

# 用CTD资料分析东海温、盐、密度 垂向细结构的初步尝试

## I. 浅海内波的垂向结构

方欣华 尤钰柱

(山东海洋学院物理海洋研究所, 青岛)

### 摘 要

用时间间隔为1小时的12次CTD观测短记录分析了东海浅水区温、盐、密度脉动的垂向特性。平均温、盐、密度剖面可以分成明显的3层：跃层及其上、下层。温、盐、密度脉动基本上由内波引起，但在跃层上、下界也存在一定的入侵卷挟。跃层中心的深度起伏大于6.35米，厚度变化在3.5—8米之间。它们随时间的变化是间歇性的，不规则的。用最大熵谱估计方法估计得温度脉动的垂向波数谱，表明能量主要集中在低波数段（ $<0.13$ 周/米），其间有两突出的谱峰，估计谱线斜率低于-3次方。在中（ $0.13—0.64$ 周/米）、高（ $>0.64$ 周/米）波数段谱线分别有-3与-5次方波数依从关系。可能低波数段是内波运动；中波数段是细结构过程或内波与细结构的联合作用；而高波数段的细结构则很弱。

采用海流计及测温链资料分析我国近海浅海内波特性的工作在近几年已有所报道<sup>[1-3]</sup>。这些工作揭示出近海浅水区内波场的一些重要特性，例如较普遍地存在向岸（或离岸）传播的半日潮频内波。某些海域的波动具有间歇性的波包形式；某些区域由于季节性跃层很强，可将诸如半日潮频内波这样的低频波动用两层模式来处理；呈 $-5/3$ 次方律的温度频率谱，等等。

CTD与XBT等垂向投抛快速取样观测仪器早已在国外使用。根据这些观测资料得到了大洋内波垂向波数谱<sup>[6,7]</sup>，然而在我国还未有此类文章发表。对于水深仅几十米的浅海中的内波垂向结构调查分析，无论是在国内还是国外刊物都未见诸报道。本文试图对东海局部水域的浅海内波垂向特性进行初步的探讨。主要是采用最大熵方法来估计投抛垂向波数谱。

### 一、资 料

所用资料来自1980年中美合作长江口调查时美国“海洋学家”号调查船于6月初的

本文于1986年4月8日收到，修改稿于1986年7月20日收到。

• 为国家自然科学基金项目“中国近海内波特性调查研究”的部分成果。

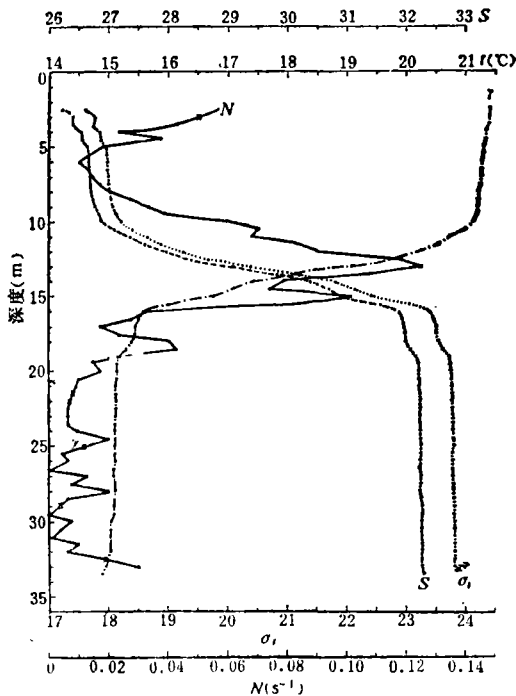


图1 12次观测的温度( $t$ )、盐度( $S$ )、 $\sigma_t$ 的平均垂向剖面以及Väisälä频率( $N$ )的垂向分布  
 $\times$ 表示此深层处 $N$ 为虚数,即静力不稳定层, $D$ 表示深度

CTD观测,资料的精度充分满足本文分析的需要.从CTD的深度(即压强)时间曲线中可清晰地看到由表面起伏产生的深度(压强)脉动.这一因素会引入垂向尺度为2米左右的虚假波动信号,必须消除.所用方法将在本文的续文中详细描述.资料为12次连续CTD观测,观测时间间隔为1小时,观测地点位于 $31^{\circ}30.5'N$ 、 $123^{\circ}29.8'E$ ,水深为34米.

