

# “暖池”表层对大气局地强迫的响应特征\*

刘秦玉 王 启

(青岛海洋大学物理海洋研究所, 青岛 266071)

**提 要** 利用湍流动能 (TKE) 垂直混合模式和 TOGA-COARE 加强观测期的观测资料,对“暖池”上混合层的垂直混合过程进行数值试验和数值模拟,分析表层温度、盐度的变化特征。结果表明: TKE 模式可以较好地模拟上混合层,尤其是表层温度、盐度对大气局地强迫的响应;太阳辐射是热源,感热、潜热通量等会造成“暖池”上混合层的温度降低,“暖池”对大气释放热量;降水有利于“淡水盖”形成和维持,从而使层结稳定, SST 升高。但在气温低于海温时降水可使 SST 下降;风应力的垂直混合作用能使 SST 降低,但也会因造成海洋向大气输送热量减少而使 SST 上升。正是由于这几种局地强迫与 SST 相互作用形成一个负反馈系统,使“暖池”表层温盐具有季节内振荡的特性。

**关键词** “暖池”表层 湍流动能

海洋上混合层是大气和深海之间动量、热量交换的主要“通道”,而“暖池”(warm pool)区海气相互作用又是全球海气相互作用中最典型的海区之一,“暖池”上混合层,尤其是表层(5m以内)在大气强迫作用下,反映非常灵敏;不仅有日变化,还有与大气强迫几乎同步的低频变化,而海洋表层热状况的微小变化会影响大气对流,且通过多种尺度的相互作用影响整个大气环流的变异。因此,深入研究“暖池”上混合层、表层的动力、热力学特性,探讨其规律是海气相互作用中一个十分重要的内容。

目前,用数值计算的方法研究海洋上混合层垂直混合过程已有许多模型。但是这些高阶闭合的湍流模式特别复杂,包含因素较多,不易抓住问题的实质。Niiler 等(1977)提出的参数化方案又太粗略,参数选取中的误差往往导致数值方法的失败。Gaspar 等(1990)提出了一个简单的模拟海洋垂直混合过程的湍流动能(TKE)模式,成功地模拟了 Alaska 湾 Papa 站(50°N, 145°W)和 Sargasso 海上浮标(34°N, 70°W)处海洋上层的日、季节内和季节变化。此方法简单又能较仔细地刻划海洋上混合层垂直混合特性。因此,本文首次利用 TKE 模式,针对 TOGA-COARE 加强观测期间的观测事实,来研究“暖池”表层温盐变化规律和机制。

## 1 湍流动能 (TKE) 模式

在 Gaspar 等(1990)提出的简单的 TKE 模式中,仅考虑海洋上混合层对大气局地强迫的垂直混合过程。其动量、温度、盐度随时间变化是用以下方程来描述的:

\* 国家自然科学基金资助项目,492762500 号,LASG 国家重点开放实验室资助项目。

刘秦玉,女,出生于 1946 年 3 月,博士导师,教授。

甘子钧、吴德星、吴增茂教授提供海上观测资料,谨志谢忱。

收稿日期: 1994 年 3 月 10 日,接受日期: 1994 年 7 月 10 日。

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \beta y v = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \beta y u = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (1b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{F_{sOL}}{\rho C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (1c)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_s \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (1d)$$

式中,  $u, v$  为水平速度;  $T, S$  分别表示温度和盐度;  $k_m, k_h, k_s$  分别代表动量、温度、盐度垂直湍流交换系数;  $F_{sOL}$  表示在海平面对太阳辐射的吸收;  $C_p$  是海水比热;  $I$  是太阳辐射在  $z$  处的吸收函数。  $\rho = \rho_0[1 - \alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0)]$ ,  $T_0, S_0$  是参考温度、盐度,  $\alpha, \beta$  分别是海水的温度膨胀系数和盐度压缩系数, 其对应的上、下边界条件为:

$$z = 0 \quad C_p \rho k_h \frac{\partial T}{\partial z} = H + LE + F_{(ir)} + P_h = F_{NSOL} \quad (2a)$$

$$C_p \rho k_s \frac{\partial S}{\partial z} = E - P \quad (2b)$$

$$\rho k_m \frac{\partial u}{\partial z} = \tau^{(x)} \quad (2c)$$

$$\rho k_m \frac{\partial v}{\partial z} = \tau^{(y)} \quad (2d)$$

$$z = -h \quad k_h = k_s = k_m = 0 \quad (2e)$$

式中,  $LE$  和  $H$  分别为海面潜热、感热通量;  $F_{ir}$  为净红外热通量;  $P_h$  为降水造成的热通量;  $E$  和  $P$  分别为由于蒸发和降水造成的盐度的通量;  $\tau$  为海面风应力;  $h$  为上混合层深度;  $F_{NSOL}$  是“非太阳”表面热通量的总和。

