

南海北部陆坡区混合过程观测

杨丽芬, 田纪伟, 谢玲玲

(中国海洋大学 物理海洋实验室, 山东 青岛 266003)

摘要: 为了解南海北部陆坡区的内部混合过程, 2004年4月30日至5月1日, “延平2号”科考船在该海域利用自由沉降式的微结构剖面仪 TurboMAP II 进行了一次混合过程的直接观测。观测海区南海次表层水团和南海中层水团形成的特定温盐结构, 使得 150~500 m 之间出现盐指现象。通过对观测数据的处理和分析, 研究了观测海区的湍动能耗散率、热耗散率和热扩散系数的分布以及盐指现象对混合效率的影响。观测海区的湍动能耗散率为 $2.0 \times 10^{-10} \sim 7.8 \times 10^{-7} \text{ W/kg}$, 最大值出现在上混合层; 热耗散率为 $2.7 \times 10^{-9} \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^2/\text{s}$, 最大值出现在温跃层附近。层结稳定区混合效率的平均值为 0.18, 与常用值 0.2 非常接近, 盐指发生区混合效率的平均值为 0.76, 表明盐指现象的存在提高了混合效率。

关键词: 南海北部陆坡区; 盐指; 湍动能耗散率; 热耗散率; 混合效率

中图分类号: P717; P722.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)12-0010-07

南海是太平洋最大的边缘海之一, 通过吕宋海峡与西北太平洋发生物质及能量的交换。南海北部属于内波的高发区^[1], 尤其是春末夏初季节, 孤立波的活动比较活跃^[2,3], 频发的内波破碎必然导致该海区较强的内部混合, 尤其是在陆架陆坡区, 所以南海北部的陆坡区是一个研究陆坡区小尺度过程和海洋内部混合的典型区域之一。

西北太平洋的北太平洋次表层水和北太平洋中层水经由吕宋海峡可以进入到南海, 经过与南海内部水团的混合之后会形成南海次表层水团和南海中层水团^[4]。高温高盐的南海次表层水位于低温低盐的南海中层水之上, 为盐指现象的发生提供了必要条件。自盐指现象被发现以来^[5], 很多学者研究过盐指现象对海洋内部混合的影响^[6,7]。近 20 年, 在发生双扩散现象的海区进行的微结构的直接观测更客观、深入地说明了分子尺度 $O(1 \text{ cm})$ 的双扩散过程通过对不同水团的有效混合进而影响着更大尺度的海洋过程^[8-10]。Laurent^[11] 使用混合效率揭示了即使在盐指发生区湍混合也是存在的。Ryuichiro^[12] 在对小尺度过程直接观测的基础上, 给出了一个在双扩散发生区域来判定双扩散混合和湍混合的方法, 同时提出了一个根据双扩散混合和湍混合所占比例加权平均获得扩散系数的模型。周磊等^[13] 在东海陆架坡折区进行了湍混合的直接观测, 并给出了该海区基本的湍混合特征, 梁鑫峰等^[14] 基于同一

次观测结果, 分析了该海区温度的微结构特征。但是在南海, 还没有进行过类似的小尺度过程的直接观测。为了客观地认识南海北部陆坡区的混合情况, 于 2004 年 4 月 30 日至 5 月 1 日利用科考船“延平 2 号”在该海区进行了一次小尺度过程的直接观测, 主要的观测仪器为自由沉降式的微结构剖面仪 TurboMAP II。作者利用观测获得的流速剪切数据, 得到了湍动能耗散率和层结稳定区的湍扩散系数; 利用获得的温度数据, 估计了热耗散率和相应的热扩散系数。此外, 作者通过分析混合效率, 来研究盐指现象对内部混合的影响。

1 数据处理

2004 年 4 月 30 日 12:00 到 5 月 1 日 10:30, 科考船“延平二号”在南海北部陆坡处进行了一次混合过程的连续观测, 观测站点 ($21^\circ 58.13' \text{ N}$, $119^\circ 13.28' \text{ E}$) 位于吕宋海峡的西北方向, 水深 1800 m 左右, 观测区域和站位见图 1。这也是在南海进行的第一次小尺度过程直接观测, 期间共进行了 9 次剖面观测。

收稿日期: 2008-02-28; 修回日期: 2008-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40552002)

作者简介: 杨丽芬 (1983), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事海洋内部混合方面研究, E-mail: yanglf1983@ouc.edu.cn

