

南海西南海域的内波和细结构*

方欣华 鲍献文 张玉琳

(青岛海洋大学物理海洋研究所 266003)

劳治声

(华东师范大学河口海岸研究所,上海 200062)

提要 根据1990年初夏南海西南部水域的两个连续站CTD和多层海流计资料及50多个大面站CTD资料的分析研究得到一些关于此海域的内波和细结构的特性。它包括等温、盐、密度面起伏的特性,盐度双跃层和逆盐层等长存性细结构、温度Cox数的概率密度函数及流速频谱的特性,Cox数和温度脉动垂向波数谱的一般品性及其随水层和地域的变化规律等诸方面。

关键词 内波 细结构 微结构 南海

关于南海西南海域内波和细结构的研究报告,至今尚未见到。本文依据1990年初夏的一次系统调查所得的两个纬度相近、经度间隔约 3° 的连续站CTD仪和多层海流计记录以及覆盖海域极广的50多个大面站CTD资料,作了内波和细结构特性的分析。

先对CTD资料进行去异常值、噪声、逆压等预处理,再作滞后订正,最后处理成深度间隔为0.1m的等间隔资料。所用处理方法已由方欣华等(1992)作了专门论述。

根据等温面、等盐面和等密面起伏的相互关系以及流速频率谱品性,分析了内波特性和揭示了盐度双跃层和逆盐层现象等长存性细结构,计算了温度Cox数的对数概率密度函数,总结出Cox数和温度脉动垂向波数谱的一般品性及其随水层和地域的变化规律。分析结果与讨论如下。

1 长存性细结构

对季节性跃层中的温、盐、密度细结构作了初步分析。分析中绘制了连续站C1, C2的温盐、密度随深度变化的剖面序列图和等温线、等盐线、等密线随深度和时间变化曲线(本文略),从剖面序列图中看出,温、盐、密度都有显著的随深度细小尺度变化。最显著的特性是在观测过程中整个观测海区的季节性跃层中几乎始终存在逆盐层或盐度双跃层。C2站既存在明显的盐度双跃层,还在下跃层底部(30—40m)存在逆盐层。C1站虽没有明显的盐度双跃层,但在35—60m之间也有逆盐层。从C1, C2站的等温线、等盐线、等密线随深度和时间变化可看出,等温线和等密线的排列是很有序的,只有等盐线在前述

* 国家自然科学基金资助,4880228号,国家重点专项85-927-05-03部分成果。甘子钧研究员、仇德忠副研究员、王景明教授等给予了热情支持,李炜和贾爽同志参加了部分研究工作,谨表谢忱。

收稿日期:1992年11月10日,接受日期:1993年5月27日。

逆盐层所在深度区间中呈现出闭合圈。这表明,此逆盐层并非由流动不稳定引起海水翻卷从其上下层进入这一层的,而是较长期存在的物理性质稳定的水层。这一推断也得到大面站 CTD 资料的支持。在 C1 站第 20 小时前(自开始观测时间始算,下同),深度在 40—60m 处的区域为盐度低于 33.98 的低盐水所占据,其最低盐度低于 33.90。在第 19 小时前,35—40m 的区域被盐度低于 33.76 的低盐水占据,最低值达 33.71。这些低盐水只可能是被平流携带流经观测站的。

2 垂向波数谱特性

关于浅海细结构谱特性分析的文献甚少。方欣华等(1988)和 Fang Xinhua 等(1990)对我国东海黑潮主干区及陆架区细结构作了研究,得出了与大洋特性(Roden, 1971; Siedler, 1974; Hayce et al., 1975; Gregg, 1977a; Levin, 1981)相近的结果,即在 $\beta_0 \approx 0.1 \text{ m}^{-1}$ 附近有一折点。只是在 $\beta > \beta_0$ 段谱曲线更陡一些,即 $\tau = 3-4$, 在浅层 $\tau \approx 4$, 在中、下层为 $\tau = 4-3.5$ 。

