

1998 年夏季风爆发前后南海上混合层的特征及成因*

刘秦玉 贾旭晶 孙即霖

张秀芝

(青岛海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266003)

(国家气候中心, 北京 100081)

摘 要 利用 1998 年“南海季风实验 (SCSMEX)”南北部两个点的资料, 采用 J. Launianen 和 T. Vihma 提出的方法, 计算了潜热通量、感热通量和风应力, 分析了南海上混合层动力、热力特征及其与南海夏季风爆发之间的关系。发现在西南季风爆发前后, 南海北部、南部的两个观测点的海洋上混合层温度和深度随时间的变化具有不同的特点: 北部混合层温度经历由高到低再变高, 混合层深度经历由浅变深再变浅的 3 个时段; 南部混合层温度经历由低到高再变低, 混合层深度经历由深变浅再变深的 3 个时段。这与南海南、北部海面的风和海面热通量具备不同的特征有关。在 5~6 月南海上混合层动力、热力特征基本受局地风与短波辐射控制, 海面潜热和感热的作用较小。在 5 月份, 南海南部观测点海面附近存在浅薄的高盐高密度层, 在 60 m 以上的上层海洋内存在着许多高盐高密度核。在 1998 年“南海季风实验”期间南海南、北部两个观测点都存在较浅薄的障碍层, 在西南季风爆发期间, 南海北部观测点的障碍层较厚达到 20 m 以上。

关键词: 夏季风爆发; 南海; 混合层

1 引言

海洋混合层的变化对短期气候和长期天气的变化具有重要的影响作用。我们曾经利用 TOGA-IOP 的观测资料进行了热带西太平洋上层海洋对大气季节内振荡响应的研究, 揭示了暖池区海洋上层季节内振荡的形成机制^[1,2]。1997~2000 年开展的国际合作项目“南海季风试验 (SCSMEX)”的目的是为了更好地了解东南亚和中国南部地区的季风爆发、维持和变化的主要物理过程, 从而改进对季风的预报。为了达到这一目的, 科学目标之一就是阐明南海地区海洋对季风强迫响应的物理过程和海气相互作用过程。

有关南海上混合层已有一系列的有关研究。徐锡桢^[3]利用 1977 年 10 月和 1978 年 6~7 月两次南海中部海域调查资料, 对该海区的温度、盐度、密度分布作了分析, 发现该海区在 6~7 月存在盐度双跃层和逆跃层现象。据此, 他指出西南季风期间中南半岛和南沙北沿存在范围广阔, 持续时间长的上升流区, 涌升过程主要保持在 50~100 m 之间。根据 1907~1990 年南海断面调查资料, 徐锡桢等^[4]采用三次样条插值方法计算了整个南海温跃层的深度、厚度、强度。他们将温跃层分为两种类型: 北部陆架区内为辐射型, 季节变化显著; 深水区为不同水体叠置型, 季节变化小。他们还提出了温跃层

的短期一维预报模式,但由于机制过于简单,对风等的混合作用反映不出,影响了预报效果。邱章等^[5]分析了1994年9月南沙群岛海区综合考察的CTD标准层资料,发现调查海区(108~115°E, 4~11°N)温跃层最大深度分布在中部偏西海域,部分测站存在多跃层现象。

纵观前人的工作,虽然对南海混合层有了一些研究,但仅限于季节平均资料和断面调查资料上,这是由于在南海从未有超过15天以上的定点船舶观测资料。1998年南海季风试验的IOP观测给我们提供了长达2个月的大气、海洋同步观测资料。尽管利用该资料的南海海气相互作用的研究工作相继出现^[6,7],但利用该资料分析混合层和温跃层变化的特征及其对南海季风的响应的工作还无人涉足。南海对夏季风爆发的响应的物理过程等许多有关的科学问题仍然没有得到深入的研究。为了对这些物理过程有一个基本的认识,本文利用南海季风实验期间3小时一次的气象观测资料和CTD资料,分析了南海不同地点(南部和北部)上混合层与大气强迫的关系及海洋上层温度、盐度、密度的垂直分布特征。

2 资料及计算方法

2.1 资料来源

本文所用的资料为1998年“南海季风实验”(SCSMEX)中“科学1号”与“实验3号”科学考察船观测CTD资料和气象资料,包括风速、海水表面温度、海表面大气温度、云量、相对湿度等。

“南海季风实验”资料观测位置和观测时间:“实验3号”位于(20°N, 116°E),观测时段分别为1998年5月8日11时到5月21日23时和1998年6月4日08时到6月23日11时,资料的观测时间间隔为3h。“科学1号”位于(6°15'N, 110°E),观测时段分别为1998年5月5日23时至5月23日23时和1998年6月6日02时至6月21日08时(其中6月11日20时到6月14日11时无资料),资料的时间间隔为3h。

2.2 潜热、感热和风应力的计算方法

本文采用J. Launianen和T. Vihma提出的方法和程序,计算了潜热通量、感热通量和风应力。计算方法简述如下。

由Monin-Obukhov相似理论,近海面常通量层中风速 U 、位温 θ 和比湿 q 的无量纲梯度可以表示为

$$\frac{\partial U}{\partial z} \frac{kz}{u_*} = \varphi_m(\zeta), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{kz}{\theta_*} = \varphi_h(\zeta), \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} \frac{kz}{q_*} = \varphi_e(\zeta), \quad (3)$$

式中, k 为von Karman常数, z 为高度, φ_m 、 φ_h 和 φ_e 分别为风速、位温和比湿梯度的普适函数, $\zeta = z/L$ 为稳定度参数, L 为Monin-Obukhov长度, u_* 为摩擦速度,