12次观测的平均温度、盐度及由此计算得的 $\sigma_t$ 的深度剖面如图1所示.同图中还给出了用平均 $\sigma_t$ 剖面来求得的Väisälä频率剖面.可看出跃层是强的,它位于10—16米深层,其上下界约在 $21^{\circ}C$ 与 $15.5^{\circ}C$ 等温线所在深度.中心位置约在 $19^{\circ}C$ 等温线处.在跃层上下仍有温度、盐度、密度随深度的微小变化.不能用两层模式来模拟,而应采用较接近实际的三层模式.

关于调查期间这一水域的环境情况(诸如温度、盐度、密度的大面分布,流动特征,底形等等)已有详细报道.

## 二、运动类型的判别

图2给出了跃层中温深剖面随时间的变化,在3点钟时,跃层中心 $19^{\circ}C$ 点位于11.75米,而在1小时后则下沉到18.10米.变化幅度达6.35米.而且从趋势上看,在第1次观测前它还在更浅的位置,跃层起伏的幅度大于6.35米.

引起温度起伏变化的原因很多,主要有波动、涡旋、湍流、由海流携带的细结构,以及具有不同温盐特征的水体入侵等.由于资料的局限性,无法鉴别所观测到的脉动是否由内波所致,但仍可作一些粗略的定性分析.

内波引起的脉动与入侵引起的脉动有截然不同的温度、盐度、密度变化特性.如图3所示.若为入侵,不同水体必然在彼此密度相近的深层互相穿插,高温必然高盐,低温一定低盐,使两者引起的密度变化互相抵消,因而虽能记录到温盐变化,但根据温盐计算出的密度却几乎不变(见图3右3图).内波引起的脉动情况却完全不同,在绝热、无扩散的假设下,当具有某一温度的水质点向上运动时,在盐度剖面 and 密度剖面图中与之相应的盐度点和密度点也向上移动相同的距离(见图3左3图).

