

# 南海上层海洋热结构的年循环与半年循环<sup>\*</sup>

高荣珍<sup>1,2)</sup> 王东晓<sup>1)</sup> 王卫强<sup>1,2)</sup> 周发琇<sup>2)</sup> 谢 强<sup>1)</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) (中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266003)

**摘 要** 根据南海季风试验 (SCSMEX) 期间南海内区的三个 ATLAS (Autonomous Temperature Line Acquisition System) 锚碇浮标资料 (1998 年 4 月~1999 年 4 月), 采用谐波分析方法对南海上层海洋水温年循环、半年循环加以分离, 发现无论在年循环还是在半年循环尺度上, 18°N 附近 SCS1 站与 13°N 附近 SCS3 站的水温变化次表层与表层呈反位相; 15°20'N 附近 SCS2 站水温变化基本上次表层与表层同位相。这说明不同区域上层海洋热变化受不同的正压与斜压模态控制。其次, SCS2、SCS3 两点水温年循环振幅均在次表层达到极值; 而 SCS1 在表层达到极大值, 在 100 m 深度达到次极大值。3 个站位水温半年循环振幅极值均出现在次表层内, 这说明该层内的水温半年循环在温度变化趋势中所占的权重比在表层的权重大。

**关键词:** 南海; 上层海洋; 年循环; 半年循环

## 1 引言

南海位于热带西太平洋的边缘, 是西太平洋最大的半封闭深水海盆, 具有某些大洋的特征<sup>[1]</sup>, 同时它不仅是联接亚澳季风的桥梁, 也是典型的季风区, 并且存在显著的局地性海—气相互作用<sup>[2~4]</sup>。作为海—气相互作用的重要因子, 海温变化一直是倍受海洋学家和气象学家关注的。它不仅直接影响其上空的大气状况, 从而制约中长期天气的预报时效, 而且还将直接影响海流, 进而间接影响气候变化。以往多数学者均将注意力集中于不同时间尺度的海表水温 (SST) 变化上<sup>[5~7]</sup>, 忽视了对次表层 (50 m 以下) 水温变化的研究<sup>[8]</sup>。这主要是因为南海缺少上层海洋垂直方向上长时间连续的实时观测资料, 客观地限制了对南海次表层水温变化规律的认识。

对于表层以下的次表层海水而言, 它既不能直接吸收太阳辐射, 也没有其他的热源, 其热量变化主要是靠海水表面向下的热传导和平流—对流运动的作用。与表层水温相比, 次表层温度更多地受到南海海洋内部动力过程的影响。对于南海而言, 表层水温季节变化可以穿透到多深呢? 而且在空间上是否存在像表层水温一样的差异性? 这是一些很有意义的科学问题。

南海季风试验 (SCSMEX) 的实施提供了长达一年以上、连续定点观测的 ATLAS

2001-01-03 收到, 2002-01-11 收到再改稿

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043806, 国家八六三计划 2002AA639250 和国家自然科学基金资助项目 40106002 共同资助

(Autonomous Temperature Line Acquisition System) 浮标资料。本文采用线性谐波分离方法分析南海表层、次表层海温年循环以及半年循环的变化特征, 为上述问题提供了翔实的观测证据。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

本文所用资料为 SCSMEX 期间在南海北部与中部获得的三个 ATLAS 锚碇浮标资料, 测站 SCS1 位于(18°05′54″N, 115°35′48″E), SCS2 位于(15°20′36″N, 114°57′18″E), SCS3 位于(12°58′30″N, 114°24′30″E); 垂直方向上分为 11 层(1 m、25 m、50 m、75 m、100 m、125 m、150 m、200 m、250 m、300 m、500 m)。其中在 SCS1, 观测记录最长(1997 年 4 月 17 日~1999 年 4 月 9 日), 在 SCS2 与 SCS3, 记录长度相当, 分别为 1998 年 4 月 11 日~1999 年 4 月 10 日与 1998 年 4 月 12 日~1999 年 4 月 11 日, 观测时间间隔均为 10 min。根据需要, 本文选取 1998 年 4 月 10 日~1999 年 4 月 9 日 250 m 以内的数据作为分析对象, 一方面是因为在此期间三个站点的缺测数据较少; 另一方面是以上时间范围内的数据恰好是完整的一年资料, 这样我们才可以分析年循环、半年循环尺度上的水温变化。将原始数据预处理为日平均数据, 对于上述选定时间范围两端点的缺测数据, 采用外插补值。图 1a、b、c 分别是 SCS1、SCS2、SCS3 测站处 1~250 m 水温的时变曲线。