考虑到连续方程, 方程(1a), (1b)能与连续方程联立, 并推出湍流动能方程

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \overline{cw'} + \frac{\overline{p'w'}}{\rho_0} \right) - \overline{U'w'} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \overline{b'w'} - \varepsilon \quad (3)$$

式中,  $\bar{\varepsilon}$  是湍流动能;  $p$  为静压力;  $\varepsilon$  为湍流耗散能量变化率;  $b$  为浮力,  $b = g(\rho_0 - \rho)/\rho_0$ ;  $w'$  为湍流引起的垂直速度,  $\varepsilon = C_\varepsilon \bar{\varepsilon}^{3/2}/l_\varepsilon$ ,  $C_\varepsilon$  为常数,  $l_\varepsilon$  为特征扩散长度。

$$-\overline{U'w'} = k_m \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}, \quad \bar{U} = (u'^2 + v'^2)^{1/2}.$$

用数值方法借助(3)求解方程组(1)的具体步骤和有关参数的选取如 Gaspar 等(1990)所述。不同之处是本文采用了降水对海表层温度的影响  $P_h$  这一项。对  $P_h$  的处理是基于这样的设想: 设海表温度为  $T_s$  (1m 处), 雨滴在落到水面前具有气温  $T_a$ , 进入海水中只与海表(1m)的水混合, 使海表温度降低, 并导致层结的改变, 再通过湍流混合影响到其它深层海水。这种影响的程度由降水量、海气温差决定。

## 2 数值试验与数值模拟

为了更深入地研究“暖池”上表层对不同大气强迫的响应, 针对“实验3号”船在 TOGA-COARE 加强观测期 (2°S, 158°E) 的观测资料, 进行数值试验与数值模拟。在此,

用垂直方向差分求解方程(4)和方程(1)时,垂直方向的格距为 1m, 其混合层深度  $h$  由实测资料预先给出(随时间变化)。时间步长为 5min。

根据 Liu Qinyu (1994) 提出用此 TKE 模式模拟上混合层对大风强迫的响应适应时间为 12h (大风强迫 12h 以后 SST 及混合层深度随时间变化很小)。因此在数值模拟和试验中,着重研究表层温盐日以上的变化,而忽略对其日内变化的研究。(例如,多考虑太阳辐射时采用日平均值)

应用观测到大气强迫场(1月3日零时—1月13日零时)资料,用 TKE 模式进行了数值模拟和数值试验,其初始场是用 1 月 3 日零时现场观测温度、盐度和海流资料。强迫场是每 3 小时一次的观测值(包括降水等)。在数值试验中,大气强迫场有所不同: 试验 1 中  $\tau^{(x)} = \tau^{(y)} = 0$ ; 试验 2 中非辐射热通量  $F_{NSOL} = 0$ ; 试验 3 中忽略降水故  $P_h = 0$ ; 试验 4 中  $F_{SOL} = 0$ ; 其余各项强迫与数值模拟中的强迫完全相同,其结果如图 1 所示。

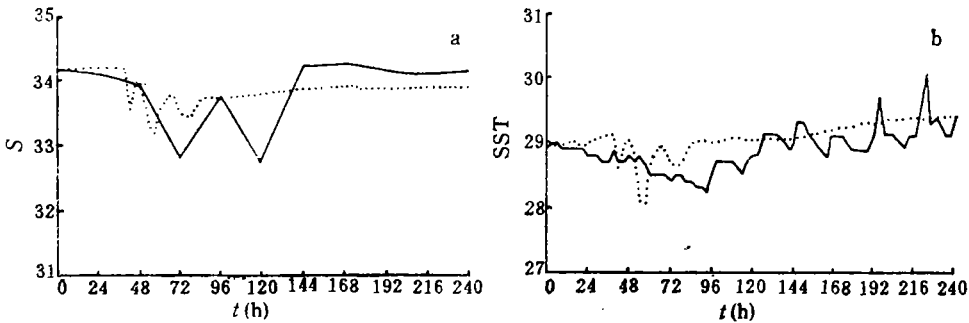


图 1 表层盐度(a)和温度(b)随时间变化(初始时间为 1 月 3 日零时)

