

综述

海洋细结构综述*

鲍献文 方欣华

(青岛海洋大学物理海洋研究所, 青岛 266003)

提要 回顾海洋细结构研究发展过程, 阐明海洋细结构基本概念、成因和类型, 简单介绍几种用于细结构研究的多参数测量仪器, 概述细结构谱特性的研究成果及几个解释模式, 总结 Cox 数与 Richardson 数的统计特性。最后, 阐述目前细结构研究的几个焦点问题并预测近期研究的趋势。

关键词 细结构 内波 小尺度过程 微结构 综述评论

在早期的海洋观测中, 由于观测资料的垂向间隔很大, 所得海水物理量的垂直剖面都人为地绘成光滑的曲线。40年代, 通过 BT 仪在其烟熏玻片上记录到当时被误认为由于仪器故障而造成的阶梯状温深曲线, 这就是最早的细结构记录。Woods (1968) 用染色实验阐明海水温度等物理量垂向分布的非光滑性并提出海洋垂向存在类似片、层结构的理论。而卓有成效地开展海洋细结构的研究是在高分辨率、快速测量的电子仪器引入海洋调查之后。

70年代, STD (盐度、温度、深度剖面仪), CTD (电导率、温度、深度剖面仪) 相继出现和使用, 物理海洋学家有条件对海洋细结构进行深入的调查研究。海洋细结构不仅使人们改变了传统的海洋学观点, 而且它与其它海洋学研究领域(如内波、海水混合等)密切相关。在此研究领域, Stommel 等 (1967), Woods (1968), Phillips (1971), Garrett 等 (1971) 做了开创性的工作。鉴于我国对海洋细结构的研究尚属起步阶段, 本文综合评述海洋细结构研究领域的基本概念和重要研究成果, 并探讨该领域未来研究方向的发展趋势。

1 海洋细结构基本概念

海洋细结构是一个很笼统的概念, Munk (1981) 将海水物理量垂向变化尺度介于 1—100m 之间的脉动称为细结构。Gregg (1987) 从物理机制上把远大于消耗尺度而小于温跃层的 ϵ 折厚度的脉动归结为细结构。这两尺度范围的上界均可同大洋温跃层的厚度相匹比, 以此尺度作为细结构的尺度对深海大洋是合适的。而 Eriksen (1978), Kunze 等 (1990) 将细结构垂向空间尺度局限在 1—10m。方欣华等 (1994) 结合季节性跃层的厚度尺度认为以 1—10m 的尺度范围作为研究季节性跃层处和浅海海域细结构特性较为合适。

* 国家自然科学基金资助, 4880228 号。

收稿日期: 1993年1月13日, 接受日期: 1993年5月27日。

在地转系统下,地转调整过程的结果使得细结构垂向尺度和水平尺度之比呈 f/N (f, N 分别为惯性频率和浮性频率)。Федоров (1972) 根据观测资料总结出此值为 10^{-4} — 10^{-2} 。实测资料表明,细结构在水平方向能延续几百米至几千米。

细结构自身是随时间变化的, Osborn 等 (1972) 提出细结构的时间尺度是内波的最小周期, Eriksen (1978) 和 Munk (1981) 认为细结构的时间尺度可与内波周期相比拟,甚至短于浮性周期。Lambert 等在加勒比海东北部 19 个 STD 站位的观察,虽然相隔最远的两站相距 14km,而且观测时间持续 4d 之久,但温跃层的热盐结构却十分相似,特别是 520—600m 之间的 7 层阶梯结构均存在且相当稳定。这说明,至少在 4d 之内没有大的变化。以上列举的数字跨越范围很大,这表明对细结构的时间和空间尺度如同内波那样,有较宽的分布范围。

2 细结构的类型及成因

在细结构的产生过程中,内波起着重要作用。在连续层化的海洋里,由于高频高模态内波引起的线性形变,使得海水物理量随深度缓慢变化的垂向剖面叠加了小尺度脉动。当内波消失后,物理量的垂直剖面又恢复原状,此类细结构为可逆细结构。由不同水团在界面处彼此入侵形成的相互穿插叠置、双扩散过程,内波非线性效应以及内波破碎等都会形成细结构,这类细结构在上述因素消失后其剖面不会恢复原状,此类细结构为不可逆细结构。