θ_* 和 q_* 分别称为温度和比湿的尺度参数。 ζ 定义如下:

$$\zeta = \frac{z}{L} = - \frac{zgkH(1 + 0.61T_0c_pE/H)}{u_*^2 T_0 c_p \rho}, \quad (4)$$

其中, g 为重力加速度, H 为感热通量, T_0 为近海面层平均绝对温度, c_p 为空气定压比热, E 为水汽通量, ρ 为空气密度。 u_* 、 θ_* 和 q_* 定义如下:

$$u_* = (\tau / \rho)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\theta_* = -H / \rho c_p k u_*, \quad (6)$$

$$q_* = -E / \rho k u_*, \quad (7)$$

其中, τ 为动量通量。

对 (1) ~ (3) 式, 从 z_0 到 z 积分, 并考虑到 (5) ~ (7) 的定义可得通量的廓线形式:

$$\tau = \rho k^2 [\ln(z/z_0) - \psi_m(\zeta) + \psi_m(\zeta_0)]^{-2} U^2, \quad (8)$$

$$H = \rho c_p k^2 [\ln(z/z_0) - \psi_m(\zeta) + \psi_m(\zeta_0)]^{-1} [\ln(z/z_T) - \psi_h(\zeta) + \psi_h(\zeta_T)]^{-1} (\theta_s - \theta_a) U, \quad (9)$$

$$E = \rho k^2 [\ln(z/z_q) - \psi_m(\zeta) + \psi_m(\zeta_0)]^{-1} [\ln(z/z_0) - \psi_e(\zeta) + \psi_e(\zeta_q)]^{-1} (q_s - q_a) U, \quad (10)$$

式中, z_0 、 z_T 和 z_q 分别称为风、温、湿粗糙长度, ψ_m 、 ψ_h 和 ψ_e 分别为 φ_m 、 φ_h 和 φ_e 的积分形式。在计算式中, 对不稳定大气采用 Businger-Dyer 公式, 对稳定大气采用 Webb 形式。

为了能利用常规海洋、气象资料来计算海-气间湍流通量, 由 (8) ~ (10) 的形式提出了所谓块体通量参数化方法, 即:

$$\tau = \rho C_d U^2,$$

$$H = \rho c_p C_h (\theta_s - \theta_a) U,$$

$$E = \rho C_e (q_s - q_a) U,$$

式中, C_d 、 C_h 和 C_e 分别为动量、感热和水汽的块体通量系数。显然有:

$$C_d = C_d(z, z_0, \psi_m(\zeta)),$$

$$C_h = C_h(z, z_0, z_T, \psi_m(\zeta), \psi_h(\zeta)),$$

$$C_e = C_e(z, z_0, z_q, \psi_m(\zeta), \psi_e(\zeta)).$$

计算中假定, $z_T = z_q$ 及 $\psi_h = \psi_e$, 于是有 $C_h = C_e$ 。以下用 C_{hc} 表示感热和潜热的块体通量系数。

用以上公式, 采取中性假定为第一步试算, 然后用循环迭代计算的方法, 求出 τ 、 H 、 E 以及 C_d 、 C_{hc} 。迭代结束的判据为前后两次计算出的大气稳定参数 $|z/L|$ 之差小于 0.01。将本方法计算结果与直接通量观测资料进行对比, 结果相当一致^[8]。将本计算方法应用于南海海面, 在强稳定大气层结条件和不稳定层结条件下都可以较快地收敛

(一般迭代 3~5 次), 模式是适用的。用该模式计算“科学 1 号”船在 SCSMEX 加强观测期间的感热和潜热, 与用普通参数化方法计算的结果^[6]基本相同。

2.3 混合层深度及障碍层的确定

由于南海地处热带, 降水较频繁, 在风速较小、垂直混合弱、降水较剧烈时, 常常出现“淡盖”的现象, 则造成在表层海水出现密度梯度较大的“浅混合层”现象。为了避免这种虚假的混合层出现, 使我们对观测资料的分析更有物理意义^[9], 在本文中采用由表层盐度和比表层温度低 0.5°C 的温度值计算出一个密度, 这个密度所在的深度处即混合层底所在处, 称为混合层深度^[10]; 自海表面向下, 与表层温度值之差大于 0.5 度的温度值所在深度为温跃层上界深度; 由温跃层上界定义求得深度减去由混合层定义求得深度, 若差值为正, 该差值为障碍层厚度^[10]。障碍层的存在表示, 盐度的跃层位于温跃层之上时可能造成混合层底位于温跃层上界之上的现象存在, 在混合层底与温跃层上界之间形成的对垂直混合造成障碍, 它的存在会类似温跃层一样影响海洋上层的垂直混合。按照上述定义, 求出了 1998 年 SCSMEX-IOP 期间南海南、北两个观测点在夏季风爆发前、后混合层和障碍层的变化。对比发现, 南海北部观测点和南部观测点的混合层平均深度分别为 10.2 m 和 27.3 m ; 南海北部观测点和南部观测点都存在着障碍层, 其平均值分别为 4.6 m 和 2.3 m 。在南海北部观测点处, 5 月下旬和 6 月上旬障碍层的厚度较大, 超过 20 m , 最大达 28 m , 这与南海北部西南季风爆发和云量增多对应。由于受降水和蒸发资料的限制, 本文无法对该障碍层的形成机制进行研究。