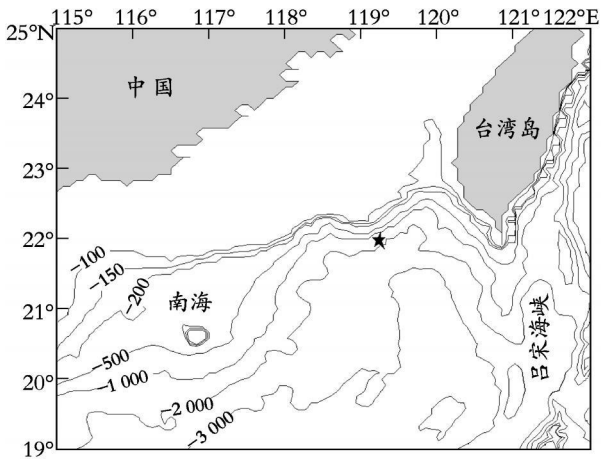


图 1 观测海区及站位

Fig. 1 The experiment region and the station location

五角星标记为站点所在位置

the pentagram represents the station at which the measurement was conducted

采用的主要观测仪器为自由沉降式的微结构剖面仪 TurboMap II, 通过它可以获得垂向高分辨率的温度、电导率、压力、流速剪切剖面, 同时还利用 SeaBird 25 进行了温度、盐度、深度的常规观测。TurboMap II 的最大观测水深是 500 m, 采样频率为 256 Hz, 温度和电导率的测量精度分别为 0.01 °C 和 $2 \times 10^{-4} \text{ m}/(\Omega \cdot \text{cm})$ 。脉动流速用一个标准的压电陶瓷剪切探头测量, 观测范围是 0.001 m/s^2 和 0.5 m/s^2 , 观测精确度为 5%。仪器的工作原理、数据校正以及信号处理见 Osborn 等^[15]、Lueck 等^[16] 和 Gregg^[17]。通过流速剪切由下式可以直接计算得到湍动能耗散率 ϵ ^[13]:

$$\epsilon = 7.5\nu \left[\frac{\partial u'}{\partial z} \right]^2 \quad (1)$$

其中 ν 为运动黏性系数, u' 为水平脉动流速, z 为垂向坐标。

在层结稳定区, 采用 Osborn^[18] 的模型来计算湍扩散系数:

$$k_0 = \Gamma \frac{\epsilon}{N^2} \quad (2)$$

这里, N^2 为浮力频率的平方, 利用 CTD 数据获得; Γ 为混合效率, 在充分发展的湍流情况下普遍采用 $\Gamma = 0.2$ 。但是, 由于这个模型只适用于湍混合, 在双扩散引起的混合中并不适用^[19]。其中 Γ 可以用观测得到的 ϵ 来进行计算获得^[20]:

$$\Gamma_{obs} = \frac{1}{2} \frac{x_0 N^2}{\epsilon_{obs} \bar{\theta}'_z} \quad (3)$$

湍混合过程中剪切输入的能量一部分增加了势能, 其他的基本都被耗散掉, 混合效率 Γ 表征的即为这两部分能量之比, 即浮力通量和耗散能量之比, 但是 Γ 更一般的是与热耗散与浮力耗散之比有关。 ϵ_{obs} 表示观测得到的湍动能耗散率, 在盐指发生区, 动能的耗散是湍混合和盐指混合共同作用的结果, 故 ϵ_{obs} 代表了两种混合各自引起的耗散率之和。但是, 盐指发生区的 Γ_{obs} 并不代表湍混合和盐指混合各自引起的混合效率之和, 而是表示整个混合过程中浮力通量和耗散能量之比。

利用快速温度探头 (FP07) 观测的温度, 可以得到高频的温度脉动, 结合仪器的下放速度就可以获得温度的垂向剪切, 从而计算热耗散率 x_0 ^[14]:

$$x_0 = 6k_0 \overline{(\theta'_z)^2} \quad (4)$$

k_0 为分子热扩散系数, θ'_z 是脉动温度的垂向梯度。然后结合平滑温度梯度, 采用 Osborn 和 Cox^[21] 模型计算热扩散系数:

$$k_0 = \frac{x_0}{2\bar{\theta}'_z} \quad (5)$$

其中, $\bar{\theta}'_z$ 是平滑温度的垂向梯度。作者利用 CTD 获得的温度数据来计算。这个模型不仅适用于单纯由湍流引起的混合, 还适用于单纯由盐指引起或者两者共同作用引起的垂向混合^[22]。

2 结果与讨论

图 2a, b 为 CTD 观测得到的温度、盐度的垂向结构。其中, 盐度先是随深度增大, 130 m 到 150 m 之间增大到极大值 34.85, 然后开始减小, 大约 600 m 处又开始随深度增大。从时间上来看, 等温线和等盐度线在 05:57 时刻有明显下凹。在图 2d 的 T-S 曲线中, 3 条与其他不同的 T-S 曲线对应的即为 05:57 之后的 3 次观测结果, 与前面的 6 条曲线相比, 高盐区的盐度最大值有所降低, 而且相同盐度对应的温度也有所降低。春末夏初是观测海区孤立波的高发期, 所以 05:57 时刻的等温线和等盐度线的明显变化可能是受到了孤立波的影响, 但是仅凭等温线和等盐度线的突然起伏来断定是否发生了孤立波又是不充分的。