现将上述判别方法用于本观测资料.在第一次观测中对应于温度为16、18及 $20^{\circ}C$ 之

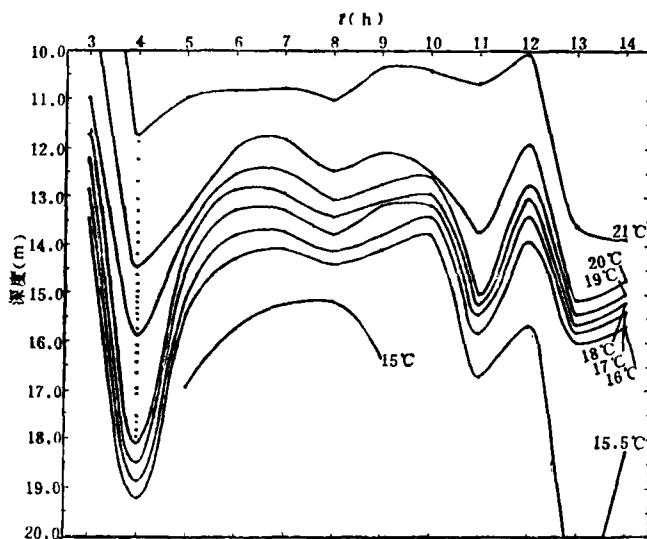


图2 温深剖面随时间的变化

盐度值 (31.41、29.84及28.07) 和密度值 ( $\sigma_t = 22.93$ 、21.24及19.38) 在以后历次记录中所处的深度表示在图4。可看出18°C温时线与相应的盐时线、密时线几乎重合 (一般仅相差1—2厘米, 最大偏差为8厘米)。这说明观测得到的温跃层核心区的温、盐、密脉动基本上是由于水质点上下运动引起的, 而不是因为具有不同温盐特性的水体入侵。然而16°C尤其20°C温时线与相应的盐时线及密时线在某些时候却有明显的差别。这说明除了水质点上下运动外, 还存在着跃层上下不同温盐特性的水体向跃层的入侵, 或者说当跃层上下起伏时将跃层上的水体卷挟进来了。然而将密时线上下起伏之幅度与三线之间的偏差对比可知, 引起温盐变化的原因主要不是入侵或卷挟, 而是水体的上下运动。

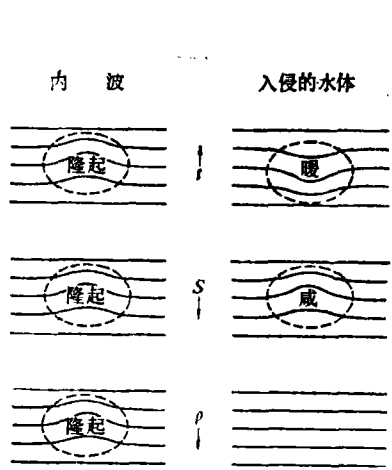


图3 内波与入侵引起的物理量脉动示意图

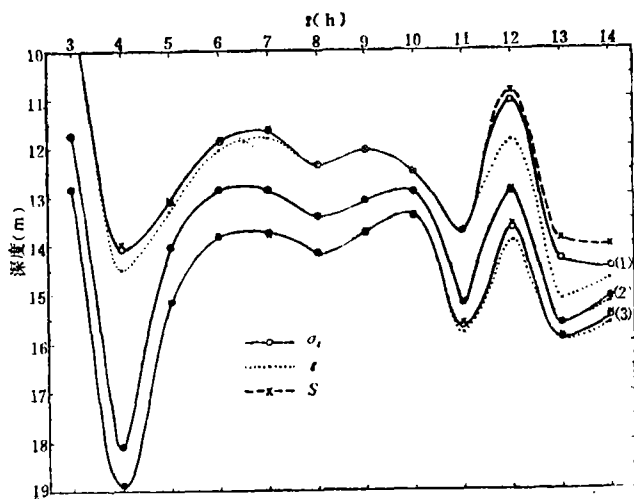


图4 (1)、(2)、(3) 分别表示16°C、18°C及20°C 温度点及与其对应的盐度点和密度点之深度随时间的变化

一般地说,由(中尺度)旋涡引起的物理量脉动具有较低的频率,而图2所示的显著峰谷变化频率落在内波频率区间内(从惯性频率到Väisälä频率)。这样就可较放心地将较大尺度之旋涡因素排除在本资料之外。

不能排除存在湍流因素,然而较大幅度的脉动不可能是湍流引起的,因为湍流必然产生混合。从温度剖面看,混合现象并不明显,即使存在也只是小尺度、低强度的。

### 三、时间和模态特性

由于只有历时11小时的观测,无法对资料作细致的时间序列分析,然而从图2可粗略地看出此记录中半日潮周期的波动和浅水倍潮(若存在的话)并不占重要地位。图5(a)给出了跃层中心(19°C)之深度随时间的变化,表明跃层深度随时间的起伏变化是相当不规则的,并且是间歇性的。