本文采用 CTD 资料作了垂向波数谱分析,得出了一些与地域及水层有关的谱特性。在各站资料中从上混合层底部开始往下取 51.2m (即 512 点)作为上层;由 450—654.8m (2048 点)代表中层;由 900—1 104.8m (2048 点)代表深层。对各站的上述资料段分别求温度脉动垂向波数谱。所得结果也呈现出上述共性,即谱曲线存在一折点(仍记对应波数为 β_0),在 $\beta > \beta_0$ 段,谱密度与 $\beta^{-\tau}$ 成正比(上层谱曲线,由于资料过短,显示不出此折点)。但是 $\beta_0 \approx 0.15 \text{ m}^{-1}$, τ 值也不同于大洋细结构而与东海细结构相似。进一步分析所有谱曲线,还发现它们可按地域和水层分组(图 1)。将它们按地域分开分别作总体平均后的相应结果见图 2。可以看出,上层谱曲线(图 2a)西南部 $\tau \approx 3.6$, 而东北部 $\tau \approx 3.3$;中、下层(图 2b, c)为西南部 $\tau \approx 4.0$, 东北部 $\tau \approx 3.5$ 。西南部的谱线明显地比东北部的陡。

图 1 还显示出另一重要特点:谱曲线随着波数的增大而分散开来,并且在 $\beta \approx 1 \text{ m}^{-1}$ 附近开始上扬。这与 Gregg (1977b) 的大洋结果相一致。从尺度上看,此波数段已属于微结构范畴。

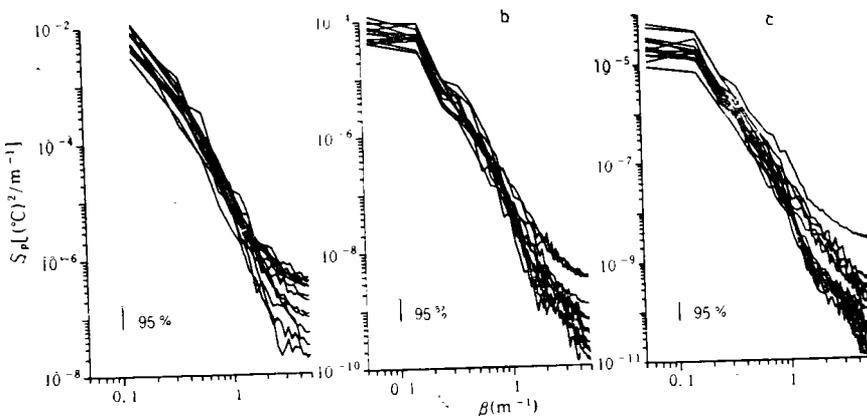


图 1 温度脉动垂向波数谱

Fig. 1 Vertical wavenumber spectra of temperature fluctuations in the south western area of the South China Sea

a. 上层; b. 中层; c. 深层。

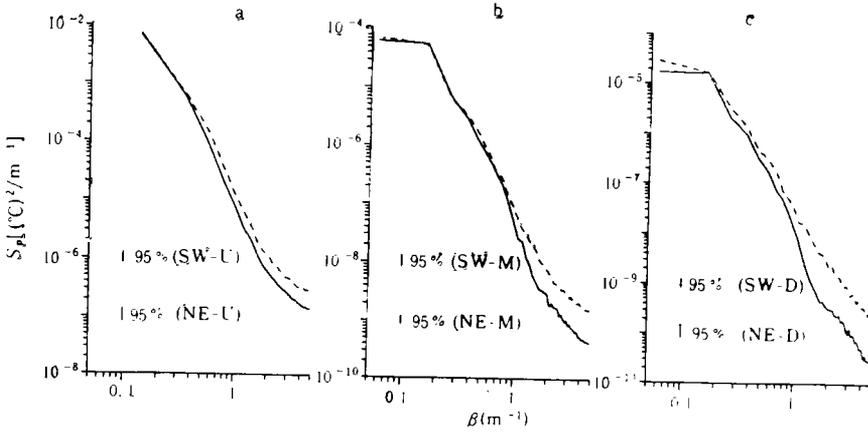


图 2 总体平均温度脉动垂向波数谱

Fig. 2 Ensemble-average vertical wavenumber spectra of temperature fluctuations in the south western area of the South China Sea

a. 上层 (U); b. 中层 (M); c. 深层 (D)。——西南部水域 (SW); ----东北部水域 (NE)。

3 Cox 数分析

Cox 数是细结构分析的常用手段,它的定义为

$$C_{\phi} = \frac{\left\langle \frac{\partial}{\partial z} (\phi - \langle \phi \rangle) \right\rangle^2}{\left(\frac{\partial \langle \phi \rangle}{\partial z} \right)^2} \tag{1}$$