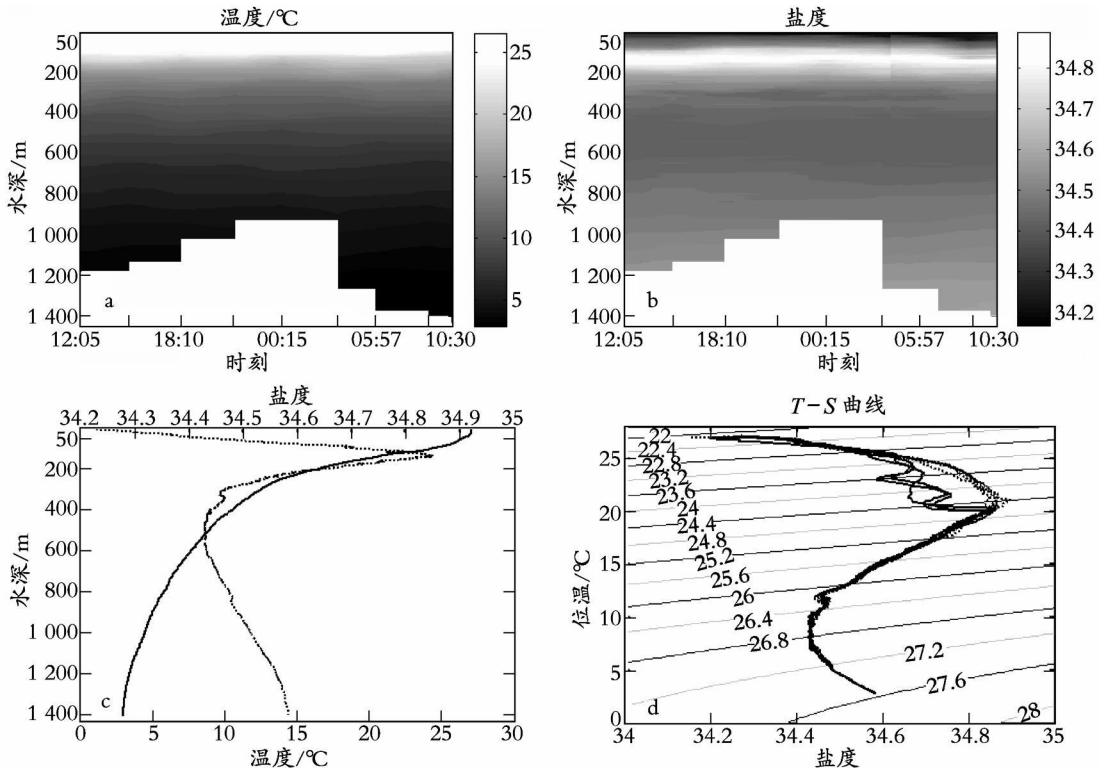


图2 观测得到的温盐、水团分布

Fig. 2 The distributions of temperature, salinity and water masses

a和b. CTD的9次观测得到的温度、盐度的垂向结构;c. 平均之后的温度、盐度的垂向结构, 点线代表盐度, 实线代表温度;d. 9次观测得到的T-S曲线, 三条实线代表与其他曲线差别较大的曲线

a and b. The vertical distributions of temperature and salinity observed at 9 different times; c. The vertical structures of temperature and salinity after time averaging, the dot line represents salinity and the solid one is temperature; d. The 9 T-S curves obtained from the observation, three solid lines are different from others

从本次观测得到的 T-S 曲线上中可以看到, 观测海区明显存在一个高盐水团和一个低盐水团。李凤歧等^[4]指出的南海存在的水团中, 南海次表层水团也称为南海北太平洋副热带次表层水, 即由北太平洋次表层水进入南海后变性而形成的, 温度为 14~ 19°C, 其典型特征为高盐, 盐度最大值层在 150 m ± 50 m; 核心层在吕宋海峡入口处的盐度值接近 35.0, 随着向西、向南距离的增加, 逐渐降低到 34.5 左右。南海中层水团的厚度约 400 m, 水温大致为 5~ 11°C, 最典型的特征是低盐; 其低盐核心层在 500 m 上下伸展, 相应水温约 8~ 9°C, 最低盐度值在靠近吕宋海峡处可低于 34.40, 这表明其低盐特征源于北太平洋中层水, 故又称为南海北太平洋中层水团。根据这两个水团的典型特征, 结合本次观测得到的 T-S 曲线和温盐的垂向分布, 作者认为这里明显存在的高温高盐水团为南海次表层水团, 低温低盐水团为南海中层水团。这样, 在一定的深度范围内, 高温、高盐的南海次表层水团位于相对低温、低盐的南海中层水团之上, 给盐指现象的发生提供了必要条件。