可逆细结构引起的温、盐等物理量的变化与内波的垂向位移场近似地成线性关系 (Desaubies et al., 1981), 这种细结构的谱特性由内波场决定。

实际内波场在不同程度上都存在非线性作用。Desaubies 等 (1981) 提出若尺度超过 2m 时非线性变形效应将是重要的。非线性相互作用控制着内波谱的能量通量、频率波数谱形,并最终控制着湍流及混合。内波非线性作用永久地改变了温盐等剖面,形成不可逆细结构。

有的学者认为,大尺度内波的重力翻转是产生小尺度湍流的主要原因,另一些学者则认为剪切不稳定似乎比总体翻转更重要,至少在上层海洋是这样。也有学者认为细结构由重力翻转形成而被剪切不稳定平滑。对于内波破碎了解甚少,有两种不稳定形式会直接导致内波的破碎,即平流不稳定和剪切不稳定。在平流不稳定情况下,大振幅的内波破碎出现局地的逆密现象。而剪切不稳定则发生在具有大密度梯度的水层里。两种不稳定性取决于波的斜率和背景剪切。根据内波理论,速度剪切近似正比于浮性频率的平方 (Munk 1981), 因此,最大的重力稳定层恰是最大的剪切不稳定层。不断发生的内波破碎混合能减缓密度剖面的突变,在湍流区密度梯度减小,而在湍流边界处梯度变大,这导致了阶梯状细结构。而内波的剪切又集中在阶梯处,再次导致了不稳定性,引起内波破碎。这样反反复复,最后表现出随机性很强的细结构剖面。

在观测所得的温盐剖面上,会出现高温高盐水叠置在低温、低盐水之上(顺温逆盐现象)或低温、低盐水叠置在高温、高盐水之上(逆温顺盐现象)的现象,在两中水界面处要发生双扩散现象。由于热扩散系数比盐扩散系数高两个量阶,热量扩散引起的海水密度变化远大于盐扩散引起的海水密度变化。因此,对于顺温、逆盐现象,其上层水因热盐扩散使密度大于下层水而使海水处于不稳定状态,形成双扩散对流。对于逆温、顺盐现象,热

盐扩散使界面处的密度差增大,系统变得稳定,形成层状细结构剖面。海水入侵引起的穿插叠置现象则发生在两种有特性差异的水体交界面处(如海洋锋),在 T, S 垂直剖面上表现出锯齿状的细结构。

由于细结构成因具有随机性,海洋细结构也必然表现出很强的随机性。许多海洋学家根据可逆细结构和不可逆细结构的特点,企图把两者区分开来,例如 Desaubies 等(1981), Fang Xinhua 等(1990)在这方面进行了研究。当局地等密面、等温面及等盐面的位移相同时,一般为可逆细结构。否则,一定有不可逆细结构的成分存在。Jose Luis (1984)引入温度浮性频率 N_T 和盐度浮性频率 N_S , 分析 N_T^2 和 N_S^2 的相位差来区分可逆与不可逆细结构,当相位差很小时,认为是可逆细结构。

3 调查仪器

海洋细微结构研究的发展是以用高精度快速取样的电子仪器取得的海洋调查资料为基础的。70 年代, STD, CTD 的广泛使用,推动了这一领域研究的发展。70 年代后期出现了流速剖面仪,开始了流速等物理量的细结构特性研究。80 年代,将温度、电导率、流速向量、压强等探头安装在同一装置,方便了细结构特性的综合分析。TOPS, MSA 和 RiNo 即是这类仪器的典型代表。

TOPS 为一种能同时测量流速、温度、深度、电导率的海洋调查仪器。整个仪器高 4.2m, 外体看由一个长 3.4m、半径为 0.2m 的圆柱和两端各一半球形帽组成。头部伸出温度、电导率的探头和 3 个 2-轴声学测速仪,尾部是声学追踪系统,尾部两侧还安上用来控制下落速度的拖须。与置于海底的 3 个发射器组成一个阵列系统。TOPS 系统能以极高的分辨率测出压强、温度、电导率、流速、加速度及通量选通指南针的东、北分量等 9 个物理量。TOPS 的这种良好品性能充分满足细结构观测的需要, Toole 等(1984)曾利用东赤道太平洋的 TOPS 资料作了温度谱、流速谱、流速梯度谱、变形谱及 Richardson 数分析。