3 混合层的动力、热力特征分析

依据观测结果, 重点分析混合层温度、深度随时间变化的特征及影响其变化的主要物理过程。

3.1 南海北部观测点混合层动力、热力特征分析

图 1 为南海北部观测点 5 月份所受到的短波辐射、海洋向大气输送潜热、感热、风的东西向分量和南北向分量、海面受到的风应力以及海表面混合层温度和混合层深度随时间变化的情况。从图 1 可明显看出, 海气界面热量交换中量级最大的是短波辐射, 其次是潜热, 感热最小。由于资料的原因, 本文没有考虑海面有效回辐射。根据有关的研究^[6,11]及作者以前的工作, 南海地区海面有效回辐射量值较小, 大约为潜热通量的 $1/10$, 忽略有效回辐射对本文分析结果不会有很大影响。由图 1a 可见, 海面受到的短波辐射, 日变化最为明显, 振幅也最大, 因此海面净热量收支也具有显著的日变化特征。

在 5 月 16 日以前, 每天海面净热量收支的最大值几乎相同, 约为 $800\text{ W}/\text{m}^2$, 混合层温度较高 (28°C 以上) 最高为近 30°C ; 5 月 16 日以后, 海面净热量收支每天的最大值明显减小, 除了在 5 月 21 日最大值又达到 $800\text{ W}/\text{m}^2$ 以外, 其他时候净热通量最大值不超过 $400\text{ W}/\text{m}^2$ 。虽然短波辐射直接影响着混合层温度, 但值得注意的是, 混合层温度在 5 月 15 日已经开始迅速下降, 这显然不仅是短波辐射的作用, 此时风应力增大使上层海水的湍流混合增强, 使混合层温度降低。从图 1f, g 可以发现风应力与混合层温度的对应关系: 在 5 月 16 日以前, 由于短波辐射的日均值几乎不变, 风应力

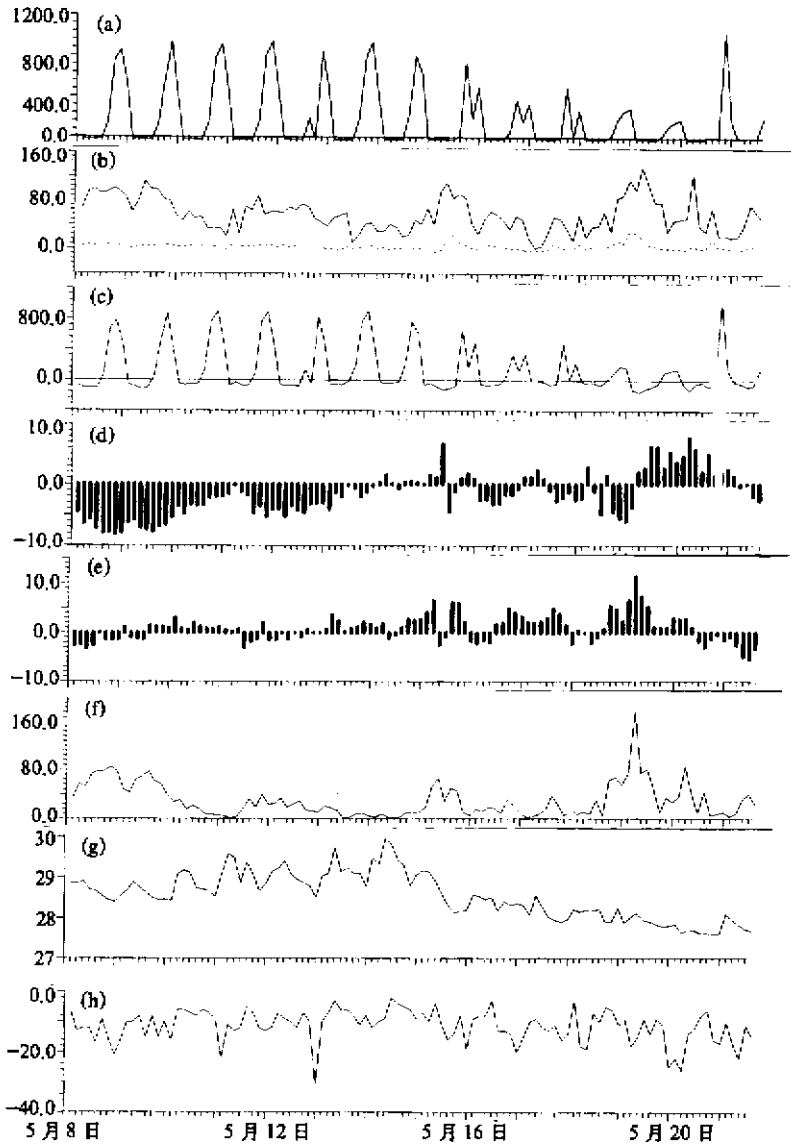


图 1 1998 年 5 月南海北部海面短波辐射 (a, 单位: W/m^2)、感热 (虚线) 和潜热 (实线)

通量 (b, 单位: W/m^2)、海面净热量收支 (c, 单位: W/m^2)、风的東西向分量 (d, 单位: m/s)、
风的南北向分量 (e, 单位: m/s)、风应力 (f, 单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)、
混合层温度 (g, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和混合层深度 (h, 单位: m) 随时间的变化

增大, 混合层温度减小; 风应力减小, 混合层温度增大。混合层温度的极大值几乎都对应风应力的极小值; 当风应力几乎为 0 时, 不仅海面向大气输送的潜热减小了, 而且使混合程度减弱。5 月 16 日以后, 由于短波辐射减少和风应力增大, 强混合与潜热增大的共同作用, 混合层温度逐渐下降到 28°C 以下。

将图 1h、f 和图 1c 进行对比, 可以发现混合层深度随时间的变化特征。在 5 月 16 日以前, 混合层深度的变化基本受风应力控制, 风应力极大值的出现对应混合层深度的