表征双扩散强度大小的物理量, 最先是由 Turner^[23] 提出的, 他指出可以由密度率 R_ρ 来决定, $R_\rho = \frac{\alpha \theta_z}{\beta S_z}$, 其中 $\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \theta}$ 是热膨胀系数, $\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial S}$ 是盐收缩系数, θ_z 和 S_z 为温度和盐度的垂向梯度。此外, Ruddick^[24] 在 1983 年引入的 Turner 角 (Tu), 同样可以表示双扩散的强度大小,

$$Tu = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \theta_z - \beta S_z}{\alpha \theta_z + \beta S_z} \right) \quad (6)$$

而且 $R_\rho = -\tan(Tu + 45^\circ)$ 。You^[25] 对 Tu 的物理意义做了更进一步的阐述, 当 Tu 在 -45° 和 -90° 之间时, 有利于双扩散对流现象的发生; 当 Tu 在 -45° 和 45° 之间时, 水体的层结是稳定的; 当 Tu 在 45° 和 90° 之间时, 有利于盐指双扩散的发生。而且, 盐指的强度又可以以 $Tu = 75^\circ$, $Tu = 60^\circ$ 为界限进一步被划分为强、中、弱三个档次。

图 3 为依据本次观测计算得到的 Tu 的分布。从时间平均之后的 Tu 的垂向分布 (图 3b) 可以看出, 大约从 140 m 开始 Tu 大于 45° , 但是 Tu 的最大值没有超过 60° , 可见这里发生的盐指现象是比较弱

的; 其中在 330~ 350 m 之间, T_u 几乎等于 45° , 说明这个深度范围内的水体处于层结稳定与发生盐指的

临界状态。从时间上来看, 05:57 时刻的 T_u 对应于温度、盐度的变化同样也有明显的下凹。

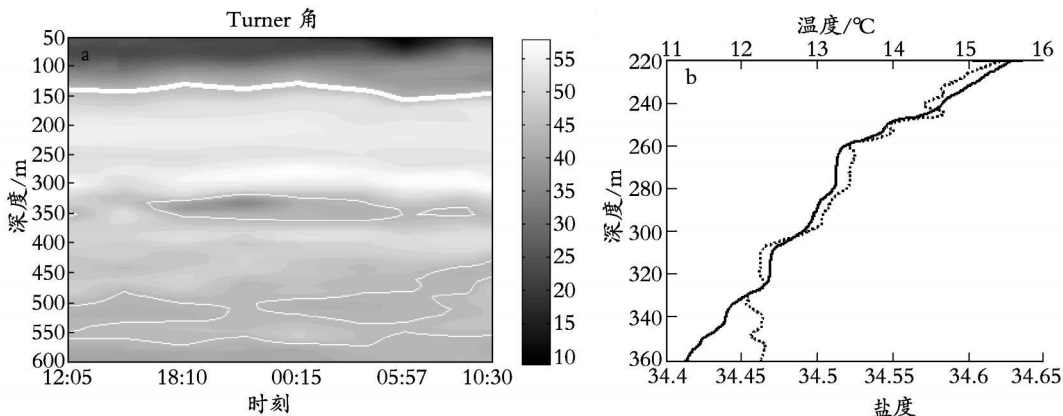


图 3 盐指现象与温盐阶梯结构

Fig. 3 The salt finger phenomena and staircase structures of temperature and salinity

a. 根据 CTD 资料计算得到的 50~ 600 m 之间的 T_u 随深度和时间的分布, 白线表示 45° 的分界线; 由于 50 m 以浅及 600 m 以深都是层结稳定区, 故只给出了 50~ 600 m 之间的 T_u 分布; b. 盐指发生区温度、盐度的阶梯状结构, 实线代表温度分布, 点线代表盐度分布

a. The Turner angles calculated from CTD data, the white line indicates 45° ; because it's doubly stable in upper 50 m and deeper than 600 m, we demonstrate the distribution between 50 m and 600 m; b. The staircases in finger favorable region; the solid line represents the temperature and the dot line the salinity distribution