Fig. 1 Variation of surface layer salinity (a) and temperature (b)

——实测; .....数值模拟。

**2.1 数值模拟结果分析** 从图 1 数值模拟结果可见,与观测值相比,此一维 TKE 模式对 SST 和表层盐度的模拟在总体变化趋势上一致,不同之处除去观测值中包含因辐射引起的日变化而模拟结果无日变化以外,最大差异表现在以下两点。

**2.1.1** 从 3 日零时到 4 日 15 时(积分 39h)观测的 SST 是下降的而模拟 SST 值是上升的,观测值小于模拟值。从 6 日零时到 8 日零时观测 SST 值也比模拟的 SST 值小。这个阶段正对应西风爆发 10d 后表层急流较强,因此这种观测与模拟的差异可以用 TKE 模式中不含平流对 SST 的影响来解释。因为 Philander (1990)指出,热带海洋 SST 的变化主要来自 4 个方面,一是海表面热通量;二是平流作用;三是风的垂直混合作用;四是上升流作用。而 TKE 模式中只包含风的垂直混合和海表面热通量。

**2.1.2** 因降水对 SST 和表层盐度的影响与观测不同。在 TKE 模式 10d 数值模拟中, SST 和盐度最小值都出现在 1993 年 1 月 5 日 8 时,比局地降水最强值出现的时间(1 月 4 日)落后一天。而实际观测到 SST 的最低值出现在 7 日零时,表层盐度最小值出现在 8 日零时。这是因为模式本身没包含平流及垂直运动对表层温盐的影响。实际上观测点周围较冷而淡的水在强平流持续作用下,使得海表温度、盐度在局地降水停止后,继续下降。