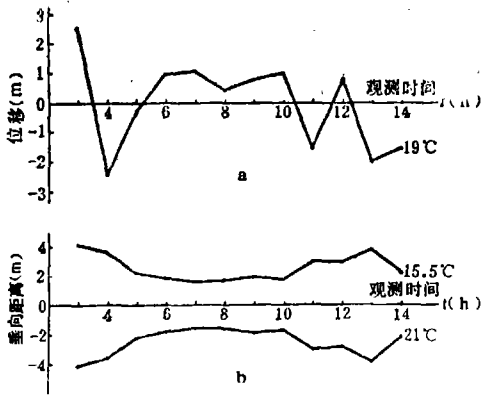


图5 (a)温跃层中心(19°C)深度随时间的变化;  
(b)温跃层厚度(15.5—21°C)随时间的变化

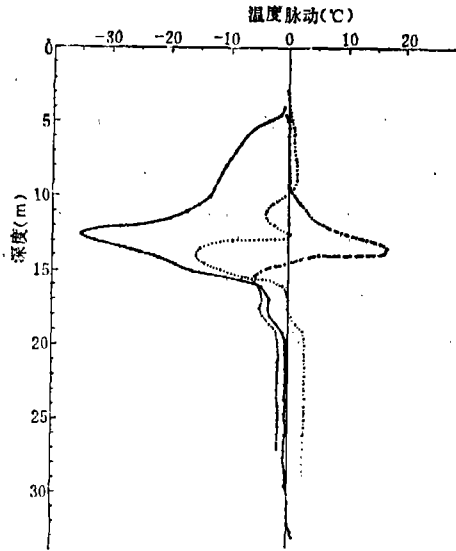


图6 温度脉动垂向剖面  
实线为第1次观测 虚线为第3次观测 点线为第10次观测

跃层中心线的起伏粗略地描绘出第一模态的波动,而跃层厚度随时间的变化情况说明了存在第二模态的波动.仔细察看图2中之第二次记录.图中用圆点标出了间隔为0.1°C之温度点的深度,18.4—18.6°C之间的间隔极大而19.4°C附近的间隔却很小.另一间隔较大的位置在20.0—20.1°C之间,而在它的上下间隔又较小.这种间隔不均匀的现象表明存在着更高模态的运动。

将各次观测值减去12次观测结果之时间平均值得到各次的脉动值,图6给出了其中几次观测的温度脉动剖面.用这些剖面能更清楚地看出所含模态情况以及脉动随时间不规则的变化,例如实线表示的第一次观测脉动在整个深度上符号相同,说明第一模态占绝对优

势，而虚线表示的第三次观测时脉动量沿深度改变符号（跨零深度在14.4米左右），呈现出很强的第二模态特性，点线表示的第10次观测中存在两个大小不等的同符号峰值，表明有较强的第一模态和较弱的第二模态。

进行仔细的模式分析尚需做较多的工作，本文不拟在这方面再深入而代之以进行垂向波数结构分析。Flatté等人<sup>[8]</sup>已阐明两者是相通的。

#### 四、关于最大熵谱估计方法(MEM)的说明

投射垂向波数谱是揭示内波场特性的重要手段，它能清晰地给出内波场的垂向尺度。观测得到的大洋内波垂向波数谱是构成GM谱模型的重要依据之一。然而本文所用资料过短（最长的为60个记录，最短的只有33个记录），采用周期图法或相关变换法都难得到令人信服的结果，而MEM却能较准确地找出谱峰所对应的波数值，而且谱值也较可信。再从基本假设看，相关变换法假设资料的相关函数迅速趋于零；周期图估计则假设样本是以资料长度为周期的周期函数，它们都不符合本文所用资料情况。MEM要求过程是自回归的。一般地说，线性平稳过程总可近似地看成自回归过程。在环境条件基本不变时，有理由认为资料是线性平稳过程。由于MEM的上述优点，本文就用它来估计垂向波数谱。

表1 谱峰对应的波长（单位为米）

其中在圆括号内者为谱肩所在的波长

峰 序	观 测 次 序												平 均	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	24.0													
2		16.6	18.5	18.5	18.5	20.9	18.5	18.5	16.6	20.9	16.6	16.6		18.5
3			10.4											
4		7.5		7.5	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	7.5		7.5	6.9	(7.7)
5				4.9	4.9	(5.5)	4.9	4.9	4.9	(4.9)		(4.9)		(4.9)
6			3.3	3.3			3.3	4.2				4.4		
7		2.3	2.3			(2.6)			2.5	(2.5)				(2.3)
8		1.9		1.6	1.9	1.7	(1.6)			1.6	1.7	1.9	1.9	(1.6)
9		1.4	1.3		1.2	1.3	1.2			1.2	1.1		1.0	