盐指发生的区域, 向上的密度通量通常会产很多温度、盐度的阶梯结构^[26], 这种阶梯结构也常被认为是发生盐指现象的一种标识, 不过盐指区也有不出现这种阶梯结构的情况^[11]。在本海区观测到的盐指发生区的温度、盐度垂向分布中, 出现了较为明显的温、盐阶梯结构(图 3c)。

观测到的值都要大。另外, 05:57 时刻观测得到的 ϵ 在 40~ 50 m 之间较其他时刻观测到的值明显偏大, 这个深度正好对应了该时刻观测得到的等温线和等盐度线的显著变化, 可能是由于孤立波破碎导致的结果。由于该时刻平滑温度梯度的明显变化, 在 κ_θ 的时间序列中也有所体现, 但是 x_θ 没有明显变化, 因为 x_θ 是由温度的脉动量来决定。另外, ϵ 和 x_θ 在 150~ 220 m 之间的值都明显比较大, 还有一些较大值分布比较零散, 可能是内波破碎或者其他小尺度过程造成的。

图 4 显示的是根据 9 次观测得到的 ϵ , x_θ 和 κ_θ , 整个观测时段内, 除了 50 m 以浅的 ϵ , 三者没有明显的周期性变化。由于观测海区的潮汐是全日潮占主, 可能是受到潮汐作用的影响, 50 m 以浅的 ϵ 在 4 月 30 日 18:10 到 5 月 1 日的 05:57 之间比其他时刻

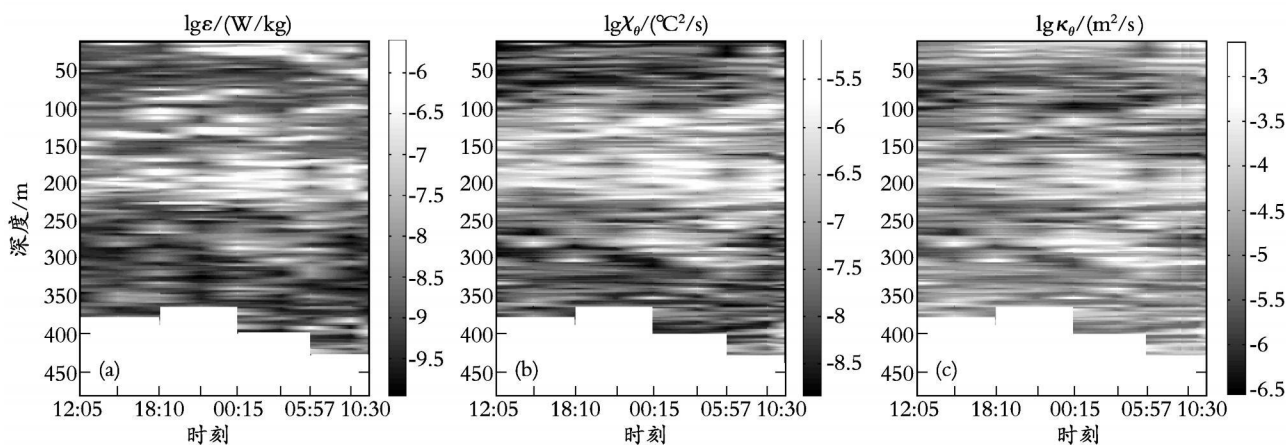


图 4 ϵ , x_θ 和 κ_θ 的分布

Fig. 4 The distributions of the dissipation rate of turbulent kinetic energy (TKE) (ϵ), the dissipation rates of thermal variance (x_θ) and the diffusivity of heat (κ_θ)

从时间平均后的垂向分布(图 5)来看,观测站位的湍动能耗散率为 $2.0 \times 10^{-10} \sim 7.8 \times 10^{-7} \text{ W/kg}$, 其中最大值出现在最上层。170~ 220 m 深度范围内的 ε 值

也明显较大,这个深度基本位于温跃层之下, ε 值分布在 $2.0 \times 10^{-7} \text{ W/kg}$ 附近; 230 m 以下, ε 值减小了 1~ 2 个量级, 最小值出现在 450 m 以深。