MSA 仪(微尺度感应阵列)(Eriksen, 1978) 是用于测量距离为 1—10m 的垂直、水平流速和温度的时间序列。它有一个 H 形钢架,其水平方向的刚性棒长为 20m, 棒两端各立一个 8m 高的桅杆,锚缆连结在此框架的重心处,电池和电子采集系统,装在两个直径为 1m 的铝球里面,这两铝球也为系统提供必需的浮力,每根桅杆上面安置了 7 个均匀分布的温度器。传感新型的螺旋桨海流计放在桅杆底部。该仪器用一个罗盘、两个加速度仪和一个压力转换器获取锚系运动的信息。用挂在桅杆上的鳍状物测量水平流的方向。可用 MSA 资料估计内波、细结构谱及垂向相干谱。其速度资料可估计速度谱、速度剪切谱以及 Richardson 数。

Kunze 等(1990)简单介绍了用于测量 Richardson 数的中性浮子 RiNo, 它能记录下速度剪切和浮性频率。其主体为一 5m 长的桅杆,在它的中间套有一个三角形钢架。在桅杆上放置了由 6 个间隔为 0.25—5m 的三轴声学速度仪组成的剪切传感器阵列、8 个间隔为 0.5—5m 的 FP4 温度计组成的测温阵列,中间安有一个 CTD 仪。利用该仪器调查资料可研究剪切和变形细结构。

4 垂向波数谱特性

目前研究得最深入的是温度细结构的谱特性。Levine 等(1981)对大洋资料进行分

析,得出在细结构尺度范围内温度脉动谱斜率为 $-2.5 \sim -3$ 。Georgi 对南极锋区,方欣华等(1994)对南海西南海域得出 $-3 \sim -4.1$ 。方欣华等(1988)对东海细结构进行了分析,得到了温度梯度谱的斜率为 $-1 \sim -1.6$ 。可以看出,对于象浅海或锋区这样混合较强的区域,细结构谱较陡。Gregg (1977a)通过南、北太平洋中部的资料分析发现,谱在波数 k 为 $0.06 \sim 0.1 \text{cpm}$,有一个明显的折断; $k > 0.06 \sim 0.1 \text{cpm}$,谱斜率为 -3 ; $0.002 < k < 0.06 \sim 0.1 \text{cpm}$,斜率为 -2 。Gregg (1977b)利用太平洋和大西洋中纬度资料,Hayes 在北太平洋低纬度海区所得的总体平均谱,在 $k < 0.1 \text{cpm}$,接近于 -2 ; $0.1 < k < 2.0 \text{cpm}$,接近 -3 。Fang Xinhua 等(1990)在东海发现, $k < 0.13 \text{cpm}$,温度谱斜率为 -2 ; $0.13 < k < 0.65 \text{cpm}$,斜率为 -3 ; $k > 0.60 \text{cpm}$,则为 -5 。Gregg (1977b)对此斜率的折断归结为在这个尺度上动力学的变化或细结构效应。Toole 等(1984)分析了赤道潜流区与较高纬度的海流资料,在这样两个具有显著不同的海流背景海区里却发现了均在 0.1cpm 附近出现明显折断。Gargett 等(1981)通过分析指出,这个尺度是弱非线性向强非线性转化的尺度。

综上所述可归纳出如下特点,垂向温度梯度谱可分成 3 个波数段,它们分别有不同的动力学过程,波数小于 0.01cpm 的区域,被近似指数平均温度梯度所控制;介于 $0.01 \sim 5 \text{cpm}$ 之间,谱受不规则的空间高梯度区控制;大于 5cpm 是微结构区域;大约在 5cpm 处存在一个弯曲,即出现最低谱强度;随后在较高的波数处有一个极大值。