另外,图 2 表明了 1 月 11 日 8 时和 20 时的数值模拟结果,除混合层底处有一定偏差外,其余温盐垂直分布与观测值几乎一致。

总之,模拟结果说明了 TKE 模式能较好地完成对垂直混合过程的数值模拟。

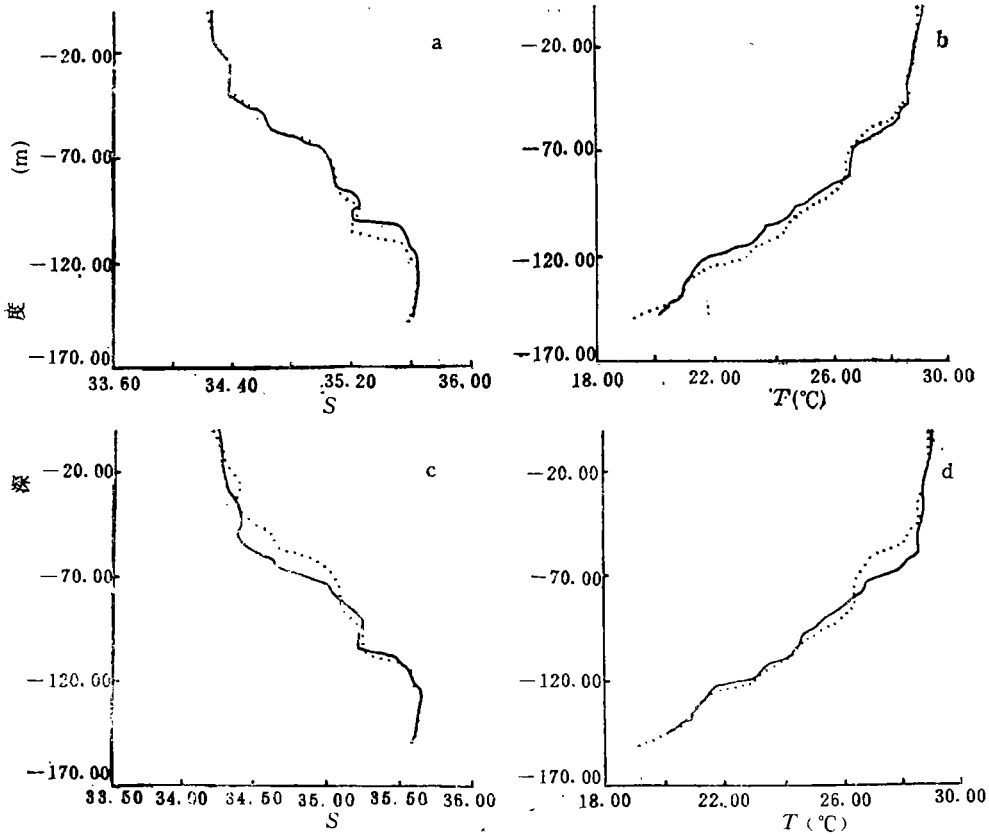


图 2 盐度和温度的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of salinity and temperature  
a,b. 1 月 11 日 8 时; c,d. 1 月 11 日 20 时。——实测;.....数值模拟。

**2.2 数值试验结果分析** 图 3、图 4 表明了 4 个数值试验结果与数值模拟结果的比较,从图中可得出以下结论。

**2.2.1 风的垂直混合作用对 SST 的影响** 是一个自我调节的负反馈过程。从图 3a 可见,当风应力为零时, SST 会急剧上升,但 SST 的增加导致海洋向大气提供更多的热量(感热、潜热等),海表的失热又会使 SST 急剧下降,同时这也说明风的垂直混合作用会使 SST 降低,也能使“暖池”上混合层向大气释放的热量变小,从而控制 SST 的下降。最终(10d 后), SST 在风应力为零和考虑实际风应力二种不同强迫情况下,用 TKE 模式计算出的结果差别不大。这说明 TKE 模式本身对 SST 有一个负反馈的调整作用。实际海洋对大气的响应也具有这种特点。

