中的海面通量资料, 讨论暖池的生成和消亡。

从 4~6 月的温度月增量图(图 5)来看, 与 3 月份相比, 4 月份的增温幅度比较大, 在南海中部增温达 1.2~1.8°C, 尽管从 5 月份温度月增量图上来看, 南海北部增温幅度达到 2°C 以上, 但南海中部增温幅度较之 4 月份的温度月增量已明显减弱。至 6 月份除南海北部区域仍有小幅度的增温外, 16°N 以南已经有小幅度的降温, 最大降温幅度出现在加里曼丹岛沿岸及泰国湾, 达到 0.6°C。对海面净热通量的季节变化研究可以发现, 与冬季及早春时节相比, 海面净热通量自进入春季以来逐渐增加, 到 4 月份海面净热通量达到一年中的最大值, 与 4 月份海温有较大增量相对应。因此, 不断增加的海面净热通量是海温逐渐升高的重要因素, 这也是南海暖水此时大范围发展的重要原因, 这为春季暖池的出现奠定了坚实的基础。之后, 由于季风转换所带来的风力变弱、云量覆盖、降雨增多等原因, 海面净热通量到 5 月份有所下降。尽管如此, 对应于较浅的混合层, 5 月份的海面净热通量对这部分水体有“放大了”的增暖作用, 仍使 5 月份有明显的增温。6 月份的海面净热通量比 5 月份要弱一些, 但仍维持正值, 根据 Kraus-Turner 方程, 海面净热通量与海温的月增量是对应的, 也就是说只要海面净热通量是正值, 对于同时期的海温来讲都为正贡献, 这意味着海洋获得热量, 仍然对应着海温增加。因此, 单纯从这个角度是无法解释春季暖池在 5 月份大面积出现而 6 月份则迅速减弱、消亡这一现象的。

考虑平流效应在春季暖池生消过程中的作用,

这里将平流项用埃克曼流和地转流这两项来表示<sup>[18]</sup>:

$$\mathbf{V} \cdot \nabla T = \mathbf{u}_e \cdot \nabla T + \mathbf{u}_g \cdot \nabla T, \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{u}_e$  为埃克曼速度,  $\mathbf{u}_g$  为地转流速度。埃克曼流由  $\mathbf{u}_e = \boldsymbol{\tau} \times \mathbf{k} / (\rho f h_m)$  计算, 其中  $\mathbf{u}_e$  是埃克曼矢量速度,  $\boldsymbol{\tau}$  是海面风应力,  $f$  是科里奥利力,  $h_m$  是混合厚度。从图中(图 5c)可以看到, 4 月份的埃克曼流场多呈西北向, 与同时期盛行的东北风相对应, 有利于暖水的向北扩展, 对春季暖池的发展可能有正贡献; 在 5 月份, 与转换期间的季风相对应的是呈弱气旋场分布的埃克曼流场, 在 16°N 以南海流呈东向和南向。考虑到 5 月份风应力明显弱于 4 月份和 6 月份, 近似认为这个时期埃克曼流的贡献很小; 6 月份西南季风发展成熟, 均匀一致的东南向埃克曼流输运不利于南边暖水的向北运动, 对这个时期南海暖池的衰退可以做出很好的解释。

由于平流项中地转流的贡献较小可以忽略, 所以这里不考虑地转流的作用(因为海水的密度主要是由温度决定, 所以等密面与等温面近似重合, 因此地转流可以近似看作是在等温面上流动, 这对温度平流贡献很小)。

对比 4~6 月份的埃克曼抽吸图(图 5d)可以发现, 除加里曼丹岛西侧及吕宋岛西侧部分区域以外, 4 月份南海大部分区域为下降流, 其中最大值出现在南海中部约 9°N~14°N 之间。5 月份的下降流强度有所减弱, 但在南海中部(巴拉望岛西侧)仍然维持着较高的下降速率。6 月份除了沿巴拉望岛和加里曼丹岛沿岸较窄的条形区域外, 其他大部分区域已经呈现上升流。联系到 6 月份混合层厚度增大, 这表明由于西南季风的增强, 使得埃克曼抽吸加强, 使大量冷水卷挟进入混合层, 促使该区域的温度降低, 使得春季暖池范围减小。因此, 从埃克曼抽吸的分析来看, 4、5 月份大范围向下的埃克曼抽吸, 阻止了深层冷水上涌, 有利于南海中部海温的增高; 在 6 月份, 代之以大范围的上升流, 结合同时期东南向埃克曼流抵制了南方暖水的涌入, 从而使上层海洋温度降低, 这可能是春季暖池消亡的主要因素之一。