式中, ϕ 为计算 Cox 数的物理量,如温度 $T(z)$ 、盐度 $S(z)$ 或密度(距平) $\sigma(z)$ 等,尖括号 $\langle \rangle$ 表示总体平均。一般地采用深度平均代替总体平均[如 Georgi 等(1983), Dillon (1982)]。在 C_{ϕ} 的实际计算中存在很强的人为任意性,它包含在求梯度时差分深度间隔的选取和作深度平均时平均深度段长度的选取上。李炜等(1992)¹⁾ 得出平均深度段由 1m 逐渐增至 10m 时, C_T 值随平均深度段的增大而增大,其概率密度峰对应的 C_T 由 0.06 增至 0.50。本文希望获得尽可能小的尺度的变化规律,求梯度的差分深度间隔取为 0.1m (预处理后等深度资料的深度间隔)。平均深度区间采用双重尺度。再作平均值与脉动值分离,即式(1)分母中的平均运算,采用 10m 深度段(101 样本)。这表明所讨论的细结构局限于波长为 0.2—20m (对应垂向波数为 5—0.05 m^{-1})。这种选取虽未覆盖整个细结构尺度 (1—100m),但对上层海洋是适切的,它将季节性跃层尺度的变化保留在平均剖面中。另一尺度即为在作脉动梯度均方运算时,即式(1)分子中之平均,平均区间取为 2m(21 个样本)。这样既保证“总体平均”之总体足够地大(21)样本,又分辨出尽可能小的尺度,使 C_T 更切合定义的物理意义。

本文利用近 25 万个 C_T 的样本进行了统计分析,得出一些规律性的结果。

对各测站的 C_T 值作了比较,发现水深较浅(不足 100m)的西南部水域具有较大的

1) 李炜等,1992,南海西南海域内波及细结构分析,青岛海洋大学物理海洋专业学士学位论文。

C_T 值,每站全深度平均值几乎都大于 2;在较深的东北部水域 C_T 较小,几乎所有站的平均值都小于 2;其中在深度突变的中南部则小于 1。这些值大多比 Georgi 等(1983)所引的大洋值稍高(他们所引值大多小于等于 0.5)。

用全部约 25 万个 C_T 值作为一个总体,计算了概率密度函数 (PDF),从图 3 和表 1 可看出, $\lg C_T$ 的概率密度曲线和标准正态曲线之间的明显的差别在于前者分布更集中而且偏于低值。

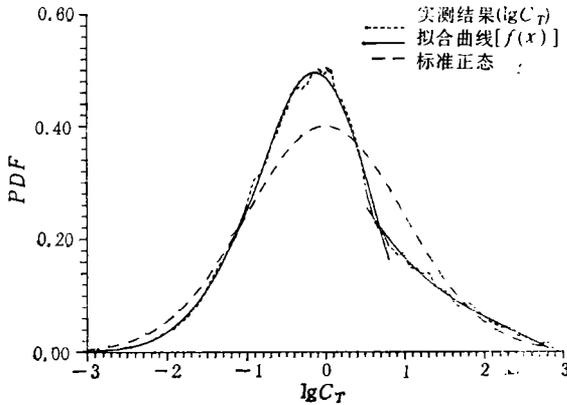


图 3 $\lg C_T$ 的概率密度曲线及其拟合曲线与标准正态曲线的比较

Fig.3 Comparison of probability density curve of $\lg C_T$ and its fitting curve with standard normal curve

表 1 $\lg C_T$ 概率密度与标准正态曲线之比较

Tab.1 Comparison of probability density curve with standard normal curve

	均 值	方 差	峰 态	偏 度
标准正态 A	0	1	3	0
C_T 概率密度 B	-0.02	0.89	3.24	0.34
B-A	-0.02	-0.01	0.24	0.34

$\lg C_T$ 概率密度曲线也可用如下多项式分段拟合,

$$f(x) = \begin{cases} a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 & \text{当 } x < -1.05 \\ b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 & \text{当 } -1.05 \leq x < 0.7 \\ c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 & \text{当 } x \geq 0.7 \end{cases}$$

式中

$$x = \lg C_T$$

$a_0 = 0.873\ 087$	$b_0 = 0.484\ 937$	$c_0 = 0.392\ 44$
$a_1 = 0.872\ 451$	$b_1 = -0.139\ 587$	$c_1 = -0.316\ 67$
$a_2 = 0.292\ 969$	$b_2 = -0.483\ 971$	$c_2 = 0.105\ 26$
$a_3 = 0.032\ 966$	$b_3 = 0.056\ 733\ 7$	$c_3 = -0.014\ 748$