**2.2.2 风的垂直混合作用使表层盐度增大。**从图 4a 可见,与无风应力作用的计算结果相比,数值模拟结果表层盐度要比试验 1 表层盐度高 2 左右。这是由于风应力的垂直混合

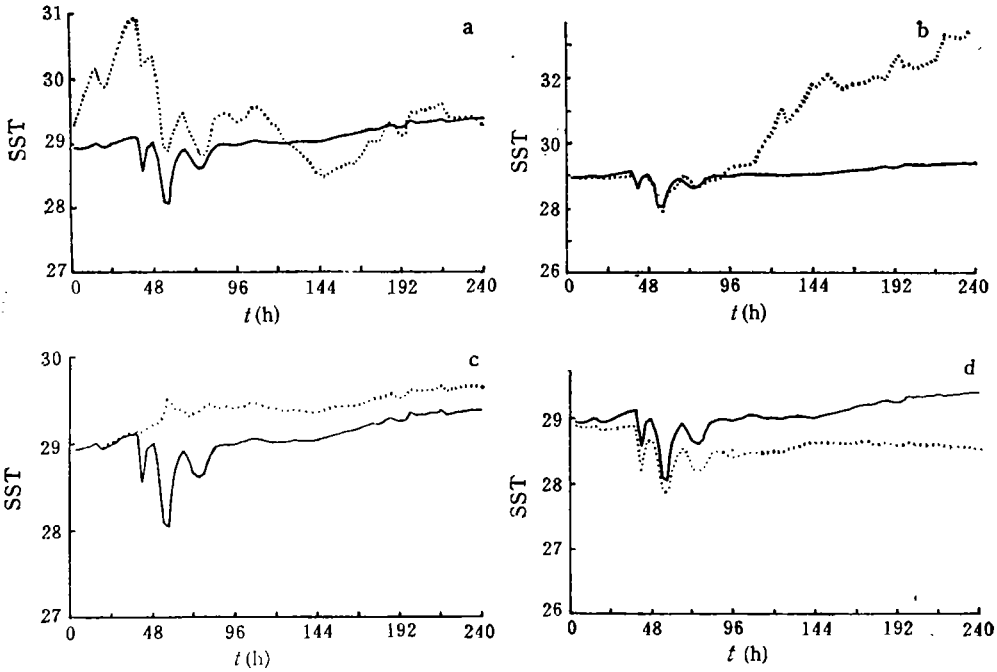


图 3 SST 数值试验与数值模拟的比较

Fig. 3 Comparison of SST between numerical experiment and simulation

—数值模拟; .....数值试验。

作用将底层高盐水搅到表层。

**2.2.3** 非太阳辐射热通量能抑制 SST 的增长对表层盐度影响不大。从图 3b 可见, 如果非太阳辐射热为零(感热、潜热、净红外热通量为零), 海洋不向大气施放热量, SST 会一直保持上升。但对表层盐度影响只是通过热力湍流起作用, 盐度的变化甚微(图 4b)。

**2.2.4** 降水作用表现在两个方面:(1)降低“暖池”表层盐度,使层结更稳定,有利于 SST 升高;(2)在气温低于海温时降水作用会使 SST 降低。

从图 3c 和图 4c 可见,忽略降水影响后,在强降水期间,试验 3 的 SST 要比数值模拟的 SST 高 1°C 多,最大差值达 1.5°C 以上。10d 内降水引起的一系列影响(感热、潜热变化和盐度变化)会使 SST 降低 0.3°C,而表层盐度也降低约 3。因此,不能单纯地提出,“暖池”上空的降雨形成淡水盖,使 SST 上升。问题应分阶段讨论:在降水期间,由于空气温度低于海表层温度,降水会使 SST 急剧下降,且表层盐度下降。而在降水后 3d(积分 96h),上混合层层结更趋稳定,则会抑制垂直混合作用而使 SST 上升。

**2.2.5** 太阳辐射是上混合层的主要热源,也会使“暖池”上混合层表层盐度降低更趋于稳定。从图 3d 和图 4d 可见,如果没有太阳辐射作用, SST 在 10d 内会比有太阳辐射时低近 1°C,表层盐度也会相差 0.3,这是由于太阳辐射是上混合层的主要热源,如不考虑太阳辐射,表层温度会下降,容易引起层结不稳定,垂直湍流混合加强,而把下层高盐水翻到表层使表层盐度升高。

另外,太阳辐射量是随季节和云量的变化而变化,在季节内的时间尺度中,影响太阳

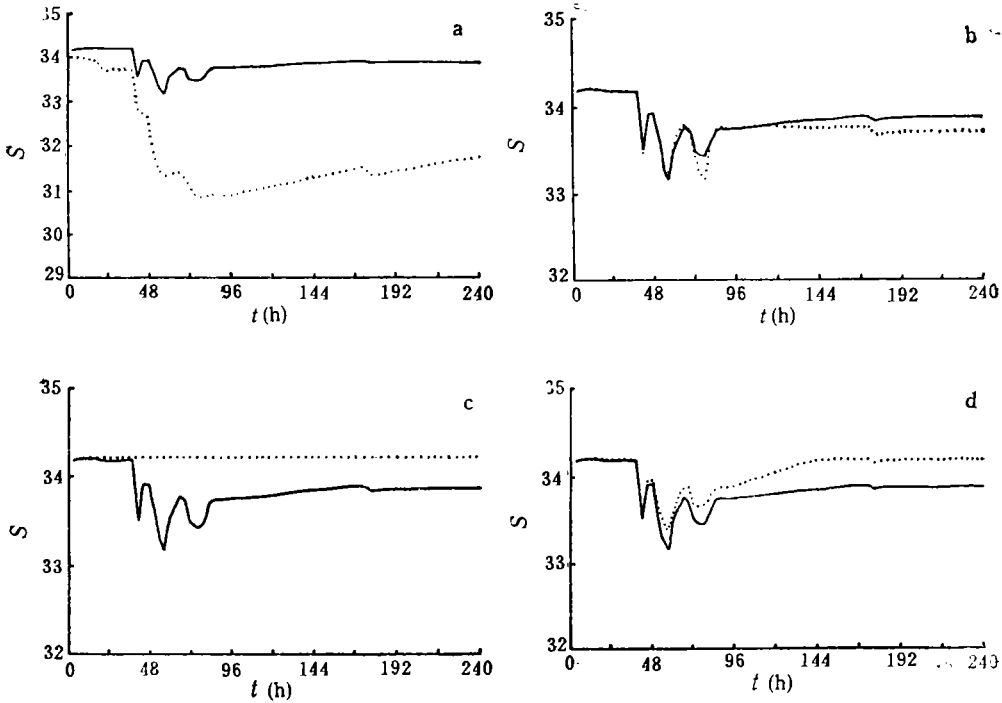


图 4 表层盐度数值试验与数值模拟的比较  
 Fig. 4 Comparison of surface layer salinity between numerical experiment and simulation  
 ——数值模拟; .....数值试验。