对其它物理量细结构谱特性的研究则不如温度谱那样深入。随着观测仪器的发展和海洋小尺度过程研究的需要,物理海洋学家对流速、剪切和变形等诸因子细结构特性进行了研究。Eriksen (1978) 等发现,在内波频段 ($2f < \omega < N$) 上,速度的垂向相关比温度的垂向相关低,这与线性内波理论不一致。他们认为,这是由“细结构污染”引起的。D' Asaro (1984) 所得速度垂向波数谱在波数 $k < 0.03 \text{cmp}$ 谱形呈 $k^{-2.5}$ 。Duda 等(1989)利用笛卡尔潜水仪所获取的速度资料,估计得谱在波长 $10 \sim 40 \text{m}$ 处谱形为 $k^{-3} \sim k^{-4}$ 。Kunze 等(1990)使用 RiNo 浮标资料计算得的速度谱,在 $k < 0.01 \text{cpm}$,谱形呈 k^{-2} 依从关系。对于剪切谱,Gargett 等(1981)等所得的剪切谱,在 $k < 0.1$ 几乎为常数;当 $k > 0.1$ 时,其谱变为 k^{-1} 。Duda 等(1989)得到在高波数段谱接近 k^{-1} 。Kunze 等(1990)则有 $k^{-1.4}$ 的谱形。Toole 等(1984)的结果为,在赤道太平洋地区 ($4^\circ \text{S} \sim 10^\circ \text{N}$) 的剪切谱,在低波数大致平坦;在尺度小于 10m 时,以 k^{-2} 下降,而这个地区的变形谱相对平坦;在较大尺度上,谱形呈 $k^{-1/2}$,小尺度则呈 k^{-1} 。

5 解析模式

如何用解析方法描述观测的谱形,在 70 年代有不少研究工作,Phillips (1971),Garrett 等(1971),McKean (1974) 和 Eriksen (1978) 等提出的模型具有代表性。

Phillips (1971) 研究了片层细结构对内波谱的影响,假设垂向结构由强梯度片和弱梯度层组成,层中梯度为零,片的厚度为零,内波引起的片层结构垂向运动仅为刚性移动。在这样简单的假设下得到了温度序列富氏系数均方值呈 ω^{-2} 律。由于内波谱也具有 ω^{-2} 律,表明无法用谱方法将两者分离。由于此模式的假设有很大局限性,因而与实际情况相差较大。

Garrett 等(1971)研究了存在细结构的内波谱。他们假定温度剖面由平均温度梯度

和细结构两部分组成,细结构变量与内波位移变量是相互独立的,细结构脉动量是随机的且均值为零,内波垂向位移尺度远大于细结构尺度(即细结构近似条件),得到了细结构对温度谱贡献依赖于内波均方根频率 S 、均方根位移 Z 和细结构谱的结论。他们还对比相干谱作进一步分析,发现细结构的出现减小垂向相干,并提出相干尺度等于细结构厚度。此模式最大弱点是人为假定了细结构梯度谱,并在推导过程中使用了细结构近似。

McKean (1974) 做了一个随机层细结构模式。假设随机片层结构服从 Poission 分布。为了避免使用细结构近似,定义了一个结构函数。仍采用 Garrett 等 (1971) 提出的介质特性和内波统计量是互相独立的观点。为了实现统计量的平均,采用显式内波分布函数。在所得温度结构函数表达式中,细结构污染项只与内波位移结构函数的平方根成正比而与内波分布函数选取无关。模型给出了不同波数段细结构污染谱的具体表达式。从众多实测资料谱看,细结构谱形与具体海洋背景是有关的。Joyce 等人利用 IWEX (内波实验) 资料分析并作了相关统计后发现细结构层的厚度与温度差是不相关的,厚度之间也不相关,且厚度和温度差近似服从 Poission 分布。因此,此模式的假设是有一定后验性的。

80 年代已经开始对温盐细结构动力学研究,Gill (1981) 等曾做了海水入侵动力学模式。Jose Luis (1984) 模拟了阶梯状温盐细结构的形成过程。Onken 等 (1990) 运用中尺度密度锋的生成数值模式解释了锋区温盐细结构现象。