### 2.2 方法

本文采用谐波分析方法<sup>[9]</sup>研究南海上层海洋(1~250 m)水温年循环与半年循环的变化特征。对任一时间序列  $\{x(t), t=1, \dots, n\}$ , 可分解为

$$x(t) = \bar{x} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{n} - \alpha_1\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi t}{n} - \alpha_2\right),$$

其中  $\bar{x}$  是时间序列  $x(t)$  的均值,  $a_1$  与  $\alpha_1$  分别是年循环的振幅和初位相;  $a_2$  与  $\alpha_2$  分别是半年循环振幅和初位相。无论是年循环还是半年循环, 每一周期的总位相都为  $360^\circ$ , 故初位相  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  取值范围在  $-180^\circ \sim 180^\circ$  之间。

## 3 主要结果

### 3.1 南海上层海洋水温年循环变化特征

图 2a 给出了三个站点水温年循环振幅的垂向分布, 图中圆点标志的所在深度为混合层厚度<sup>[10]</sup>, 并以此作为本文中提到的表层、次表层的大致分界线。在 SCS1, 海表水温年循环振幅最大( $3^\circ\text{C}$ ), 随着深度的增加振幅开始减小, 在 25~50 m 层次振幅出现明显的不连续现象, 并且在 50 m 振幅存在极小值; 50 m 以下振幅开始逐渐回升, 在 100 m 深度达到次极值( $1.4^\circ\text{C}$ )。这表明, SCS1 站水温年循环在 25 m 以内的表层最显著, 此外在次表层内水温年循环也是较强的; 随着深度的进一步加深, 振幅再次呈现递减变化, 到 250 m 深度, 振幅只有  $0.25^\circ\text{C}$ , 年循环变得不再显著。值得注意的是, SCS2 和 SCS3 站水温年循环振幅的垂直差异与 SCS1 站显著不同: SCS2 振幅极值出现