极大值, 该时段混合层深度较浅, 平均值大约为 10 m 左右; 但在 5 月 13 日, 混合层有一个最大值 32 m, 而此时混合层温度虽低, 但风应力并不是最大, 海面也处于得热状态。从南海北部观测点 5 月观测的海洋各层温度、盐度和密度随时间变化图 (图 2) 中可以找到问题的答案。在图 2 中, 5 月 13 日, 突然出现从海表面直到 30 m 左右盐度几乎没有变化的现象, 造成了一个深的密度较均匀的混合层。该现象的成因还不清楚。5 月 16 日以后, 云量增加, 短波辐射减少, 风应力加大。通过海面失去的潜热和垂直混合加强, 混合层深度逐渐变深到近 20 m。在 20 日出现混合层深度的极大值 (30 m)。此刻正与整个南海夏季西南风爆发对应。

图 3 为南海北部 6 月份海面各个气象要素及海洋上混合层温度、深度随时间变化图。6 月 11 日以后, 同 5 月份一样, 短波辐射有明显的日变化特征。6 月 11 日 5 时以前, 由于云量较多, 短波辐射几乎为零, 因此除了 6 月 6 日 5 时海面净热量收支超过了 800 W/m^2 以外, 其他天内的净热量最大值都小于 400 W/m^2 (图 3)。对于风应力而言, 6 月 11 日以前的西南风要比以后的大。与此相对应, 混合层温度在 6 月 11 日以前, 从大于 28.5°C 下降到 27°C , 混合层深度较深。而 6 月 11 日以后, 混合层温度迅速上升几乎每天的极大值都大于 28°C (图 3)。混合层的整体深度也较 6 月 11 日以前变浅, 平均值大约为 10 m。混合层温度和深度的变化整体趋势是由局地风应力与热通量控制, 但从个别的极大值可以看出, 一定还有其他的机制在起作用。或者是降水, 或者是内潮 (南海北部观测点处于陆坡区) 和平流效应。