6 研究小尺度过程的无量纲量

从动力学观点看,海洋细结构是物理量在整个海洋中均方梯度的产生和耗散的平衡,细微结构是研究海洋中质量传输与能量平衡的因素。在研究中常采用一些无量纲量来表征细微结构的热力学品性,其中 Cox 数和 Richardson 数是最重要的两个无量纲量。

物理量 φ (如海水的温度 T 、盐度 S 等) 的 Cox 数 C_φ 定义为:

$$C_\varphi = \frac{\left\langle \left(\frac{\partial \varphi'}{\partial z} \right)^2 \right\rangle}{\left(\frac{\partial \langle \varphi \rangle}{\partial z} \right)^2}$$

式中 $\langle \rangle$ 表示总体平均; φ' 为 φ 的脉动量(即 $\varphi' = \varphi - \langle \varphi \rangle$)。 C_φ 首先由 Osborn 等 (1972) 应用于海洋温度资料处理,可清楚看出, C_φ 是 φ 的“标准化”梯度方差。它反映出细结构的强度,在一些简化假设下,可证明在湍流中它表征物理量 φ 的通量大小。

Cox 数与海洋能量消衰密切相关, Gregg 等 (1986) 统计出 C_T 与能量衰减率成线性关系。Cox 数还影响细微结构波数谱形状 (Gregg, 1977a)。

然而在 Cox 数公式中的平均运算存在很大的人为任意性,不同学者计算得的 Cox 数值也有较大的差别。Gregg (1977b) 报告了 3 个航次的调查结果,在 125m 范围的平均剖面上,10 月份资料平均 C_T 为 2; 6 月份资料为 10; 2—3 月份资料为 59。从 C_T 数的深度剖面看,较低值出现在主温跃层中,较高值出现在季节性跃层或主温跃层底,其值大约为 3 000。Elliott 等得到在赤道太平洋 30—130m 层 C_T 接近或小于 10。Williams 计算得加里福尼亚海湾 C_T 大约为 20。方欣华等 (1994) 对南海西南部近 25 万个 C_T 数作统计得出它们大多小于 2, 大值只是突发性地出现,且发现 C_T 近似服从对数正态分

布。

Richardson 数 Ri 是衡量层结流体中剪切流动稳定性的一个准则,它定义为:

$$Ri = \frac{N^2}{(\partial v / \partial z)^2}$$

式中, N 和 $\partial v / \partial z$ 分别为浮性频率和速度剪切。根据稳定性理论,当 $Ri > 1/4$ 时,流动才是稳定的。Garrett 等利用 GM-72 谱模型推出 Ri 与 N 成反比的关系;一般地 N 随深度减小,所以剪切稳定性随深度而增大。记 s', N' 为剪切和浮性频率的细结构。 s, N 为其局地平均值,根据内波理论垂向速度梯度和密度梯度是近似成正比的,有细结构时 Richardson 数 $Ri' = \frac{RiN^2}{N'^2}$, Gregg 等估计 $\frac{N'^2}{N^2}$ 的量阶约为 20。因此出现剪切不稳定的概率随细结构的增强而迅速增大。

Erikson (1978) 观测得 Ri 的时间序列,发现 Ri 的分布在 0.25 处有一个尖锐截断,并认为这似乎是由于剪切的增加而不是层结减小所致。低的 Ri 与逆温有关。Desaubies 等(1982)做了内波场下 Ri 的统计模式,得到 Ri 分布只与均方剪切和均方变形有关的结论。Toole 等(1984)利用东热带太平洋资料对 Ri 进行了统计,发现 $Ri < 1/4$ 占总数的 10%。绝大部分分布于 $1/4-1.0$ 之间。 $Ri > 1$ 的概率密度很快下降,这个结果与 Desaubies 等(1982)模式的结果基本符合。

7 与大中尺度过程的关系

细结构的存在会影响内波观测资料的处理,这早已由 Phillips (1971), Garrett 等(1971)等研究过。细结构与内波的非线性相互作用使问题极大地复杂化了,至今仍未得到满意的解决。