结合以上分析, 我们来看南海中南部海域各影响因素的区域平均(图 6), 可以明显看到 4 月份各因素都对海温有较大的正贡献, 这与 4 月份海温月增量最大相对应; 5 月份除平流项可以忽略外, 其

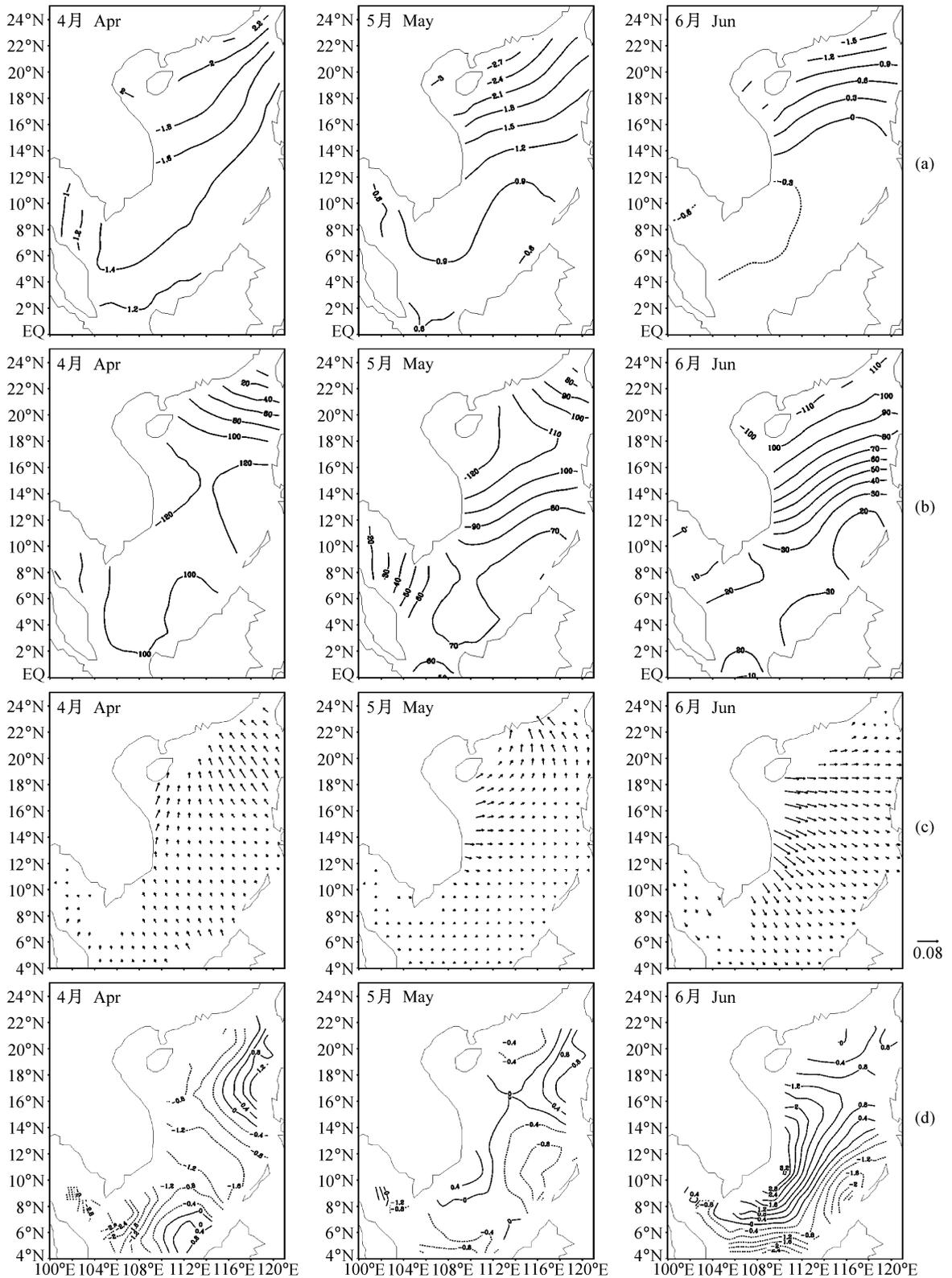


图5 气候态的4~6月份温度的月增量 (a, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、海面净热通量 (b, 单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )、平流项 (c, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 及埃克曼抽吸速度 (d, 单位:  $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 The climatology distribution of the monthly increment of SST (a, units:  $^{\circ}\text{C}$ ), net heat flux (b, units:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), advection term (c, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and Ekman pumping (d, units:  $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) from Apr to Jul