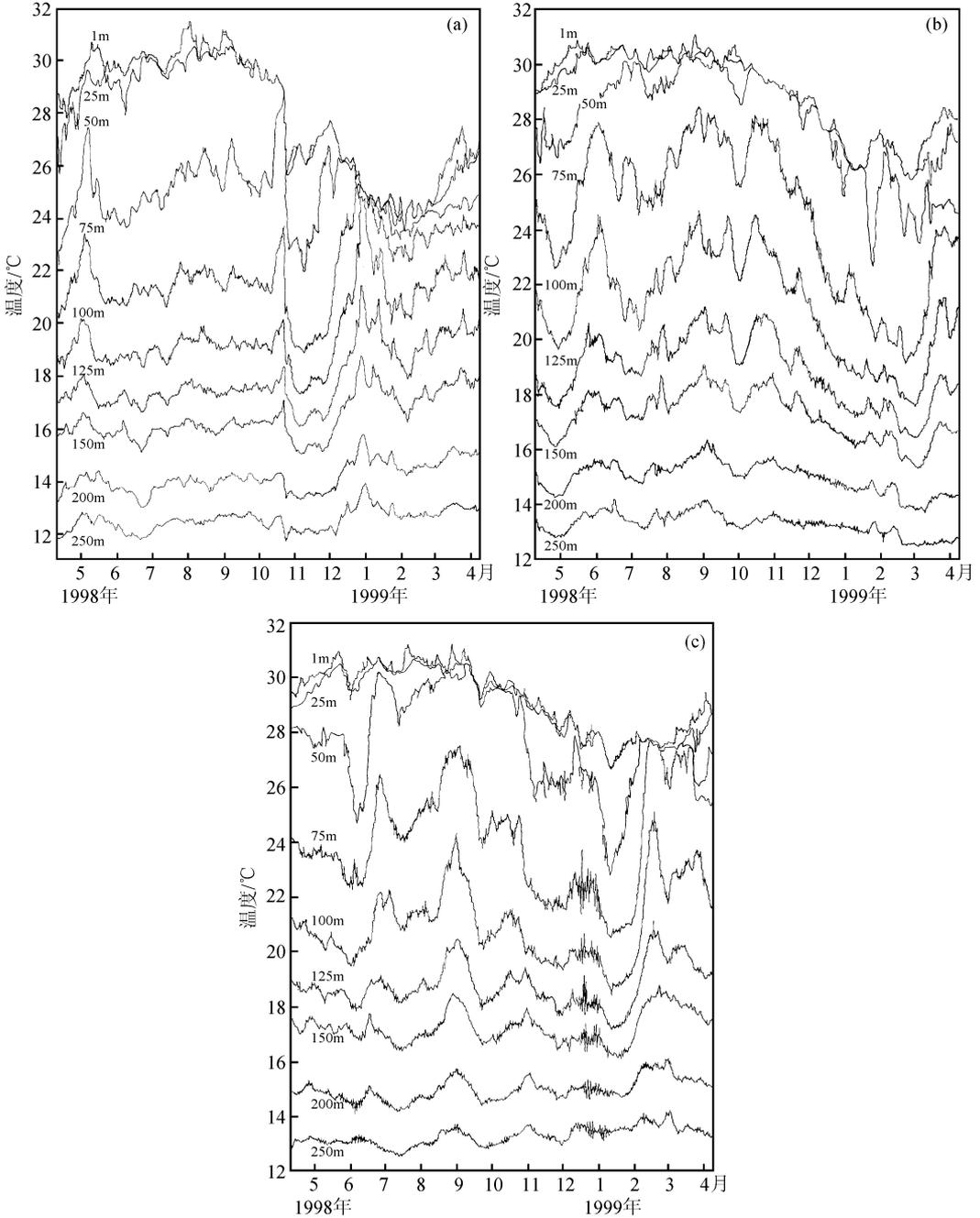


图1 三个测站 1~250 m 日平均水温时间序列  
(a) SCS1; (b) SCS2; (c) SCS3

在 75 m 层次，可以达到 3.3°C；SCS3 站水温年循环振幅的垂直分布与 SCS2 站很相似，但在 50 m 深度达到极值，且振幅相当小。

从三个站点水温年循环初位相的垂直分布（图 2b）可以发现，在 SCS1，大约 50~75 m 层次相当于是一个分界层，在其上、下位相反。50 m 以上层次位相的分布表