综上所述, 在 1998 年季风爆发前后, 南海北部的海洋上混合层温度和深度的变化

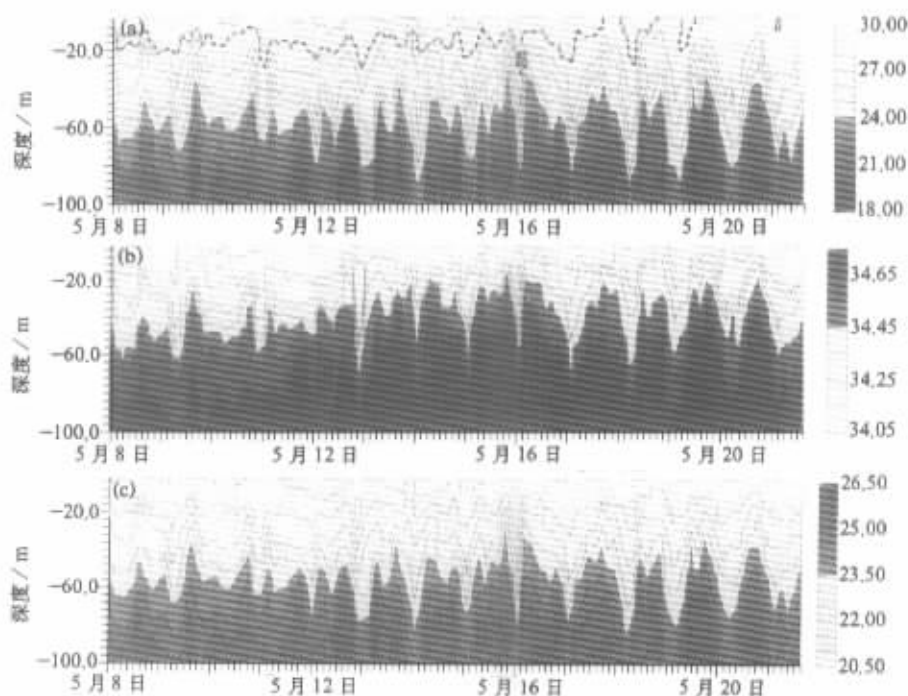


图 2 1998 年 5 月南海北部海洋上 100 m 温度 (a, 粗虚线为 28°C 等温线, 单位: $^\circ\text{C}$)、

盐度 (b, 单位: ‰) 和密度 (c, 单位: kg/m^3) 随时间的变化

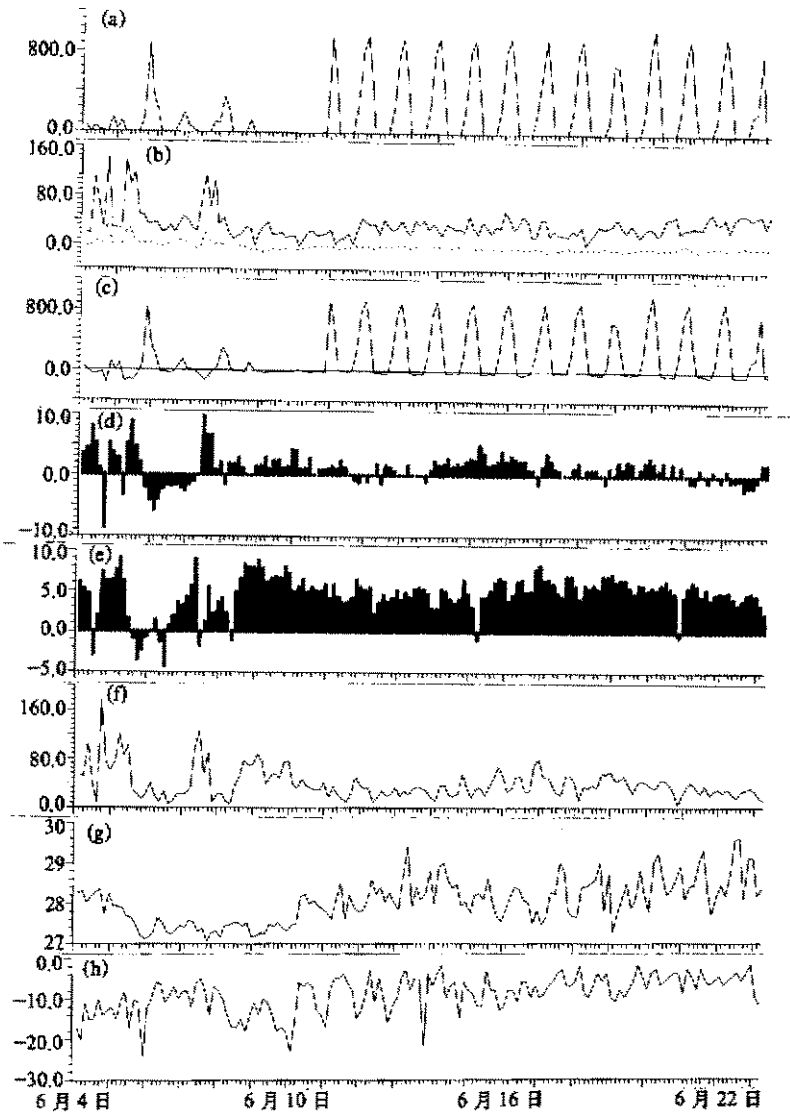


图3 1998 年 6 月南海北部海面短波辐射 (a, 单位: W/m^2), 感热 (虚线) 和潜热 (实线) 通量 (b, 单位: W/m^2), 海面净热量收支 (c, 单位: W/m^2), 风的東西向分量 (d, 单位: m/s), 风的南北向分量 (e, 单位: m/s), 风应力 (f, 单位: $kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-1}$), 混合层温度 (g, 单位: $^{\circ}C$) 和混合层深度 (h, 单位: m) 随时间的变化

可分为 3 个时段: 第 1 个时段 (5 月 16 日以前) 混合层温度较高 ($28^{\circ}C$ 以上), 深度在 10 m 左右, 该时段对应夏季西南风爆发前; 第 2 个时段 (5 月 16 日以后到 6 月 10 日) 混合层温度较低 (小于 $28^{\circ}C$), 混合层深度逐渐增大到 20 m, 该时段对应夏季西南风爆发; 第 3 个时段 (6 月 10 日以后) 混合层深度逐渐减少到 10 m, 混合层温度又逐渐恢复到大于 $28^{\circ}C$, 该时段对应夏季西南风的维持。

3.2 南海南部观测点混合层动力、热力特征分析

图 4 是南海南部观测点 5 月份的海表面各个气象要素及海表面温度混合层温度及混合层深度随时间变化图。我们看到，海面吸收的短波辐射除有很明显的日变化外，日平均值变化不大，只是在 5 月 8 日和 5 月 21 日海面吸收短波辐射要小于其他时候海面吸收的短波辐射，这是云量变化引起的。整个 5 月风应力由大变小，潜热也呈现出由大到