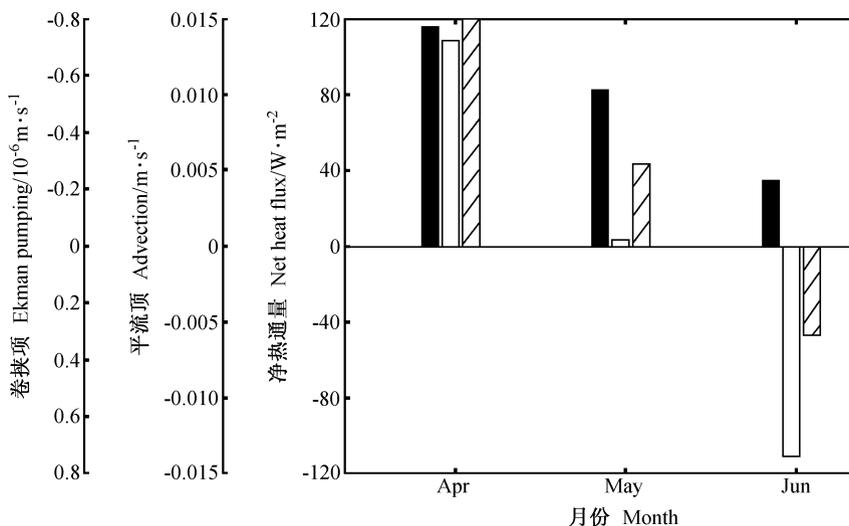


图6 南海中南部海域 ( $6^{\circ}\text{N}\sim 16^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )各因素的区域平均。■为海面净热通量, □为平流项, ▨为卷挟项。零线以上表示对海温增暖有正贡献, 反之为负贡献

Fig. 6 The regional average ( $6^{\circ}\text{N}\sim 16^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ) of each factor. ■ net heat flux, □ advection, ▨ Ekman pumping. Above the zero line means positive contribution to the SST rise, and below the zero line means negative contribution

他因素的作用仍然对应着海温增加, 最终导致了春季暖池的产生; 到了6月份, 除海面净热通量仍然为正贡献外, 其他因素已转为负贡献, 这是春季暖池消亡的主要原因。

## 4 结论和讨论

Chu等<sup>[11~13]</sup>通过实测资料个例研究春季水体的增暖, 以暖异常在 $0.8\sim 3^{\circ}\text{C}$ 之间的水体为研究对象, 认为暖池是在风以及地形的联合作用下形成的, 在海盆中心处的反气旋风应力旋度导致水体下沉, 抑制底部冷水上涌, 形成了南海中部的暖池。在暖池的消亡阶段, 春季暖池降低了表层气压, 这不仅促成了西南季风的爆发, 而且在西南季风爆发后发展成气旋性风场, 引起底部冷水上涌至混合层, 是南海中部春季暖池消亡的原因。Qu<sup>[18]</sup>认为春季暖池的发生可能是由于5月份由季风转换造成的风应力减弱、约 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的热通量加热混合层以及季节性等密面阻止了表面热通量的下传所致。春季暖池的消亡则是由于6月份西南季风爆发之后, 在南海中部蒸发加剧, 潜热损失增加以及发生在混合层底的冷水卷入使得SST下降所致。

这两种观点有着相似的地方, 都强调了季风转换过程中风场结构的变化所引起的下降或上升流, 维持或破坏了水体的增暖。不同的是, Chu等<sup>[13]</sup>

还将地形因素考虑在内, 认为暖池的形成还有海盆地形加上水体质量守恒的双重约束。Qu<sup>[18]</sup>则认为蒸发加剧导致潜热损失增强也是春季暖池消亡的原因之一。