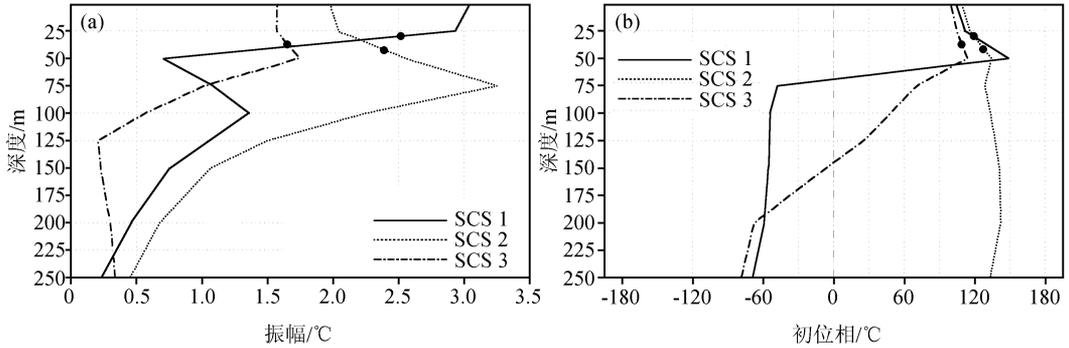


图2 三测站水温年循环振幅 (a) 与初位相 (b) 的垂直分布, 圆点为混合层的深度

明, 海表水温达到振幅极大值的时间要比 50 m 相应的时间提前大约 45 天, 这应该是季节变化向下经垂直混合过程而传播的缘故。75 m 以下深度水温年循环位相基本一致。由此可见, 对于年循环尺度而言, 无论从振幅还是从初位相的垂向分布都可以发现, 50 m 深度上下相当于是个过渡层。从图 1a 也可以清楚地看到这一点, 表层内水温变化与次表层内水温变化显著不同, 但每个层内水温变化是一致的, 在 50 m 深度几乎看不到水温的年变化, 可见, SCS1 站海表水温变化大约可以下传至 25~50 m 附近层次。在 SCS2, 位相的垂直分布表明, 海表水温变化要比 50 m 层次提前 20 天左右。自此而下直至 250 m 深度, 水温年循环变化基本同步 (图 1b)。在 SCS3, 水温年循环主要在 100 m 以内较显著 (图 2a), 125 m 层次相当于是个分界层, 此层次上、下水温变化位相相反, 但因 125 m 以下的振幅极弱, 从图 1c 上很难反映出上、下层水温反相变化。

对以上三点海温年循环的振幅、位相进行横向比较, 可以发现, 在 25 m 以内的深度, SCS1 站海温年周期变化振幅最大, 向南逐渐减小, 这与王东晓等<sup>[5]</sup>和周发琇等<sup>[6]</sup>对海表水温的调和分析结果一致。50 m 以下深度, SCS2 站海温年变化始终强于 SCS1 和 SCS3 站海温年变化。就位相而言, 在年循环尺度上, 50 m 水温变化均落后于海表水温变化, 而且测站位置不同, 落后的时间长度不等。其中在 SCS1 站落后时间最长 (45 天), SCS2 次之 (20 天), SCS3 站落后时间最短 (10 天), 这就表明, 即使海表水温同步变化, 因热传导以及混合等其他因子的不同, 次表层水温的响应也是不同步的。在 25 m 以内深度, 三个站水温年周期变化的位相差较小, 其中 SCS3 最先达到振幅最大; 50 m 以下深度, 南海水温年周期变化的位相差相当大, SCS1 和 SCS2 之间的相差尤为明显, 表明这个层次温度季节变化的水平进退特大。此外, 海表水温年变化在 SCS1 和 SCS3 大致可以穿透至 25~50 m, 在 SCS2 可以穿透至温跃层 (通过下文可知南海的温跃层上界在 50 m 左右)。这说明, 南海上层海洋热力学特征在不同的区域存在明显的差异, 同时也体现了不同海区对季风强迫的响应机制不尽相同。

此外, 通过对三个测站的 20°C 等温线所在深度 (记为 D20, 本文依据惯例用它代表温跃层上界深度<sup>[11]</sup>) 进行谐波分析, 发现次表层水温年循环变化与温跃层的年变化 (图 4a) 有密切的关系。当 D20 加深时, 该层水温变暖; 反之, 当 D20 变浅时, 该层水温变冷。