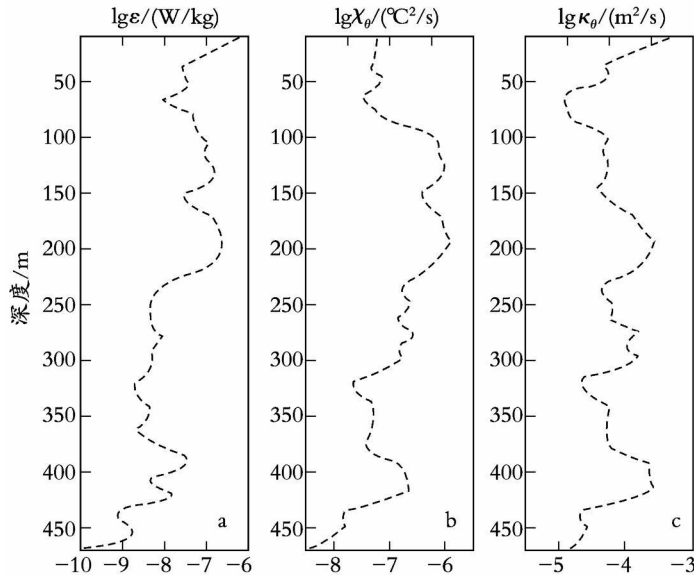


图 5 时间平均之后得到的 ε , x_θ 和 κ_θ 的垂向分布

Fig. 5 The vertical distributions of ε , x_θ and κ_θ after time averaging

热耗散率 x_θ 的分布,跟 ε 并不相同,首先 x_θ 的最大值并不是出现在表层,而是在温跃层附近, 90 m 以浅的 x_θ 值均小于 $1 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^2/\text{s}$, 也就是说 x_θ 的分布呈现“低-高-低”的垂向分布。

κ_θ 不仅与 x_θ 有关,还与平滑温度的梯度 $\bar{\theta}_z$ 有关。在温跃层中, x_θ 的值最大, $\bar{\theta}_z$ 也最大,致使这里的 κ_θ 并不是最大的;但是在上混合层,虽然 x_θ 比较小,但是这里的 $\bar{\theta}_z$ 比温跃层中要小很多,反而使得 κ_θ 最大(图 5)。

在盐指发生区的温度阶梯结构的“界面”处,温度和速度的脉动都会比在被其间隔开的“混合层”中大, ε 和 x_θ 就会相应地出现一些峰值。Schmitt 等^[26]于 2001 年在热带大西洋西部进行的微、细结构的直接观测结果显示在盐指发生区的“界面”处的 x_θ 相应会出现峰值。图 6 给出了其中一次观测得到的 ε 和 x_θ 在盐指区的分布,可以看出在温度阶梯“界面”处两者基本都出现了较大的峰值。

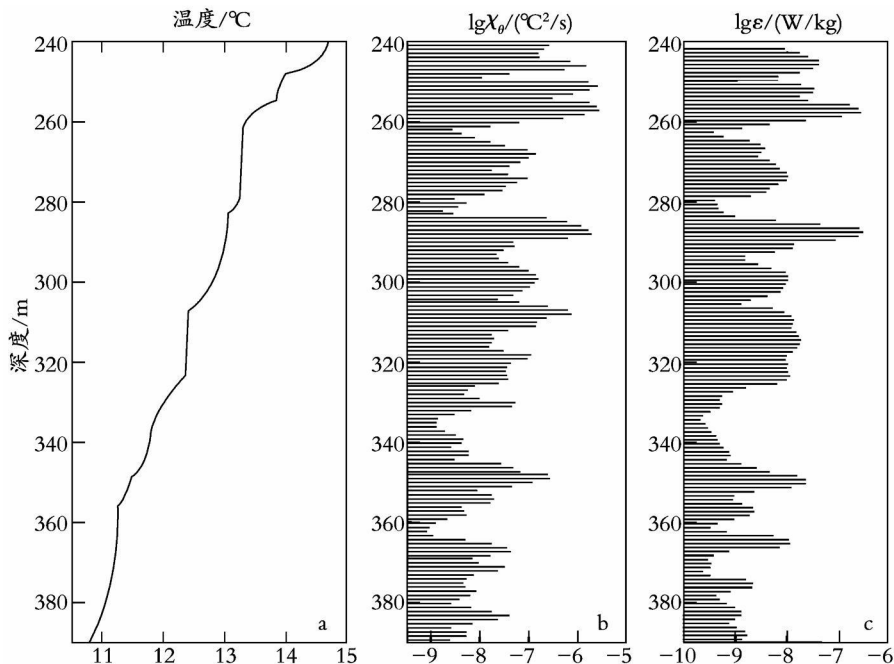


图 6 盐指发生区中 ε 和 x_θ 的垂向分布

Fig. 6 The vertical distributions of ε and x_θ in the finger-favorable region

风是上层海洋动能的主要能量来源,而大部分又在上层耗散掉,所以上层海洋的湍动能耗散率必然会比较大。表 1 给出了不同深度范围内的 ε , x_0 , K_0 和 K_p 平均值。其中, ε 在上混合层的平均值最大,为 $3.5 \times 10^{-7} \text{ W/kg}$, 是温跃层中 ε 平均值的 3 倍,比温跃层之下的更深层中的 ε 平均值高出 1 个量级。