计算最大熵谱过滤器系数的方法主要依据Anderson<sup>[9]</sup>，并用经验方法确定过滤器系数的长度<sup>[10]</sup>，根据最大熵谱的分布，自由度和方差估计得本文（图7）结果的置信区间为：

$$0.70\hat{S}_i \leq S_i < 1.70\hat{S}_i$$

其中， $\hat{S}_i$ 为谱 $S_i$ 的估计量。

### 五、投抛垂向波数谱

12次观测的温度脉动垂向波数谱之间有相当大的差别，这是可以理解的，因为各次观测的脉动剖面存在很大差别。MEM能得到很高的分辨率，从结果中可清晰地得到9个谱峰。其对应的波长在表1中列出。并非每次记录都包含全部9个谱峰，第一、三峰只分别出现在第一、二次观测中。

表2 第一—四谱峰值〔单位为(°C)<sup>2</sup>米/周〕及温度脉动深度剖面的最大温度脉动(单位为°C)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
谱峰 值	第一、二	16.33	88.98	1.69	6.06	7.49	2.24	3.85	3.67	3.58	2.92	17.80	11.45
	第三、四	1.25	1.02	1.26	1.40	1.44	0.61	0.79	1.01	2.05	0.24	4.88	3.57
最大温度脉动	-3.52	3.36	1.66	-1.76	-1.90	-1.76	-1.91	-2.50	-2.57	-1.56	3.70	3.68	

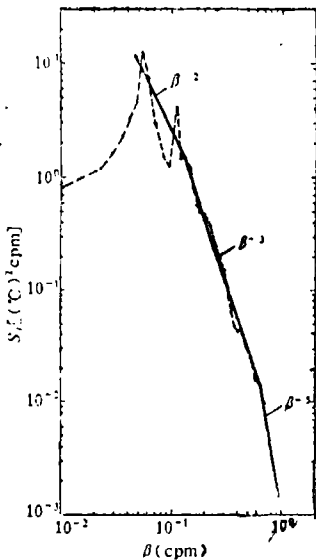


图7 12次观测谱(S<sub>t</sub>)线的总体平均, β为垂向波数(图中β<sup>2</sup>应为β<sup>-2</sup>)

表2列出了第一—四谱峰的谱值及温度脉动剖面中的最大值。对比这两列数值并参考温跃层深度和厚度变化(图5)可看出,一般地说,当脉动量大而且温跃层深度偏离平均位置大,则第一、二谱峰值就较大。然而不能简单地归纳出第三、四峰值的变化规律。

12条温度脉动垂向波数谱的平均结果如图7所示。虽然很多谱峰已被平滑掉了,但仍存在一些突出或显著的谱峰。而且从此图中可以得到较可信赖的谱形,由于水深仅为34米,跃层厚度小于10米,分析的注意力将落在波数高于0.04周/米(波长<25米)的波数域。

首先从图中可看出两个明显的谱峰,第一峰的波数为0.054周/米(波长为18.5米),它可能相应于第一模态的波动,跨越整个温跃层及其上下邻近深层,显示出温跃层中最重要的波动。第二峰为波数近于0.11周/米(波长为9.1米)之谐波,可能相应于波动第二模态。继之出现的谱峰(或谱肩)图中也一一可见。能分辨出的谱峰对应的最高波数为0.64周/米(波长为1.6米),它甚至已落在细结构长度尺度的最小限。