### 3.2 南海上层海洋水温半年循环变化特征

水温半年循环振幅在三个点的垂直分布比较一致 (图 3a)。在 SCS1、SCS3 站, 自

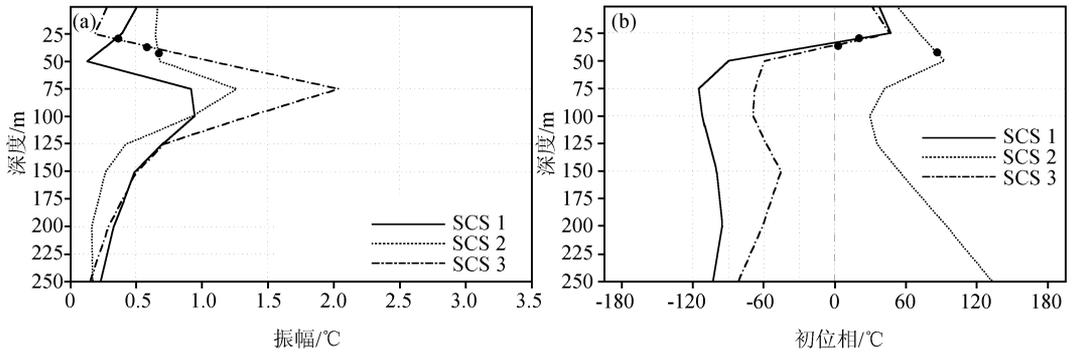


图 3 三测站水温半年循环振幅 (a) 与初位相 (b) 的垂直分布, 圆点为混合层的深度

海表至 50 m、25 m 振幅出现不同程度的减小, 在 SCS2, 振幅在 50 m 以内几乎没有变化; 随着深度的增加, 水温半年循环振幅在三个点均显著加强, 在 75 m 附近达到极值; 之后随深度的增加振幅递减。可见, 南海水温的半年周期变化主要集中于温跃层所在深度, 其中在 SCS3 振幅最大, 可以达到 2°C, SCS2 站次之 (1.2°C), SCS1 站半年周期变化是最弱的 (0.9°C)。图 4b 为三个测站 D20 的半年循环变化, 与年循环结果类似, 当 D20 加深时, 该层水温变暖; 反之, 当 D20 变浅时, 该层水温变冷。比较图 4a、b 可以发现, SCS3 站 D20 的半年循环要比其年循环强得多, 这在一定程度上预示着

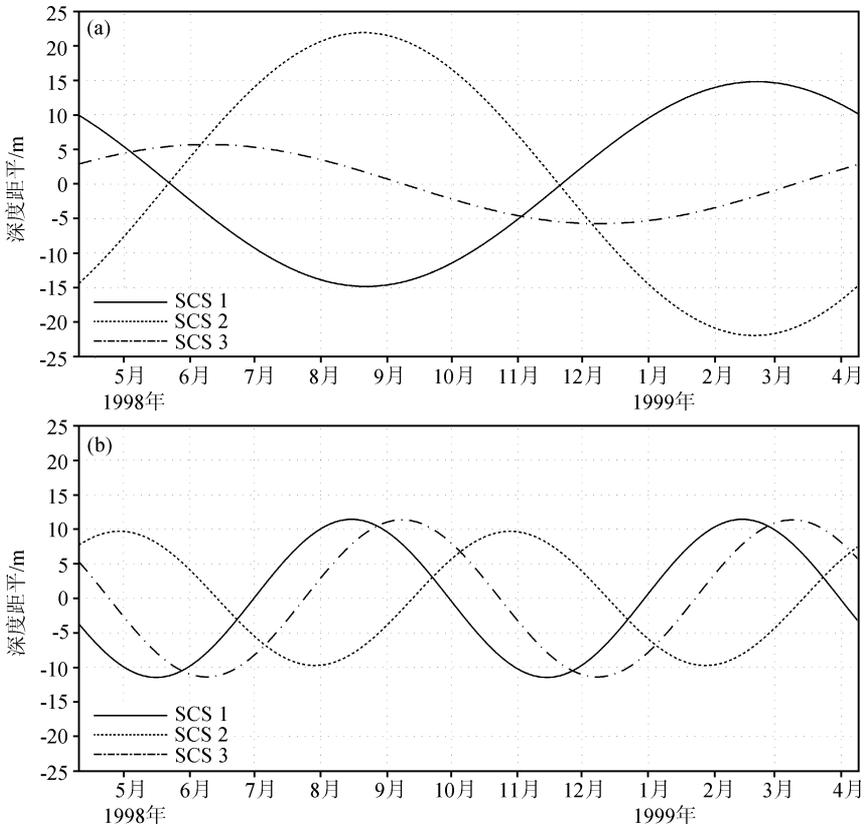


图 4 三测站 20°C 等温线所在深度年循环 (a) 与半年循环 (b) 时变曲线

次表层水温半年循环变化同样与温跃层的半年周期活动相关联,这与印度洋赤道附近区域次表层水温半年循环变化与该区域 D20 的半年周期变化密切相关非常一致<sup>[12]</sup>,从另一方面揭示了南海具有准大洋的特征。