从图 3 看出,此拟合曲线拟合效果令人满意。

4 流速分析

本文采用 Fang Xinhua 等(1989)提出的流速分解方法作流速分解。结果表明 C1 站的流速较有规律,各层斜压流速矢基本呈顺时针方向旋转(负旋流),而 C2 站并非简单的负旋流。用最大熵方法作了各分量的流速频谱分析。为了清楚地突出谱峰,找出精确的谱峰频率(周期),计算到较高阶自回归模型。于是谱密度曲线的自由度很低,置信区间相当宽(尤其是 C2 站),然而给出的谱峰周期却是相当精确的。在使用谱峰值作相对大小的比较来考察峰频情况时,其结果仍不失正确性。分析发现一些高值谱峰之频率极稳定,而且自回归模型的阶数越高,谱峰越尖,峰值越高。这表明,这些频率的波动是非随机的。具有代表性的结果在图 4 给出。各站各层海流分量都有类似情况(本文未给出这些谱曲线)。谱峰所对应的周期一部分与全日潮周期一致,例如 C1 站正压流、20m 层斜压流及 C2 站正压流之 Y 分量;另一部分则不对应于任何重要的分潮,如 C2 站正压流、20m 层斜压流 X 分量、41m 层斜压流 X 及 Y 分量等。后者的成因很难用这些有限资料分析清楚。

为了揭示频率特性,将两测站的正压流谱作为一个总体,每站的斜压谱各作为一个总体做总体平均,得到了具有很高自由度的频谱,如图 5 所示。图 5 中还给出了 f^{-2} 斜线。可以看出若不考虑谱峰,斜压谱曲线近似地符合 f^{-2} 律。

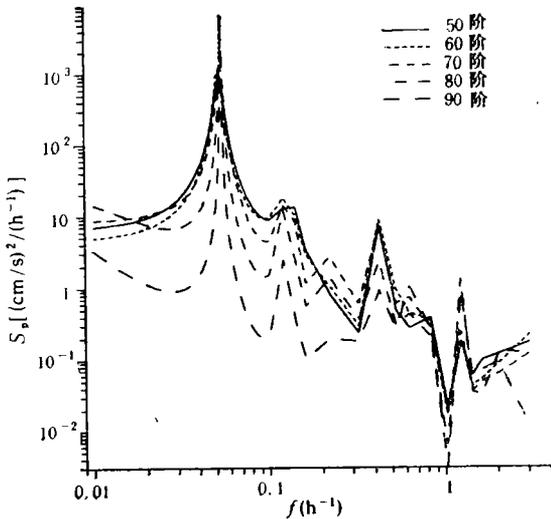


图 4 C2 站 41m 层流速东分量不同阶的最大熵谱

Fig.4 MEM spectra with different steps of eastern current component at depth 41m station C2

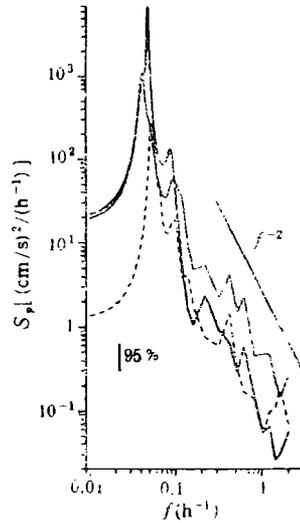


图 5 正压流和 C1, C2 站的斜压流谱密度

Fig.5 Spectra of barotropic and baroclinic currents at station C1 and C2

——正压流谱;.....C1 站斜压流谱,
---- C2 站斜压流谱。

5 等温、盐密度面的起伏规律

前面讨论过长存性细结构,根据资料推断出由平流携带不同温、盐值的海水流经观测点使等温、等盐线随时间变化。而从等密线随时间变化看,在这海域也存在内波。为了证实这一点,采用了 Fang Xinhua 等(1987)所用的方法,用跃层中的几条等密度线及相应的等温线所对应的深度随时间的变化来分析内波因素。某次观测时某一深度 d 处的温、