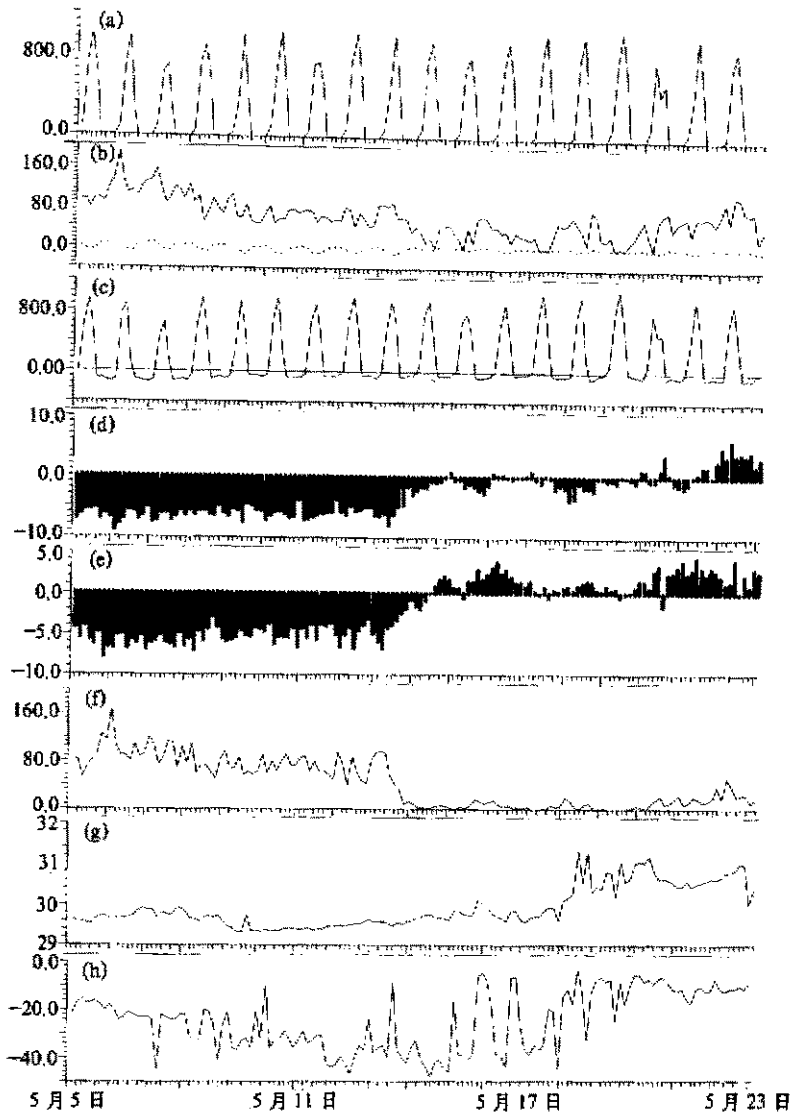


图 4 1998 年 5 月南海南部海面短波辐射 (a, 单位: W/m^2)、感热 (虚线) 和潜热 (实线) 通量 (b, 单位: W/m^2)、海面净热量收支 (c, 单位: W/m^2)、风的東西向分量 (d, 单位: m/s)、风的南北向分量 (e, 单位: m/s)、风应力 (f, 单位: $kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-1}$)、混合层温度 (g, 单位: $^{\circ}C$) 和混合层深度 (h, 单位: m) 随时间的变化

小的变化趋势,海面净热通量收支有比较明显的日变化,但平均值变化不大。5月13~14日风应力突然变小,混合层温度突然升高,升高的程度竟然大于 1°C ,而且这种高温状况几乎一直持续到最后。就5月份南海南部状况来看,由于净热通量的日平均值变化不大,混合层温度的总体变化趋势决定于风应力的变化趋势。

南海南部观测点5月份混合层深度变化与风应力有较好的对应关系,5月14日以前在强东北风的作用下,强混合作用使混合层深度逐渐加深达到40 m;5月14日以后混合层深度迅速变浅,到20 m左右,这种状况维持到5月底。在对海面热通量及风应力的响应方面,南部观测点的变化与北部观测点相似,但在许多时段内,存在着特殊的变化特征:例如在5月9日到5月12日在40~60 m深处,出现一高盐水,它的存在会影响该处的湍流混合(图5);5月14日以后,风应力几乎为零,混合层深度随时间变化的趋势并不与海面净热通量完全一致,海表面出现约10 m深的高温水。这说明南部观测点5月份混合层深度变化除受风应力和热通量影响以外,还可能在某些时候受降水平流或其他因素的影响。

图6是南海南部6月份海面吸收短波辐射,海洋向大气输送潜热,感热,海面净热量收支,海面风应力,混合层温度、混合层随时间变化图。可以看出,南海6月份海面得到的短波辐射虽然还有比较明显的日变化,但由于云量的增加使短波辐射的日平均值不等。与南海北部5、6月份和南海南部5月份明显不同的是,短波辐射的日极大值有非常显著变化。因此,使海面净热通量的日极值也有较大的变化,如6月9日得到最大热通量为 884.2 W/m^2 ,而6月10日和17日得到最大热通量仅为 40.2 W/m^2 ,二者