图 3b 表明,对于水温半年变化而言,当海表信号下传时,SCS1 和 SCS3 站温跃层中水温半年循环变化与之呈反位相变化,分界层位于 25~50 m,海表信号比 25 m 层次提前 5~7 天;在 SCS2 站,水温半年循环变化在海表与温跃层位相差较小,不存在完全的反位相变化,海表水温变化比 50 m 层次提前 20 天左右。此外,在表层 25m 以内,三站点水温位相差相当小,但从 50 m 深度向下三点之间的位相差逐渐增大,SCS2 站水温变化与 SCS1、SCS3 反位相,而后两者之间位相差较小。

### 3.3 年循环与半年循环的比较

将以上三点的水温年循环与半年循环进行比较,发现在 SCS1、SCS2 站,从表层到次表层以及 SCS3 站表层年循环振幅均强于半年循环振幅,尤其是在 25 m 以内的表层;在 SCS3 站的温跃层,半年周期水温变化较年循环水温变化重要得多。此外,在 SCS1 与 SCS3 站,对于年循环与半年循环,海表水温变化可以穿透至 25~50 m 左右,次表层与表层存在反位相结构,表现为斜压第一模态;而 SCS2 点却相当奇异,海表水温变化可以穿透至温跃层,次表层与表层同位相,表现为正压模态。此外,在 SCS1、SCS3,次表层水温变化在年循环、半年循环尺度上均与 SCS2 次表层水温变化反相,这意味着南海表层 25 m 以内水温的水平梯度要比次表层温度的水平梯度小得多。何有海等<sup>[8]</sup>在研究南海上层海洋热结构的年际、年代际变化过程中也指出,次表层海温水平梯度较表层大。可见,次表层不仅存在较大的垂直温度梯度,在水平方向上也如此。

## 4 站点差异的简单动力解释

以上结果中一个有意思的现象是,在 SCS1 和 SCS3 站,无论是在年循环尺度上还是在半年循环尺度上,次表层水温变化均与表层水温变化位相相反。从某种程度上讲,这种水温变化可以认为是因内界面起伏也即温跃层垂直位移所致<sup>[13]</sup>。当温跃层上下运动时,表层水与次表层水是反相变化的,表现为海洋垂向第一斜压模态。因而 SCS1 和 SCS3 站水温的年循环与半年循环在很大程度上是受垂直对流控制的。在 SCS2 站,对于相应尺度的水温变化而言,次表层与表层相当一致,这表明,该站水温变化为正压模态,受控于平流作用。SCS1 和 SCS3 站表层水与次表层水温度的变化趋势是与 SCS2 站的变化趋势有着一定的差异(图 1)。具体而言,1999 年 1 月,南海表层水温在冬季寒潮的强迫下表现为持续下降的时候,SCS1 和 SCS3 站次表层温度(75~150 m)却有一段明显增温的过程,而与此同时,SCS2 站次表层温度则与表层温度同时下降。

为了定性地分析三个测站温度平流的强弱,本文利用 1998~1999 年 TOPEX/Poseidon 卫星遥感的海面高度资料计算了地转流<sup>[14]</sup>。以往的研究已经表明,南海大尺度环流具有准地转特征,所以本文暂且采用地转流来近似表现南海水平环流。图 5 为冬季(DJF)气候平均的 Levitus 温度场<sup>[15]</sup>与地转流<sup>[14]</sup>的叠加,由此可以估计由地转流产生的海洋热力平流项的空间差异。从图 5 可以发现,SCS2 站附近温度水平梯度较 SCS1 和 SCS3 站强,且该处垂直于等温线的地转流分量也较强,故而 SCS2 站存在温