盐、密度分别等于 T_0, S_0, σ_0 , 找出其它各次观测中温、盐、密分别等于 T_0, S_0, σ_0 对应的深度 $d_T(t), d_S(t), d_\sigma(t)$, 将它们各自连成时间序列曲线(这里称之为等温线、等盐线和等密线)。如果海水物理量的变化仅由内波运动引起, 则上述 3 条线应重合在一起随时间作上下起伏变化。若测站位于不同温度、不同盐度的两种水之交界处, 方向变化的平流会携带不同温、盐的海水通过测站; 若无波动而且在小范围内水平密度梯度为零, 则 $d_\sigma(t)$ 是不随时间变化的水平直线, $d_T(t)$ 与 $d_S(t)$ 在 $d_\sigma(t)$ 附近变化, 使测站在 d_σ 处之 T 与 S 变化引起的密度变化互相抵消。一般地说, 细结构多是两种因素同时作用的结果。

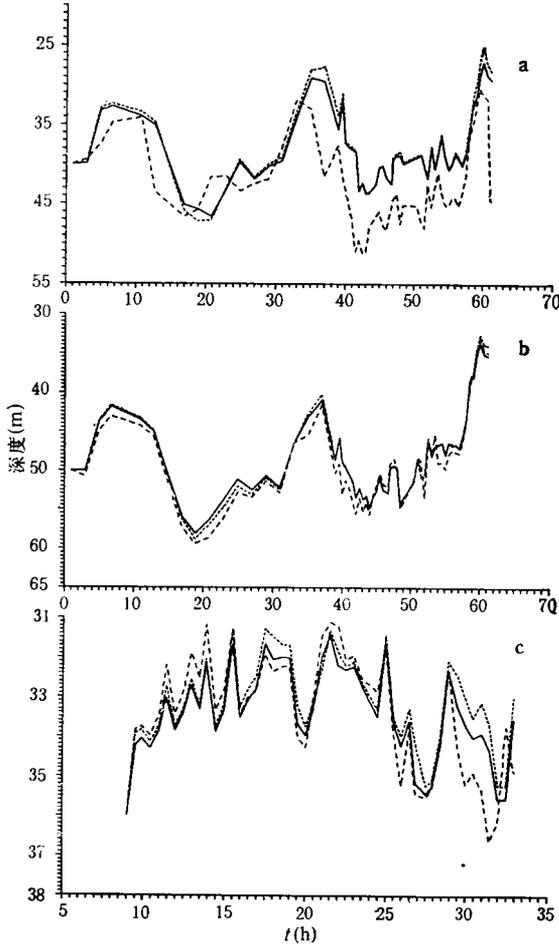


图 6 起始时位于同一深度的等密、等温及等盐度线随时间的起伏变化

Fig. 6 Time-variations of isopycnal, isotherm and isohaline starting with the same depth

a. C1 站(40m); b. C1 站(50m); c. C2 站(35m)。.....温度; ---盐度; ——密度。

从所测流速计算得, 平流速度量值的量阶约为 10cm/s , 在 24h 内此平流使海水流经的距离约为 $8\text{--}9\text{km}$ 。在观测海区中的如此小范围内, 采用海水密度水平均匀的假设不会引入不可忽略的误差。从等密度线随深度和时间变化图看, 等密线除了上下起伏变化外, 随时间变化总趋势呈水平状, 这也证实了水平密度均匀的假设是合理的。

用上述方法分析了两测站多层等温线变化情况, 两典型情况在图 6 给出。从图 6a 曲

线散布情况看,开始时的海水被密度相等而温、盐度不同的海水所代。而图 6b 所示起始位置为 50m 深的 3 等值线却始终较密集,表明在观测过程中这一层的海水温、盐度值变化不大。从等密线的起伏推测此站处始终存在着各种频率的内波,较低频率内波的波高达到 20m 左右。C2 站的曲线(图 6c)也显示出既存在水质的变化也存在内波,内波波高达 4m 左右。由于 CTD 观测不是等时间间隔的,因而无法作频谱分析。但从斜压流的流速谱可以推断,在这海区既有全日潮周期的内波,也存在各种随机内波,使流速谱满足 f^{-2} 规律。

6 结语

根据调查资料揭示出南海西南部内波与细结构现象及其统计特性,它们有如下一些基本点。

存在盐度双跃层和逆盐层等长存性细结构、入侵型细结构以及内波运动引起的细结构。

存在内波,其强弱随地域而变,观测到低频内波波高达 20m 左右。

温度 Cox 数的量值随地域而变,较浅的西南水域高于较深的东北水域,而最低值在中部。整个观测海区的 Cox 数对数值概率密度与标准正态相比更集中而且偏于低值。

流速频谱呈 f^{-2} 规律,而且存在一些显著的频率确定的分量,它们除近全日潮周期外还有一些其它周期,成因不清。

温度脉动垂向波数谱与大洋情况相比有共性也有特性。谱曲线存在一折点,折点对应波数约 $\beta_0 = 0.15\text{m}^{-1}$, 大于大洋折点波数 (0.1m^{-1}); 在 $\beta > \beta_0$ 段,谱线比大洋谱陡,与东海结果一致;而且有地域差别,在微结构波数段,谱线上扬,这与大洋结果相一致。