细结构也影响着海水的物质、能量和动量的传输及能量的耗散,因此它必然会影响到海洋大中尺度运动特性。在数值模拟中,这种影响称为亚网格因素,即它的尺度小于数值模型所取的网格间距。在大中尺度运动方程中常将亚网格因素用参数化形式引入,例如涡动扩散系数和涡动粘性系数。通过对观测资料的分析得出涡动扩散系数介于 $5 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 。此量值与其它方法所得结果一致。但比 Munk (1966) 所得的符合深洋盆的物理平衡状况的值 $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 小一个量级。已有很多学者研究了引起此差别的原因,但仍未真正搞清 Muller et al., 1989)。至于对粘性系数的研究,距离目标更是遥远。

能量耗散会影响波数-频率谱;反过来,也可从波数-频率谱推论出动能耗散率与热量耗散率 (Gregg, 1984)。Ledwell 等(1988)得出垂直于等密面的扩散率 $k_p = aN^{-b}$ 关系(其中 a 的量阶为 $10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}^2$; N 的单位为 s^{-1} ; b 可能取 0, 1, 2)。Gregg 等(1986)通过对 C_T 数和能量耗散率 ϵ 的相关分析得出: $C_T = -2.5 + 1.41 \times 10^{10} \epsilon$ 。

8 展望

不同尺度过程间的相互作用是目前研究的焦点问题。还未搞清参数化所得的涡动扩散系数与 Munk (1966) 结果不一致的原因。扩散问题是与混合过程相联系的。因而目前正开展对垂直等密面与沿等密面混合的研究以求得到较合理的结果 (Muller et al., 1989)。

与细结构有关的动力学过程的研究是目前的另一热门课题(Muller et al., 1991),它

也是一种跨尺度的问题。目的是揭示大中小尺度运动间的相互作用关系。对揭示细结构的形成与演化起重要作用的内波动力学问题则是这一研究的结合点。

为了揭示耗散过程,得到涡动粘性系数,观测研究的尺度正延伸到微结构范围 (Gregg, 1989), 小尺度湍流与微结构的研究也正在蓬勃展开。

参 考 文 献

- 方欣华、尤钰柱、张玉琳, 1988, 用 CTD 资料分析东海温盐密垂向细结构的初部尝试 II. 温度细结构特性初探, *海洋学报*, **10**(2): 129—135.
- 方欣华、鲍献文、张玉琳等, 1994, 南海西南海域内波和细结构, *海洋与湖沼*, **25**(1): 1—8.
- D'Asaro, E.A., 1984, Wind force internal waves in the North Pacific and Sargasso Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, **14**: 781—794.
- Desaubies, Y.J.F. and Gregg, M.C., 1981, Reversible and irreversible finestructure, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**: 541—556.
- Desaubies, Y.J.F. and Smith, W.K., 1982, Statistics of Richardson number and instability in oceanic internal waves, *J. Phys. Oceanogr.*, **12**: 1245—1259.
- Duda, T.F. and Cox, C.S., 1989, Vertical wave number spectra of vertical velocity and shear at small internal wave scales, *J. Geophys. Res.*, **94**: 939—950.
- Eriksen, C.C., 1978, Measurements and models of fine structure, internal gravity waves, and wave breaking in the deep ocean, *J. Geophys. Res.*, **83**: 2989—3009.
- Fang Xinhua, Yu Ying and Zhang Yuling, 1990, The vertical temperature structure with small-and-fine scales in the East China Sea. *Physics of Shallow Seas*, ed. by Wang Huatong and Dai Hua, China Ocean Press (Beijing), pp. 305—315.
- Gargett, A.E. and Osborn T.R., 1981, Small-scale microstructure during the fine and microstructure experiment, *J. Geophys. Res.*, **86**: 1929—1944.
- Garrett, C. and Munk, W.H., 1971, Internal wave spectra in the presence of fine structure, *J. Phys. Oceanogr.*, **1**: 196—202.
- Gill, A.E., 1981, Homogeneous intrusion in a rotating stratified fluid, *J. Fluid Mech.*, **103**: 275—295.
- Gregg, M.C., 1977a, Variations in the intensity of small-scale mixing in the main thermocline, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**: 436—454.
- Gregg, M.C., 1977b, A comparison of fine-structure spectra from the main thermocline, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**: 33—40.
- Gregg, M.C., 1987, Diapycnal mixing in the thermocline, a review, *J. Geophys. Res.*, **92**: 5249—5286.
- Gregg, M.C., 1989, Scaling turbulent dissipation in the thermocline, *J. Geophys. Res.*, **94**: 686—698.
- Gregg, M.C., E.A., D'Asaro, Shay, T.J. et al., 1986, Observations of persistent mixing and near-inertial internal waves, *J. Phys. Oceanogr.*, **16**: 856—885.
- Jose Luis Ochoa de la Torre, 1984, On the two limiting types of oceanic finestructure, By University Microfilms international, Ann Arbor, Michigan, U.S.A. p. 3058.
- Kunze, E., Briscoe, M.G. and Williams III, A.J., 1990, Interpreting shear and strain fine structure from a neutrally buoyant float, *J. Geophys. Res.*, **95**: 18111—18125.
- Ledwell, J.R. and Watson, A.J., 1988, The use of deliberately injected tracers for the study of diapycnal mixing in the ocean, *Small-scale Turbulence and Mixing in the Ocean*, Elsevier Science Publishers B.V., pp. 11—20.
- Levine, M.D. and Irish, J.D., 1981, A statistical description of temperature finestructure in the presence of internal waves, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**: 676—691.
- McKean, R.S., 1974, Interpretation of internal wave measurement in the presence of finestructure, *J. Phys. Oceanogr.*, **4**: 200—213.
- Muller, P. and Henderson, D., 1989, Parameterization of small-scale processes, Proceedings, 'Aha Huliko'a Hawaiian Winter Workshop, Hawaii Institute of Geophysics, Special Publication, 364pp.
- Muller, P. and Henderson, D., 1991, Dynamics of oceanic internal gravity waves, Proceedings, 'Aha Huliko'a Hawaiian Winter Workshop, School of Ocean and Earth Science and Technology, Special Publication, 508pp.
- Munk, M., 1966, Abyssal recipes. *Deep-Sea Res.*, **13**: 707—780.