本文分析了气候态意义下晚春水体的增暖, 较之以前的研究, 具有更广泛的代表意义, 同时机制分析表明了海洋动力因素在春季暖池的消亡过程中起着至关重要的作用。与前两种观点相比, 在强调风应力旋度作用的同时, 还认为暖池生成过程中, 海面净热通量在4月份的增暖效果是不容忽视的, 这对5月份春季暖池的大规模发展奠定了坚实的基础。在解释春季暖池消亡时, 本文认为是埃克曼抽吸导致的上升流和东南向埃克曼流共同造成的。另外, 本文未从潜热损失的角度研究对春季暖池消亡的影响。这是因为根据Kraus-Turner方程, 关注的是海面净热通量这样一个净效果。同时期的海面净热通量显示大气向海洋输送热量, 对SST的增暖起着积极的作用, 这其中已包含了潜热损失的影响。因此, 潜热损失加强并不是直接导致春季暖池消亡的因素。

## 参考文献 (References)

- [1] Graham N E, Barnett T P. Sea surface temperature, surface wind divergence and convection over tropical oceans. *Science*, 1978, **238**: 657~659

- [2] 何有海, 关翠华. 南海暖池初探(I). 南海研究与开发, 1997, 4: 8~11  
He Youhai, Guan Cuihua. A primary study of the South China Sea warm pool (I). *Research & Development of South China Sea* (in Chinese), 1997, 4: 8~11
- [3] 何有海, 关翠华. 南海暖池初步研究. 高原气象, 1999, 18(4): 595~602  
He Youhai, Guan Cuihua. A primary study of the South China Sea warm pool. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(4): 595~602
- [4] 赵永平, 张庆荣, 陈永利. 南沙暖水的基本特征及其与 ENSO 的关系. 南沙海域海气相互作用与天气气候特征研究. 北京: 科学出版社, 1998. 67~79  
Zhao Yongping, Zhang Qingrong, Chen Yongli. The characteristics of the Nansha warm water and their relation to ENSO events. *The Studies on the Air-Sea Interaction and the Characteristics of Synoptic Climatology in the Nansha Islands Sea Areas* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998. 67~79
- [5] 赵永平, 陈永利. 南海暖池的季节和年际变化及其与南海季风爆发的关系. 热带气象学报, 2000, 16(3): 202~211  
Zhao Yongping, Chen Yongli. The seasonal and inter-annual variability of the South China Sea warm pool and its relation to the South China Sea monsoon onset. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2000, 16(3): 202~211
- [6] 贾英来, 刘秦玉, 孙即霖. 南海暖水的季节变化特征及数值模拟. 海洋与湖沼, 2000, 31(4): 354~362  
Jia Yinglai, Liu Qinyu, Sun Jilin. Seasonal characteristics of the South China Sea warm pool and numerical modeling. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 2000, 31(4): 354~362
- [7] Liu Qinyu, Wang Dongxiao, Jia Yinglai, et al. Seasonal variation and formation mechanism of the South China Sea warm water. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 21(3): 331~343
- [8] 张庆荣, 杜岩, 王东晓. 南海暖水形态特征. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 69~76  
Zhang Qingrong, Du Yan, Wang Dongxiao. Shape features of warm water in South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2001, 20(1): 69~76
- [9] Chu P C, Chang C P. A case study of the South China Sea warm pool. The International CLIVAR-GOALS Workshop on Asian-Australian Monsoon Oceanography and Meteorology, 10-12 April 1995, Melbourne, Australia, 1995
- [10] Chu P C, Chang C P. South China Sea warm pool and monsoon development. The International South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) Scientific Workshop, 5-7 June 1995, Beijing, China, 1995
- [11] Chu P C, Chang C P. South China Sea warm pool in boreal spring. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, 14: 195~206
- [12] Chu P C, Tseng H-C, Chang C P, et al. South China Sea warm pool detected in spring from the Navy's Master Oceanographic Observational Data Set (MOODS). *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 15761~15771
- [13] Chu P C, Lu S-H, Chen Y-C. Temporal and spatial variabilities of the South China Sea surface temperature anomaly. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 20937~20955
- [14] Levitus S, Boyer T. World Ocean Atlas 1994, Vol. 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4, U. S. Gov. Printing Office, Wash., D. C., 1994, 117pp
- [15] Silva D A, Young C, Levitus S. Atlas of Surface Marine Data 1994, Vol. 1: Algorithms and Procedures. NOAA Atlas NESDIS 6. U. S. Gov. Printing Office, Wash., D. C., 1994, 83pp
- [16] Turner J S, Kraus E B. A one-dimensional model of the seasonal thermocline, I. *Tellus*, 1967, 19: 88~97
- [17] Kraus E B, Turner J S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline, II. *Tellus*, 1967, 19: 98~105
- [18] Qu T. The role of ocean dynamics in determining the mean seasonal cycle of the South China Sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106: 6943~6955