从表 1 中的 x_0 得知,上混合层的 x_0 平均值比温跃层中的值($9.7 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^2/\text{s}$)小 1 个量级,而且也仅是温跃层之下更深层中平均值的一半。原因是上混合层中,较强的混合使得水体性质比较均一,温度的脉动相应比较小;而在温跃层,温度的脉动很强,所以上混合层中的 x_0 要小于温跃层中的值;同时在这个区域,温跃层之下又是盐指发生区,盐指的发生又相应地增强了热耗散,使得温跃层之下的 x_0 比混合层中的值也大了接近 1 倍。

表 1 不同深度层中 ε , x_0 , K_0 和 K_p 的平均值

Tab. 1 The average values of ε , x_0 , K_0 and K_p in different layers

各深度层	$\varepsilon(\text{W/kg})$	$x_0(^\circ\text{C}^2/\text{s})$	$K_0(\text{m}^2/\text{s})$	$K_p(\text{m}^2/\text{s})$
上混合层	3.5×10^{-7}	8.3×10^{-8}	6.8×10^{-4}	7.4×10^{-4}
温跃层	1.3×10^{-7}	9.7×10^{-7}	1.2×10^{-4}	
温跃层以下	1.5×10^{-8}	1.5×10^{-7}	1.1×10^{-4}	

热扩散系数 K_0 的值也是在上混合层中最大(表 1), 平均值为 $6.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 大约是温跃层中平均值的 6 倍, 同样由于盐指现象的影响, 使得温跃层之下更深层的 K_0 也比较大, 与温跃层中的值基本相等。

此外, 由于温跃层的一部分已经属于盐指发生区, 故表 1 中只给出了上混合层的 K_p 的平均值。比较可知, 上混合层中的 K_0 与 K_p 差别很小。上混合层中不存在盐指现象, 所以这也验证了在湍混合区域, 由于湍混合的各向同性, 热扩散系数与湍扩散系数相等。

关于混合效率 Γ 的研究, 1985 年 Oakey^[20] 基于观测资料的分析结果, 指出上层海洋非双扩散区域的 Γ 值大约为 0.265; Rohr^[27] 在 1984 年的实验室试验结果表明, 湍混合情况下, Γ 的大小与 R_i 有关, 但是最大值不超过 0.25。不过, 双扩散发生区域的 Γ 与湍混合中的 Γ 是有差别的, Ryuichiro^[12] 估计得到双扩散区域的 Γ 值在 0.46 到 1.2 之间, 明显大于湍混合情况下的 0.08 或者 0.13。

作者利用实测数据计算得到了观测站位不同深度层内的 Γ 值, 其中层结稳定区 Γ 的平均值为 0.18, 与在湍混合情况下常用的 $\Gamma = 0.2$ 非常接近; 盐指发生区 Γ 的平均值为 0.76, 同时也说明了由于盐指现象的发生对混合效率的影响。

南海特定水团结构下盐指现象的发生, 使得观测海区的内部混合过程更加复杂, 如果要更为详细地了解本海区发生的小尺度过程及其对海洋混合的贡献, 需要开展更多更加细致的现场观测以及相应的理论和数模分析以便更好地理解南海北部陆坡区的混合过程。

参考文献:

[1] Zhao Zhongxiang, Klemas V, Zheng Quanan, *et al.* Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. **Geophys Res Lett**, 2004, 31, L06302, doi: 10.1029/2003GL019077.

[2] 方文东, 施平, 龙小敏, 等. 南海北部孤立内波的现场观测[J]. 科学通报, 2005, 50(13): 1400-1404.

[3] Ming Huei C, Rerr Chieh L, Tewen Yung T, *et al.* Energy flux of nonlinear internal waves in northern South China Sea[J]. **Geophys Res Lett**, 2006, 33, L03607, doi: 10.1029/2005GL025196.

[4] 李凤歧, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999. 374-379.

[5] Stern M E, Turner J S. Salt fingers and convecting layers[J]. **Deep Sea Res**, 1969, 16: 497-511.

[6] Lambert R B, Sturges W. A thermohaline staircase and vertical mixing in the thermocline[J]. **Deep Sea Res**, 1977, 24: 211-222.

[7] Schmitt R W. Form of the temperature-salinity relationship in the central water: evidence for double diffusive mixing[J]. **J Phys Oceanogr**, 1981, 11: 1015-1026.

[8] Kelley D E, Fernando H J S, Gargett A E, *et al.* The diffusive regime of double diffusive convection[J]. **Prog Oceanogr**, 2003, 56: 461-481.

[9] Kunze E. A review of oceanic salt fingering theory[J]. **Prog Oceanogr**, 2003, 56: 399-417.