Gregg<sup>[11]</sup>的大洋主温跃层的观测结果为:在波数低于0.66—0.1周/米时,谱线有-2次方律,高于此波数时呈-3次方律。GM内波谱模型则以-2.5次方律为依据。Gregg推测说-2次方律为内波的特性,而-3次方律则为细结构特性或者为细结构与内波联合作用的结果。图7所示谱线的斜率较明显地分成3段:低波数段(<0.13周/米),由于存在两个突出的谱峰,很难精确确定谱线斜率(作为比较,在图中这一段画出一2次方斜率)。

中波数段(0.13—0.64周/米)具有一3次方的波数依从关系,而高波数段则呈—5次方律。与Gregg的结果相比较,根据波数范围可以推测:很可能低波数段的谱峰为内波的特征,—3次方律是细结构或内波与细结构联合作用的结果,而—5次方律表明能量迅速减弱,即细结构很弱。

关于谱值,图6的结果比Gregg所示的高出一个量阶,这也是可接受的,因为季节性跃层垂向温度梯度大,水质点较小的上下起伏就会引起较大的温度脉动。

## 六、结 束 语

从时间间隔为1小时的12次CTD观测记录得出,若用三层模式来拟合平均密度垂向剖面是较合理的。温跃层处具有很高的Väisälä频率(高达 $0.12\text{秒}^{-1}$ )。跃层的深度与厚度都随时间作不规则变化,无明显的潮周期变化规律而具有显著的间歇性。温、盐、密度的脉动在跃层中心处由内波引起;在其上下界处主要由内波引起,但也存在其上下水体的入侵或卷挟。跃层中心起伏大于6.35米,厚度变化在3.5—8米之间。

虽然最大熵谱估计方法还存在一些问题需解决,但在小样本情况下它仍不失为分析问题的有效手段。本文是将它用来分析内波垂向结构的初步尝试,得出了温度脉动垂向波数谱,虽不同时间的谱有较大差别,但结果是合理的。存在可识辨的9个谱峰,能量主要集中在低波数处。总体平均谱线显示出在低波数段( $<0.13\text{周/米}$ )存在两个突出的谱峰,从趋势看,谱线斜率低于—3次方。中波数段(0.13—0.64周/米)与高波数段( $>0.64\text{周/米}$ )谱线分别具有一3次方和—5次方的波数依从关系。与Gregg的模型<sup>[11]</sup>及GM模型相对比,可能低波数段由内波运动所控制,中波数段是细结构过程的贡献或内波与细结构联合作用的结果。而高波数段谱线迅速下落表明这种尺度的细结构很弱。

在分析过程中张玉琳老师给予了大力帮助,王景明副教授仔细审阅了文稿,国家海洋局第二海洋研究所提供了资料,特致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 汪德昭等,浅海内波与声场起伏,声学学报,4(1981),209—218.
- [2] 潘惠周等,浅海内波功率谱分析,海洋通报,1(1982),1:10—16.
- [3] 束星北等,用单站测量确定近海内潮波的方向和速度,海洋学报,7(1985),6:665—673.
- [4] 束星北等,利用海流观测资料检验近海内波,海洋学报,7(1985),5:533—538.
- [5] 尹逊福等,舟山外海的潮周期内波,海洋学报,8(1986),6:772—778.
- [6] Hayes, S. P. *et al.*, Measurements of vertical finestructure in the Sargasso Sea, *J. Geophys. Res.*, 80(1975), 3: 314—319.
- [7] Stegen, G. R. *et al.*, Dropped horizontal coherence based on temperature profiles in the upper thermocline, *J. Geophys. Res.*, 80(1975), 27: 3841—3847.
- [8] Flatté, S. M. *et al.*, *Sound Transmission Through a Fluctuating Ocean*, Cambridge University Press, 1979.
- [9] Anderson, N., On the calculation of filter coefficients for maximum entropy spectral analysis, *Geophysics*, 39(1974), 69—72.
- [10] 安鸿志等,时间序列的分析与应用,科学出版社,1983.
- [11] Gregg, M. C., A comparison of finestructure spectra from the main thermocline, *J. Phys. Oceanogr.*, 7(1977), 33—40.