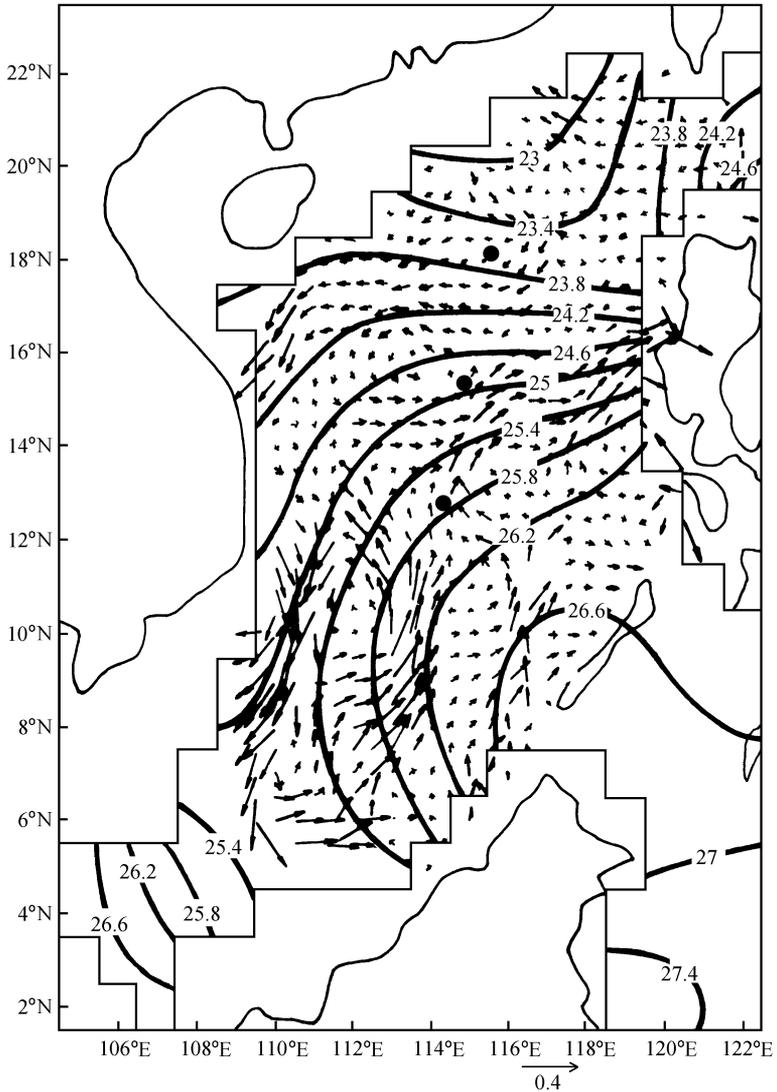


图5 冬季 (DJF) Levitus 气候平均 50 m 海温与 1998~1999 年冬季地转流  
黑圆点为三个测站所在位置, 等值线为 0.4°C, 图下箭头为矢量标尺

度的强平流。由此可见, SCS2 站水温变化受平流模态影响较大。

## 5 讨论与结论

本文通过分析 1998 年 4 月~1999 年 4 月南海北部与中部三个 ATLAS 锚碇浮标观测的温度资料, 发现南海上层海洋水温变化有以下初步特征:

(1) 在 SCS1、SCS2 站, 无论是在表层还是次表层, 年循环变化均强于半年循环变化, 在 SCS3 的表层也如此。虽然在表层半年循环与年循环振幅之比很小, 但是在温跃层内半年循环的比重明显加强, 尤其是在 SCS3, 其温跃层内半年循环振幅远远大于年循环振幅, 使得该站温跃层内水温季节变化主要表现为半年周期。可见, 水温的半

年循环变化在次表层的重要性是不可忽视的。

(2) SCS2、SCS3 两测站的水温年循环变化、半年循环变化均在次表层内达到极值；SCS1 站年循环变化是在表层达到极大值，在 100 m 深度达到次极大值。这体现了南海不同海区热力学过程有较大的差异。

(3) 无论在年循环还是在半年循环尺度上，SCS1 与 SCS3 站温跃层内水温变化与表层水温变化反位相，在垂直方向上表现为第一斜压模态结构；在 SCS2 温跃层内水温变化基本上与表层水温变化同位相，在垂直方向上为正压模态所控制，这主要是因为此处有较强平流作用所致。