辐射等主要因素是云量,因此大气对流加强时云量增多,海洋从太阳辐射中得到得热量变小,也能使 SST 降低,而大气对流减弱时,云量变小,辐射强,也能使 SST 升高。

### 3 结论

综上所述,“暖池”表层对大气局地强迫的响应是一个复杂的过程, TKE 模式基本上能反映上混合层在大气强迫下的垂直混合过程。用 TKE 模式所做的数值试验进一步说明。

**3.1** 太阳辐射是“暖池”上混合层的主要热源,它能使表层盐度降低,层结更稳定,而在“暖池”区感热、潜热等则会使其温度下降。

**3.2** 降水过程对表层的影响是两个相互制约的过程。在气温低于 SST 时,它既可以直接使 SST 降低,又能使表层盐度降低,上混合层层结更稳定,抑制表层热量向下输送,引起 SST 的增大。

**3.3** 风应力的垂直混合作用也会受到其它因素的抑制而造成连锁反应。强风能使表层盐度增大,层结趋于不稳定, SST 减小,而在 SST 减小后,海洋对大气释放热量也就随之减小, SST 又重新恢复。

因此,“暖池”上混合层对大气局地强迫的响应系统是一个相当复杂、许多因素相互制约的负反馈系统。正是这种“负反馈”的性质才会导致海气耦合系统呈现周期性季节内振荡的特性。

因为目前只有实验 3 号的单站观测资料,无法在数值模式中加上平流效应以使数值模拟更准确,这正是本文的遗憾之处。有关“暖池”上混合层季节内循环的观测事实和理论将在另文中讨论。

### 参 考 文 献

- Gaspar, P., Gregoris, Y., Lefevre, J. M., 1990, A simple eddy kinetic energy model for simulation of the oceanic vertical mixing: Tests at PAPA and Long-Term upper ocean study site., *J.G.R.*, **95**: (9) 16 179—16 193.
- Liu Qinyu, 1994, Mixed-layer response to atmospheric forcing, *Chin. J. Ocean. Limn.*, **12**(3): 280—283.
- Niiler and Kraus, 1977, One-dimensional Models of the Upper Ocean, In *Modeling and Prediction of the Upper Layers of the Ocean*, Proceedings of a NATO Advanced Study Institute, Pergamon (New York) pp., 143—172.
- Philander, S. G., 1990, El Niño, La Niño, and the Southern Oscillation, Academic Press (New York), pp. 59—74.

## THE CHARACTERISTICS OF “WARM POOL” SURFACE LAYER RESPONDING TO LOCAL ATMOSPHERIC FORCE

Liu Qinyu, Wang Qi

(*Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*)

### ABSTRACT

A numerical experiment of the vertical mixed process of “warm pool” mixed layer was made and the variation characteristics of surface layer temperature and salinity were analysed based on the vertical mixed model of the turbulent kinetic energy (TKE model) and intensive observation data of TOGA-COARE. The results show that the TKE model can simulate well the response of temperature and salinity in the upper mixed layer especially in the surface layer to local atmospheric forcings. Solar radiation is heat source and sensible and latent heat fluxes can decrease the temperature of the upper mixed layer, the “warm pool” releases heat to atmosphere. Precipitation is favourable to forming and maintaining a “fresh water lid” so that stabilizes the stratification and increases SST, however, when air temperature is colder than sea temperature, precipitation decreases SST. The vertical mixing due to wind stress can cause SST decrease, but it can also reduce the heat flux from sea to air so that SST increases. The interaction between local forcings and SST is a negative feedback system. The temperature and salinity of the surface layer have intraseasonal oscillation characteristics.

**Key words** “Warm pool” Surface layer Turbulent kinetic energy