[10] Schmitt R W. Observational and laboratory insights into salt finger convection[J]. **Prog Oceanogr**, 2003, 56(3-4): 419-433.

[11] Laurent L S, Schmitt R W. The contribution of salt fingers to vertical mixing in the north Atlantic tracer release experiment[J]. **J Phys Oceanogr**, 1999, 29(7): 1404-1424.

[12] Ryuichiro I, Yamazaki H, Fabian W, *et al.* An estimation of buoyancy flux for a mixture of turbulence and double diffusion[J]. **J Phys Oceanogr**, 2007, 37(3): 611-624.

[13] 周磊, 田纪伟, 张效谦. 东海陆架坡折处小尺度过程观测[J]. 科学通报, 2005, 50(16): 1784-1788.

[14] 梁鑫峰, 田纪伟, 张效谦. 东海陆架坡折处温度微结构观测[J]. 自然科学进展, 2006, 16: 1268-1274.

[15] Osborn T R, Crawford W R. An airfoil probe for

- measuring turbulent velocity fluctuations in water [A]. Dobson F, Hasse L, Davis R. Air – Sea Interaction: Instruments and Methods [C]. New York: Plenum Press, 1980. 369-386.
- [16] Lueck R G, Huang D, Newman D, *et al.* Turbulence measurements with an autonomous moored instrument [J]. **J Atmos Oceanic Technol**, 1997, 14: 143-161.
- [17] Gregg M C. Uncertainties and limitations in measuring ϵ and χ_T [J]. **J Atmos Oceanic Technol**, 1999, 16: 1483-1490.
- [18] Osborn T R. Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements [J]. **J Phys Oceanogr**, 1980, 20: 83-89.
- [19] McDougall T J, Ruddick B R. The use of ocean microstructure to quantify both turbulent mixing and salt fingering [J]. **Deep Sea Res**, 1992, 39: 1931-1952.
- [20] Oakey N S. Statistics of mixing parameters in the upper ocean during JASIN Phase 2 [J]. **J Phys Oceanogr**, 1985, 15(12): 1662-1675.
- [21] Osborn T R, Cox C S. Oceanic fine structure [J]. **Geophysical Fluid Dynamics**, 1972, 3: 321-345.
- [22] Hamilton J M, Oakey N S, Kelley D E. Salt finger signatures in microstructure measurements [J]. **J Geophys Res**, 1993, 98: 2453-2460.
- [23] Turner J S. Buoyancy effects in fluids [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.
- [24] Ruddick B R. A practical indicator of the stability of the water column to double diffusive activity [J]. **Deep Sea Res**, 1983, 30: 1105-1107.
- [25] You Y. A global ocean climatological atlas of the Turner angle: implications for double diffusion and water mass structure [J]. **Deep Sea Res**, 2002, 49: 2075-2093.
- [26] Schmitt R W, Ledwell J T, Montgomery E T, *et al.* Enhanced diapycnal mixing by salt fingers in the thermocline of the tropical Atlantic [J]. **Science**, 2005, 308: 685-688.
- [27] Rohr J J, Itsweire E C, van Atta C W. Mixing efficiency in stably stratified decaying turbulence [J]. **Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics**, 1984, 29(1): 221-236.

Observation of mixing processes over the continental slope of the northern South China Sea

YANG Li-fen, TIAN Ji-wei, XIE Ling-ling

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

Received: Feb., 28, 2008

Key words: Northern South China Sea; salt finger; the dissipation rate of turbulent kinetic energy (TKE); the dissipation rate of thermal variance; mixing efficiency

Abstract: An observation was conducted on board R/V Yan Ping 2 from April 30 to May 1, 2004. The small-scale process over the continental slope of the northern South China Sea (SCS) was studied from the direct microstructure observation using a free-falling instrument TurboMAP-II (Turbulence Ocean Microstructures Acquisition Profiler). Due to the presentation of the South China Sea subsurface water and the South China Sea intermediate water, the salt fingering is expected to occur between 150 m and 500 m. The results reveal that the dissipation rate of turbulent kinetic energy (TKE) in this region ranges from $2.0 \times 10^{-10} \sim 7.8 \times 10^{-7}$ W/kg, with the maximum existing in the surface mixing layer; the dissipation rate of thermal variance ranges from $2.7 \times 10^{-9} \sim 1.5 \times 10^{-6}$ °C²/s, with the maximum located around the thermocline. Besides, the mean value of the mixing efficiency is 0.18 in the doubly stable layers, very close to the value of 0.2 used in earlier literature. But in the finger-favorable layers, it's about 0.76 much larger than that in the doubly stable layers, showing that the salt fingering makes a significant contribution to the mixing efficiency increasing.

(本文编辑: 刘珊珊)