致谢：感谢台湾大学海洋研究所唐存勇教授提供 ATLAS 浮标资料。

### 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 王东晓、秦曾灏、周发琇，南海年际尺度海气相互作用的初探，气象学报，1997，**55**，33~42.
- 3 Zhou Faxiu, Zhang Yi, Huang Fei et al., Spatial pattern of the air-sea interaction near the South China Sea during winter, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 1999, **17**, 132~142.
- 4 王卫强、王东晓、齐义泉，南海表层水温年际变化的大尺度特征，海洋学报，2000，**22**，8~16.
- 5 王东晓、周发琇、李永平，南海表层水温和海面热收支的年循环特征，海洋学报，1997，**19**，38~44.
- 6 周发琇、高荣珍、张涛，南海表层水温的谐波特征，青岛海洋大学学报，1999，**29**，1~6.
- 7 Gao Rongzhen, Zhou Faxiu, and Fang Wendong, SST intraseasonal oscillation and atmospheric forcing system of the South China Sea, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 2000, **18**, 289~296.
- 8 何有海、关翠华等，南海南部热结构和水温的垂直分布，南沙群岛海区物理海洋学研究论文集 1，北京：海洋出版社，1994.
- 9 胡基福，气象统计原理与方法，青岛：青岛海洋大学出版社，1996.
- 10 Birol, K. A., P. A. Rochford, and H. E. Hurlburt, An optimal definition for ocean mixed layer depth, *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (C7), 16 803~16 821.
- 11 Zhang C., Intraseasonal variability of the upper-ocean thermal structure observed at 0° and 165°E, *J. Climate*, 1997, **10**, 3 077~3 092.
- 12 Unnikrishnan, A. S., S. P. Kumar, and G. S. Navelkar, Large-scale processes in the upper layers of the Indian Ocean inferred from temperature climatology, *J. Mar. Res.*, 1997, **55**, 93~115.
- 13 Liu, Z., Thermocline forced by varying Ekman pumping. Part 2: annual and decadal Ekman pumping, *J. Phys. Oceanogr.*, 1993, **23**, 2 523~2 540.
- 14 贺志刚、王东晓、陈举等，卫星跟踪浮标和卫星遥感海面高度中的南海涡旋结构，热带海洋学报，2001，**20** (1)，27~35.
- 15 Levitus, S., and T. P. Boyer, World Ocean Atlas 1994, Volume 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4, U. S. Gov. Printing Office, Washington, D. C., 129 pp.

## Annual and Semi-Annual Cycles of the Upper Thermal Structure in the South China Sea

Gao Rongzhen<sup>1,2)</sup>, Wang Dongxiao<sup>1)</sup>,

Wang Weiqiang<sup>1,2)</sup>, Zhou Faxiu<sup>2)</sup>, and Xie Qiang<sup>1)</sup>

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

2) (*College of Oceanic Environment, Ocean University of China, Qingdao 266003*)

**Abstract** Based on three ATLAS Mooring buoy data provided by the SCSMEX project (South China Sea Monsoon Experiment), harmonic analysis method was applied to determine amplitudes and phases for the annual and semi-annual cycles of temperatures in the upper layer (1~250 m) in the South China Sea (SCS). At the stations of SCS1 (18°05'54"N, 115°35'48"E) and SCS3 (12°58'30"N, 114°24'30"E), temperature variances of annual and semi-annual cycle in the surface layer (surface to 50 m) are out-of-phase with those in the sub-surface layer (50 m through 250 m). However, corresponding temperature variations at the stations of SCS2 (15°20'36"N, 114°57'18"E) are vertically in phase. Further studies suggest that temperature variations at SCS2 are controlled by the advection term, while temperature variations at the other two sites are dominated by the convection term induced by Ekman pumping. As far as the annual cycle concerned, maximum amplitude appears in the sub-surface at SCS2 and SCS3, but in the surface at SCS1. The maximum amplitude for the semi-annual cycle appears in the sub-surface similarly at the three sites. Nevertheless, the amplitudes for the annual cycle at SCS1 and SCS3 decrease with depth beneath the mixed layer, which results in contribution of the semi-annual cycle comparable that of annual cycle, especially at SCS3.

**Key words:** South China Sea; upper layer; annual cycle; semi-annual cycle