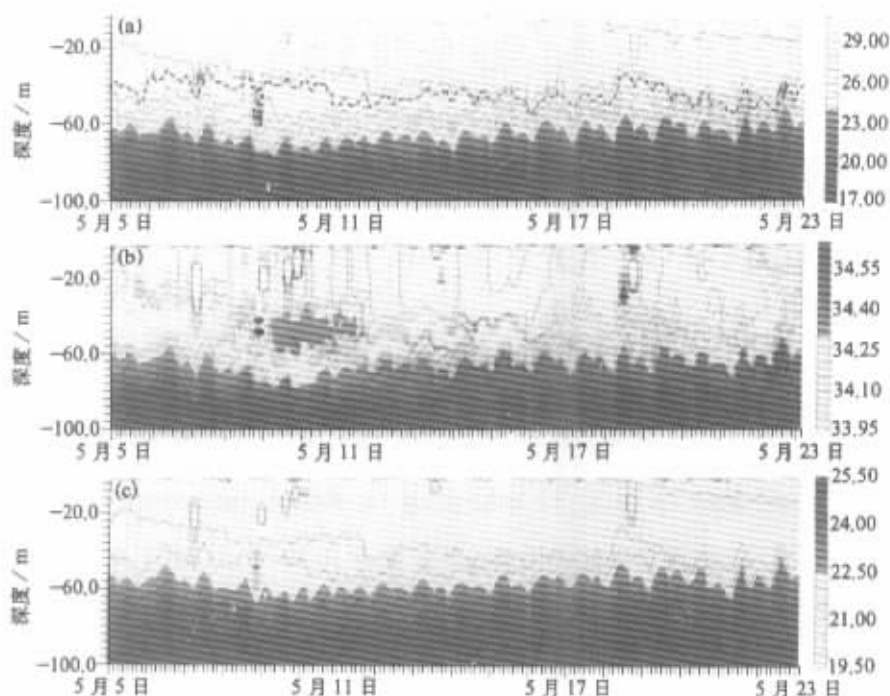


图5 1998年5月南海南部海洋上100 m温度(a,粗虚线为 28°C 等温线)、盐度(b,单位:‰)和密度(c,单位: kg/m^3)随时间的变化

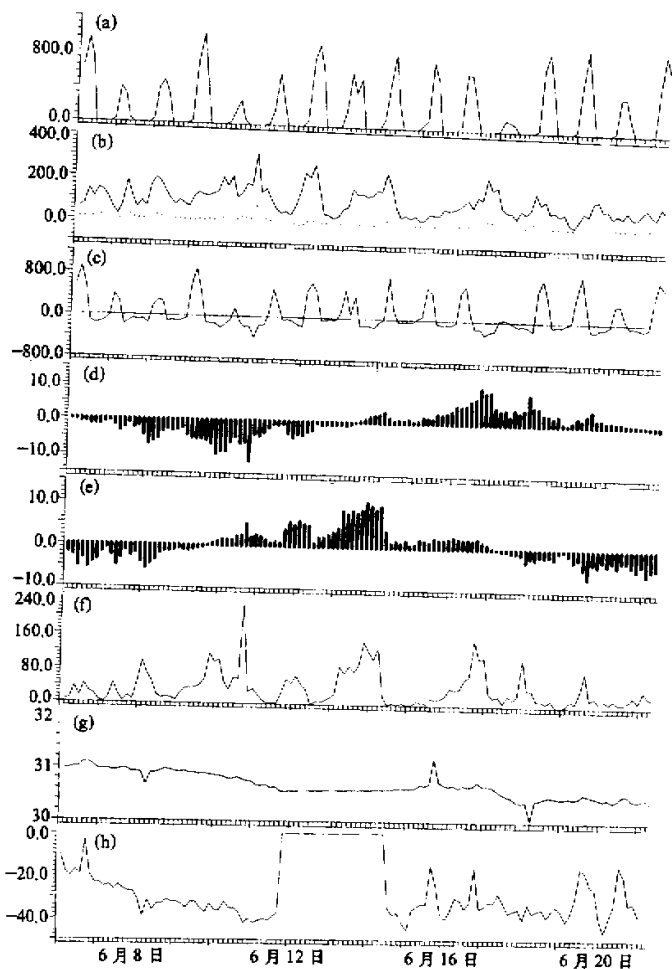


图 6 1998 年 6 月南海南部海面短波辐射 (a, 单位: W/m^2)、感热 (虚线) 和潜热 (实线) 通量 (b, 单位: W/m^2)、海面净热量收支 (c, 单位: W/m^2)、风的东向西分量 (d, 单位: m/s)、风的南北向分量 (e, 单位: m/s)、风应力 (f, 单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)、混合层温度 (g, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和混合层深度 (h, 单位: m) 随时间的变化

相差 $840 \text{ W}/\text{m}^2$; 6 月 12 日海面失去最大热通量为 $49 \text{ W}/\text{m}^2$, 而 6 月 10 日海面失去最大热通量为 $403 \text{ W}/\text{m}^2$ 。这与南海季风爆发 (1998 年季风在 5 月 20 日爆发) 情况有着紧密的关系。在 5 月 20 日西南风爆发之后, 在 6 月初到 6 月 9 日, 在南海南部观测点再次出现东北风, 西南风中断, 6 月 14 日 14 时后西南风再一次出现。由于西南季风的爆发, 海区上空大气中的对流增强, 云量的增多减小了到达海面的短波辐射, 旺盛的对流增强了潜热通量的输送。在热带海洋上, 对流活动的变化很不规则, 导致南海南部海

区太阳短波辐射通量和潜热通量在 6 月份的日变化振幅有较大变化。

综上所述, 南海南部观测点的混合层深度是南海北部观测点的 2 倍以上, 平均为 27.3 m; 混合层温度始终大于 28°C 。混合层深度和温度的变化也分 3 个时段: 第 1 个时段 (5 月 15 日以前) 在强东北和东南风作用下, 混合层温度较低 (29°C), 深度逐渐加深达到 40 m, 该时段对应南海南部观测点西南季风出现前; 第 2 个时段 (5 月 14 日以后到 6 月初) 混合层温度较高达到 29.5°C 以上, 有时甚至到 31°C , 混合层深度逐渐减少到 20 m 左右, 该时段对应弱夏季西南风在南海南部观测点出现期间; 第 3 个时段 (6 月初以后) 混合层深度逐渐加深到 40 m, 混合层温度从 31°C 下降到 30°C , 该时段对应夏季西南风在南海南部的中断和西南风的再次的出现。

因此, 在南海夏季风爆发前后的 5、6 月份, 由于强对流活动及较强的西南季风出现时间在南海北部和南部不同, 因此混合层的动力、热力特征在南海南部与北部有一定的差异。

4 结论

综上所述, 通过对南海南北部海表面气象要素与海表面 SST 及混合层深度的初步分析可得出如下结论。

(1) 春季, 南海北部观测点和南部观测点都存在着障碍层, 其平均值分别为 4.6 m 和 2.3 m。在南海北部观测点处, 5 月下旬和 6 月上旬障碍层的厚度较大, 超过 20 m, 最大达 28 m。这与南海北部西南季风爆发和云量增多对应。

(2) 春季, 南海的日平均感热比潜热小, 潜热比短波辐射的日平均要小, 南海的 SST 及混合层深度的日变化主要由短波辐射的日变化决定。比日变化周期更长的变化趋势主要由海面净热量收支及风应力随时间的变化趋势所共同决定, 但其中风占主要控制作用。风应力大, SST 降低, 混合层深度加深, 海面得热多, SST 升高, 混合层深度变浅; 反之亦然。

(3) 春季, 南海北部的海洋上混合层温度和深度的变化可分为 3 个时段: 第 1 个时段 (5 月 16 日以前) 混合层温度较高 (28°C 以上), 深度较浅在 10 m 左右, 该时段对应夏季风爆发前; 第 2 个时段 (5 月 16 日以后到 6 月 10 日) 混合层温度较底 (小于 28°C , 混合层深度逐渐增大到 20 m, 该时段对应夏季风爆发期间; 第 3 个时段 (6 月 10 日以后) 混合层深度逐渐减少到 10 m, 混合层温度又逐渐恢复到大于 28°C , 该时段对应夏季风维持时段。