- Munk, W., 1981, Internal wave and small scale processes, *Evolution of Physical Oceanography*, ed. by Warren and Wunsch Cambridge, Mass. MIT Press, pp. 264—290.
- Onken, R., Fischer, J. and Woods, J.D., 1990, Thermohaline finestructure and its relation to frontogenesis dynamics, *J. Phys. Oceanogr.*, **20**: 1379—1393.
- Osborn, T.R. and Cox, C.S., 1972, Oceanic finestructure, *Geophys. Fluid Dyn.*, **3**: 321—345.
- Phillips, O.M., 1971, On spectra measured in an undulating layered medium, *J. Phys. Oceanogr.*, **1**: 1—6.
- Stommel, H. and Fedorov, K.N. 1967, Small-scale structure in temperature and salinity near Timor and Mindanao, *Tellus*, **19**: 306—325.
- Toole, J.M. and Hayes, S.P., 1984, Finescale velocity-density characteristics and Richardson number statistics of the Eastern Equatorial Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, **14**: 712—726.
- Woods, J.D., 1968, Wave-induced shear instability in the summer thermocline, *J. Fluid Mech.*, **32**: 971—800.
- Федоз, К.Н., 1972, Внутренние волны и вертикальная термохалинная микроструктура океана: Внутренние Волны в Океане, Новосибирск, СО АН СССР, 90—118.

A REVIEW ON OCEANIC FINESTRUCTURE

Bao Xianwen, Fang Xinhua

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

ABSTRACT

The developing history of oceanic finestructure studies is reviewed. The basic concept is clarified, and the space scales of finestructure in deep sea and shallow sea are distinguished. The features and the differentiated methods of reversible and irreversible finestructure, and their generation mechanism are summarized. This paper briefly intruduces some instruments used to measure multi-parameters of finestructure and some results by analyzing data obtained with them. Primary research results of vertical wave number spectral properties and spectral analytic models are discussed. The differents of temperature and velocity vertical wave number spectral properties in water stronger and weaker mixture region. The statistic features of Cox number and Richardson number, and research results related to them on small scale processes are summarized. Finally, the focal problems and research methods at present and developing tendency in the future on this field are overviewed.

Key words Finestructure Internal waves Small-scale processes Micro-structure Review