由于连续站资料过短,而且 CTD 投放间隔不等,未能分析出温、盐、密度时间序列特性。对所得现象仅作了统计分析。对产生这些特性的动力学机制知之甚少,它们在不同尺度运动相互作用过程中所起作用尚待进一步研究。

参 考 文 献

- 方欣华等,1992 CTD 资料的质量控制,青岛海洋大学出版社,200。
- 方欣华等,1988,用 CTD 资料分析东海温、盐、密度垂向结构的初步尝试 II. 温度细结构特性初探,海洋学报,10(2): 129—135。
- Dillon, T.M., 1982, Vertical overturns: A comparison of thorpe and ozmidov length scales, *J. Geophys. Res.*, **87**(c12): 9 601—9 613.
- Fang Xinhua and You Yuzhu, 1987, The vertical characteristics of internal waves in shallow region of the East China Sea analysed from CTD data, *Acta Oceanol. Sin.*, **6**:493—502.
- Fang Xinhua et al., 1989, An investigation of the properties of low-frequency internal waves in the north eastern China Seas, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, **7**(4):289—294.
- Fang Xinhua, YuYing and Zhang Yulin, 1990, The vertical temperature structure with small-and-fine scales in the East China Sea, In *Physics of Shallow Seas*, ed. by Wang Huatong and Dai Hua, China Ocean Press (Beijing), 316 pp.
- Georgi, T. and Schmitt, W., 1983, Fine and microstructure observations on a hydrographic section from the Azores to Flemish Cap, *J. Phys. Oceanogr.*, **13**:623—647.
- Gregg, M. C., 1977a, A comparison of fine structure spectra from the main thermocline, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**:33—40.
- Gregg, M. C., 1977b, Variations in the intensity of small scale mixing in the thermocline, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**:436—454.
- Hayce, S. P. et al., 1975, Measurements of vertical fine structure in the Sargasso Sea, *J. Geophys.*

Res., **80**(3):314—319.

Levine, M. D. and Irish, J. D., 1981, A statistical description of temperature fine structure in the presence of internal waves, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**:676—691.

Roden, G. I., 1971, Spectra of North Pacific temperature and salinity perturbations in the depth domain, *J. Phys. Oceanogr.*, **1**:25—33.

Siedler, G., 1974, The fine structure contamination of vertical velocity spectra in the deep ocean, *Deep-Sea Res.*, **21**:37—46.

INTERNAL WAVES AND FINE STRUCTURE IN THE SOUTHWESTERN AREA OF THE SOUTH CHINA SEA

Fang Xinhua, Bao Xianwen, Zhang Yulin

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

Lao Zhisheng

(*Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai* 200062)

ABSTRACT

The properties of internal waves and finestructure were studied on the basis of an early summer southwestern South China Sea observation involving 2 stations with consecutive CTD casts and some multilayered currentmeters, and more than 50 spaced CTD stations in 1990. The results show that the intensity of internal waves varies with the regions. Observed heights of low frequency waves were up to 20m. The frequency spectra of the velocities follow a -2 power law and have some significant deterministic components including diurnal tides, and others with unknown generation mechanism. The analysis of vertical profiles and oscillations of isotherms, isohalines and isopycnals reveals that there are irreversible finestructure formed by intrusion, reversible finestructure induced by internal wave strain as well as permanent double halocline and haline-inverse layers. The vertical wavenumber spectra of temperature fluctuations are slightly different from those in the oceans, are steeper than those of the laterals, and vary with layers and areas, steeper in deeper layer and southwestern area, and flatter in upper layer and northeastern area. The values of the temperature Cox numbers are different from region to region, higher in the shallower southwestern region, lower in the deeper northwestern region and lowest in the central region. The probability density function of the logarithm of the temperature Cox-numbers is quite close to the normal distribution, except for being more concentrated and skew to the lower band. An expression fitting the experiential distribution is presented.

Key words Internal waves Fine structure Microstructure South China Sea