(4) 春季, 南海南部观测点的混合层深度是南海北部观测点的 2 倍以上, 平均为 27.3 m; 混合层温度始终大于 28°C 。混合层深度和温度的变化也分 3 个时段: 第 1 个时段 (5 月 15 日以前) 在强东北和东南风作用下, 混合层温度较低 (29°C), 深度逐渐加深达到 40 m, 该时段对应南海南部观测点西南季风出现前; 第 2 个时段 (5 月 14 日以后到 6 月初) 混合层温度较高达到 29.5°C 以上, 有时甚至到 31°C , 混合层深度逐渐减少到 20 m 左右, 该时段对应弱夏季西南风在南海南部观测点出现期间; 第 3 个时段 (6 月初以后) 混合层深度逐渐加深到 40 m, 混合层温度从 31°C 下降到 30°C , 该时段对应夏季西南风在南海南部的中断和西南风的再次的出现。

因此,在南海夏季风爆发前后的 5、6 月,由于强对流活动及较强的西南季风出现时间在南海北部和南部不同,混合层的动力、热力特征在南海南部与北部有一定的差异。特别值得指出的是,在 5 月份的许多时间段内,南海南部观测点海面附近存在浅薄的高盐高密度层,在 60 m 以上的上层海洋内存在着许多高盐高密度核。这些层或核的存在,使这个时期的南海南部观测点上层海洋结构变得非常复杂。

参 考 文 献

- 1 Liu Qinyu, Sun Jilin, The mechanism of mixed layer intraseasonal variations in the "Warm Pool" area, *Proceedings of the International Scientific Conference on the Tropical Ocean Global Atmosphere TOGA Programme*, WCRP-91-WMO / TD, No.717, 761~765.
- 2 刘秦玉,王启,“暖池”表层对大气局地强迫的响应特征,海洋与湖泊,1995,26(6),658~664.
- 3 徐锡桢,南海中部的温、盐、密度分布及水团特征,南海海区综合研究调查报告,北京:海洋出版社,1989,119~127.
- 4 徐锡桢,邱章,龙小敏,1993,南海温跃层基本特征及一维预报模式,海洋与湖泊,24(5),494~502.
- 5 邱章等,1994 年 9 月南沙群岛调查海区的跃层特征,热带海洋,1996,15(2),61~66.
- 6 白学志,吴爱明,赵永平,南海季风爆发前后南海南部 SST 和海表热通量变化机制分析,南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用,1999,157~165.
- 7 孙即霖,刘秦玉,张秀芝,1998 年夏季风爆发前后南海海气热通量主要特征,南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用,1999,152~156.
- 8 徐天真,陈伯海,西太平洋暖池区海-气通量计算分析,青岛海洋大学学报(增刊),1993,23,99~107.
- 9 贾旭晶,刘秦玉,孙即霖,南海上混合层,温跃层上界两种定义的比较和障碍层,海洋与湖泊通报,(待发表)
- 10 Sprintall, Janet and Matthias Tomczak, Evidence of the barrier layer in the surface layer of the tropics, *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(C5), 7305~7316.
- 11 陈锦年,南海海域海面热量平衡特性及其对海温场的影响,海洋与湖泊通报,1986, No.1.
- 12 Yang Haijun, Liu Qinyu, Jia Xujing, On the upper oceanic heat budget in the South China Sea: Annual cycle, *Advances in Atmosphere Sciences*, 1999, 16(4), 619~629.

Dynamic Features and Formation Mechanism of the Upper Mixed Layer in the South China Sea Before and After 1998 Summer Monsoon Onset

Liu Qinyu, Jia Xujin and Sun Jilin

(Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

Zhang Xiuzhi

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract In this paper, using the observation data at two points (south point and north point) during South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX), the heat flux and wind stress are calculated by the method of J. Launianen and T. Vihma, and the relation between the dynamic and thermodynamic features of upper mixed layer and the summer monsoon onset. It is found that, before and after the 1998

summer monsoon onset, there are different variations features of temperature and depth of the mixed layer in north and south of the SCS. The variations in temperature and depth of the mixed layer could be divided into three sub-periods: Before the onset of the southwest monsoon, in the north observation point (20°N , 116°E), there is higher mixed layer temperature (28°C or more) and shallower mixed layer depth (about 10 m); during the onset of the southwest monsoon, the wind is strong, the sun radiation is weak, the temperature of the mixed layer is low (28°C or less), and the depth of the mixed layer increases to 20 m; after the onset of the southwest monsoon, the depth of the mixed layer decreases to 10 m, and the temperature reverses to the value of 28°C or more. Besides, the depth of the mixed layer in the south observation point ($6^{\circ}15'\text{N}$, 110°E) is twice as deep as in the north point of the SCS. Its average value is 27.3 m, the temperature of the mixed layer is 29°C or more all the time; before the onset of the southwest monsoon, the temperature of the mixed layer is low (29° or so), and the depth increases gradually by the forcing of stronger northeaster or northwester; during the onset period of the southwest monsoon, the temperature of the mixed layer increases to reach 31°C , and the depth of the mixed layer reduces to 10 m or less; after the onset of the southwest monsoon, the depth of the mixed layer increases to 40 m, the temperature reduces to 30°C . Above features are controlled dominantly by wind and sun radiation in sea surface, and the effects of latent heat and sense heat flux are very smaller than wind and sun radiation. In May, there are shallower layer with high salinity and high density and many nuclear with high salinity and high density in the south of SCS. During SCSMEX of 1998, there are shallower barrier layers in the south and north and the thickness barriers layer is thicker above 20 m in north of SCS at southwest monsoon onset.

Key words: summer monsoon onset; South China Sea; mixed layer